

ESTUDO TÉCNICO-ECONÓMICO DE UMA UNIDADE DE CO-COMPOSTAGEM DE LAMAS DE ETAR

ANTÓNIO FRANCISCO TRANCOSO MENDES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Orientador: Professor Doutor Chia-Yau Cheng

Co-Orientador: Engenheira Ana Cláudia Rodrigues de Sousa

JULHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2008/2009

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351 22 508 1400

Fax +351 22 508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente - 2008/2009 - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha Família

*“Toda persona viene al mundo con una serie
de talentos y habilidades naturales. Vivir
tiene mucho que ver con descubrirlos,
disfrutarlos y ponerlos al servicio de una
causa mayor que uno mismo.”*

Autor desconhecido

Agradecimentos

Ainda que tenha um carácter individual, a elaboração desta tese teve o contributo de diversas pessoas a quem gostaria de dirigir o meu agradecimento:

Ao Dr. Cheng, meu orientador, pela simpatia com que sempre o encontrei e pelo acompanhamento e disponibilidade que demonstrou ao longo deste projecto. Pelas sugestões, críticas e correcções feitas e ainda pela disponibilização do Laboratório de Engenharia Sanitária.

À Eng.^a Ana Sousa, co-orientadora do projecto, e à equipa das Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, SA, pelo apoio e orientação, que me permitiram obter a informação indispensável à execução desta tese.

À Eng.^a Patrícia Alves e à Raquel Moura pelo período que passamos no laboratório e pela ajuda na realização das análises. Fica também perpetuada a memória dessa personagem incrível que é o Sr. Almeida.

À Professora Aurora Silva pela utilização do laboratório do Departamento de Engenharia de Minas.

Ao Professor Manuel Fonseca Almeida pela utilização do laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais e pelas opiniões e sugestões transmitidas a propósito deste projecto.

Ao Professor Paulo Monteiro pelo material bibliográfico e pelas sugestões apresentadas para o desenvolvimento do trabalho.

Aos Professores Domingos Barbosa e Filipe Mergulhão pelo esclarecimento de dúvidas importantes para o desenvolvimento do projecto.

À Eng.^a Cecília Silva e aos Engenheiros Luís Almeida, Manuel Guimarães e Rui Leite pela assistência na utilização do sistema de informação geográfico.

Por fim, mas não menos importantes, um obrigado àqueles que me criaram, educaram e me acompanharam ao longo destes vinte e dois anos:

Aos meus pais, avós e família, mas em especial à minha madrinha e tia São pelo apoio escolar que me deu durante quase dez anos, pela santa paciência e imensa dedicação.

Ao João Pinto, João Restivo e Luisa Teixeira pela amizade e pelo caminho que juntos percorremos na FEUP, casa que será sempre nossa.

Ao André Silva pela amizade que nos liga desde crianças.

Aos meus amigos de Vila Chã pelo tempo de lazer que passamos juntos.

A todos o meu sincero obrigado.

Resumo

O destino final das lamas produzidas nas Estações de Tratamento de Águas Residuais é um assunto de crescente importância e de grande actualidade, sendo a valorização agrícola a principal opção de gestão a nível europeu e nacional. As preocupações de índole ambiental e de saúde pública, resultantes da potencial presença nas lamas de microrganismos patogénicos, metais pesados e micropoluentes orgânicos restringem progressivamente esta prática.

Na região de Trás-os-Montes, as lamas produzidas nas ETAR pertencentes à rede do Vale do Douro Norte, apresentam níveis de contaminação microbiológica significativos, os quais necessitam de ser controlados para assim possibilitar a sua valorização agrícola.

Este trabalho tem como objectivo estudar, do ponto de vista técnico e financeiro, a instalação de uma unidade de compostagem, que permita o aproveitamento das lamas geradas nas ETAR e de resíduos agro-industriais e florestais produzidos na zona em estudo, originando um produto final de boa qualidade, com reduzida concentração de microrganismos patogénicos e de acrescentado valor final.

A metodologia aplicada implicou a análise qualitativa e quantitativa dos materiais com potencial para serem utilizados na co-compostagem das lamas e a avaliação dos custos associados à instalação e operação de 3 sistemas alternativos, incluindo uma proposta de localização da unidade.

A solução obtida sugere a implantação de um sistema formado por pilhas de material revolvido por um volteador autónomo, estando cobertas por uma tela geotêxtil e utilizando resíduos florestais como meio de suporte. A opção implica um investimento de cerca de 2.000.000 € e uma recuperação do investimento num prazo mínimo de 10 anos. Obtém-se assim uma solução que permite realizar o aproveitamento no solo da matéria orgânica e dos nutrientes contidos nas lamas, ao mesmo tempo que a gestão deste resíduo deixa de ser um encargo financeiro, convertendo-se numa fonte de rendimentos a médio prazo.

Recomenda-se um estudo prévio numa instalação piloto que permita a obtenção de dados fundamentais relativos ao desenvolvimento do processo e que neste estudo foram retirados de bibliografia.

Palavras-chave: Lamas de ETAR, microrganismos patogénicos, compostagem, resíduos agro-industriais.

Abstract

The management of sludge produced in waste water treatment plant is a matter of increasing significance in the present time. Application of sludge in agricultural land is the main management option at European and national level. The concerns of environment and public health, resulting from the potential presence of pathogenic microorganisms in sludge, as well as heavy metals and organic micropollutants, progressively restrict the practice.

In the region of *Trás-os-Montes*, the sludge produced in the WWTP belonging to the sub region of *Vale do Douro Norte*, shows significant levels of microbiological contamination, which need to be controlled so as to enable its agricultural use.

This work aims to study, from a technical and financial point of view, the installation of a composting plant, allowing the use of sludge produced in the WWTP as well as agro-industrial and forestry residues produced in the area under study, creating a final product of good quality, pathogenic microorganisms free and added value.

The applied methodology involved the quantitative and qualitative analysis of materials with potential for use in co-composting and the estimate of costs associated with installation and operation of 3 alternative composting systems, including a proposed location of the unit.

The solution suggests the deployment of a composting system formed by windrows turned by self-propelled turner and covered by a geotextil membrane, using forest residues as bulking agent. The option requires an investment of € 2,000,000 and a return of investment within a minimum of 10 years. The results are expressed as a solution that allows the recovery in the soil of the organic material and the nutrients contained in sludge, while the management of sludge is no longer a financial burden, becoming a source of income in the medium term.

A preliminary study in a pilot plant is recommended so that fundamental data can be tested in terms of the development of the process.

Keywords: wastewater sludge, pathogenic microorganisms, composting, agro-industrial waste.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xv
Acrónimos.....	xvii
1. Introdução.....	1
2. Objectivos.....	3
3. Enquadramento.....	5
3.1. <i>Lamas de ETAR.....</i>	<i>5</i>
Descrição do funcionamento de uma ETAR.....	5
3.1.1. Linha líquida.....	5
3.1.1.1. Pré-tratamento ou tratamento preliminar.....	5
3.1.1.2. Tratamento primário.....	6
3.1.1.3. Tratamento secundário ou biológico.....	6
3.1.1.4. Tratamento terciário ou avançado.....	6
3.1.2. Linha sólida.....	6
3.1.2.1. Espessamento.....	7
3.1.2.2. Estabilização.....	7
3.1.2.3. Condicionamento.....	7
3.1.2.4. Desidratação.....	7
3.1.2.5. Armazenagem.....	7
3.2. <i>Legislação.....</i>	<i>7</i>
3.2.1. Directiva nº 86/278/CE.....	8
3.2.2. Directiva nº 91/271/CE.....	9
3.2.3. Directiva nº 99/31/CE.....	9
3.3. <i>Produção de lamas.....</i>	<i>10</i>
3.3.1. INSAAR.....	11
3.3.2. RASARP.....	12
3.4. <i>Gestão das lamas.....</i>	<i>12</i>
3.4.1. Reutilização - Valorização agrícola.....	15
3.4.2. Compostagem.....	15
3.4.3. Incineração.....	16
3.4.4. Deposição em aterro.....	17
3.4.5. Novas tecnologias.....	17
4. Estado da arte.....	Erro! Marcador não definido.
4.1. <i>Processo de compostagem.....</i>	<i>19</i>
4.2. <i>Estabilização do composto.....</i>	<i>20</i>
4.3. <i>Transformações microbiológicas no processo.....</i>	<i>21</i>
4.4. <i>Factores condicionantes do processo de compostagem.....</i>	<i>21</i>
4.4.1. Razão C/N.....	21
4.4.2. Arejamento e temperatura.....	22
4.4.3. Humidade.....	22
4.4.4. pH.....	23
4.4.5. Granulometria.....	23
4.4.6. Inóculo.....	23
4.4.7. Resumo dos parâmetros a controlar no processo de compostagem.....	23

4.5. Cálculo das necessidades de arejamento	24
Metodologia de Cálculo	24
4.6. Produção de odores.....	27
4.7. Qualidade final do composto	28
4.8. Vantagens de aplicação de composto no solo.....	29
4.9. Sistemas de compostagem.....	30
4.9.1. Pilhas estáticas	30
4.9.2. Pilhas estáticas alongadas.....	31
4.9.3. Pilhas revolvidas.....	31
4.9.4. Pilhas estáticas arejadas	31
4.9.5. Sistemas em rector.....	32
4.10. Comparação dos diferentes sistemas de compostagem	33
4.10.1. Pilhas revolvidas.....	33
4.10.2. Pilhas estáticas arejadas	34
4.10.3. Sistemas em Reactor.....	34
4.11. Resumo dos principais sistemas de compostagem.....	35
5. Estudo de caso.....	37
6. Metodologia	39
6.1. Estudo técnico-económico da unidade de compostagem conjunta das lamas de ETAR	39
6.1.1. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, das lamas produzidas	39
6.1.2. Caracterização das práticas actuais da empresa no âmbito da gestão das lamas.....	39
6.1.3. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, de produtos agro-industriais produzidos na zona em estudo.....	40
6.1.3.12. Análise qualitativa dos materiais destinados à compostagem.....	40
6.1.3.13. Produção de resíduos agro-industriais no Vale do Douro Norte.....	41
6.1.4. Estudo técnico e económico dos processos alternativos de compostagem, incluindo uma proposta para a localização da unidade de compostagem	41
6.1.4.14. Selecção dos sistemas de compostagem a analisar	41
6.1.4.15. Descrição de funcionamento de cada um dos sistemas.....	41
6.1.4.16. Cálculo das misturas a compostar	42
6.1.4.17. Cálculo das dimensões das pilhas de compostagem e consequente área de implantação	42
6.1.4.18. Estimativa dos custos associados a cada um dos sistemas	44
6.1.4.19. Proposta de localização da unidade de compostagem.	45
6.1.4.20. Balanço económico do funcionamento da unidade	46
6.2. Identificação de soluções tecnológicas que permitem diminuir a quantidade de microrganismos patogénicos presentes nas lamas de ETAR.....	47
7. Resultados e Discussão	49
7.1. Estudo técnico-económico da unidade de compostagem conjunta das lamas de ETAR	49
7.1.1. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, das lamas produzidas no Vale do Douro Norte	49
7.1.1.1. Produção de lamas	49
7.1.1.2. Análise qualitativa das lamas no Vale do Douro Norte	50
7.1.2. Caracterização das práticas actuais da empresa no âmbito da gestão das lamas produzidas	51
7.1.3. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, de produtos agro-industriais produzidos na zona em estudo.....	52
7.1.3.1. Engaço de uva	52
7.1.3.2. Folhas de oliveira	52
7.1.3.3. Resíduos florestais.....	53
7.1.3.4. Serrim	53
7.1.4. Análise qualitativa dos materiais destinados à compostagem	53

7.1.4.1. Amostragem	53
7.1.4.2. Análise Granulométrica	55
7.1.4.3. Análises físico-químicas	56
7.1.5. Produção de resíduos agro-industriais no Vale do Douro Norte	57
7.1.6. Estudo técnico e económico dos processos alternativos de compostagem, incluindo uma proposta para a localização da unidade de compostagem	58
7.1.6.1. Selecção dos sistemas de compostagem a analisar	58
7.1.6.2. Descrição de funcionamento de cada um dos processos	58
7.1.6.3. Cálculo das misturas a compostar	59
7.1.6.4. Cálculo das dimensões das pilhas de compostagem e consequente área de implantação	60
7.1.6.5. Cálculo das necessidades de arejamento do sistema em canal	64
7.1.6.6. Estimativa dos custos de implantação associados a cada um dos sistemas	66
7.1.6.7. Proposta de localização da unidade de compostagem	68
7.1.6.8. Balanço económico do funcionamento da unidade	74
7.2. Soluções tecnológicas que permitem diminuir a quantidade de microrganismos patogénicos presentes nas lamas de ETAR	79
7.2.1. Tratamento térmico	79
7.2.2. Tratamento térmico e químico	80
7.2.3. Processos para uma maior redução de patogénicos	81
7.2.3.1. Compostagem	81
7.2.3.2. Secagem térmica	81
7.2.3.3. Tratamento térmico II	82
7.2.3.4. Digestão Aeróbia termofílica	82
7.2.3.5. Pasteurização	82
7.2.3.6. Irradiação por raios beta ou gama	82
7.2.4. Digestão anaeróbia termofílica	82
7.2.5. Comentário às opções de redução de microrganismos patogénicos	83
8. Conclusões	85
Bibliografia	87
9. Anexos	92
9.1. Anexo A	92
9.2. Anexo B	93
9.3. Anexo C	94
9.4. Anexo D	95

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Esquema genérico de funcionamento de uma ETAR.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2 - Evolução da população servida com drenagem e tratamento de águas residuais em Portugal</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3 - Gestão de lamas, vias alternativas.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4 - Destino final das lamas de ETAR na UE-15 entre 1999-2001.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5 - Fases do processo de compostagem em função da temperatura da pilha, adaptado de.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6 - Expressão da degradação biológica da matéria orgânica.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7 - Pilhas estáticas</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8 - Pilhas estáticas alongadas</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9 - Pilhas revolvidas</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10 - Pilhas estáticas arejadas</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11 - Silo vertical</i>	<i>32</i>
<i>Figura 12 - Sistema em canal.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 13 - Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento de Trás-os-Montes e Alto Douro.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 14 - Municípios constituintes da rede Vale do Douro Norte e ETAR instaladas em cada município.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 15 - Engaço de uva</i>	<i>54</i>
<i>Figura 16 - Folhas de oliveira.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 17 - Resíduo florestal processado.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 18 - Serrim.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 19 - Emaranhado de engaço de uva.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 20 - Resíduo florestal retido no crivo de 4,75 mm.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 21 - Materiais retidos nos crivos com malha acima de 3,35 mm.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22 - Triturador Komptech R 3400</i>	<i>62</i>
<i>Figura 23 - Locais considerados como possíveis para a implantação da unidade de compostagem e sujeitos a avaliação.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 24 - Local proposto para a instalação da unidade de compostagem.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 25 - Colocação da caixa em cima do chassis e camião com caixa de 25 m³</i>	<i>73</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Características das lamas primárias e secundárias.</i>	6
<i>Tabela 2 - Resumo da legislação Comunitária e Portuguesa referente ao sector da drenagem e tratamento de águas residuais e gestão das lamas.</i>	8
<i>Tabela 3 - Lama produzida em Portugal, segundo os dados recolhidos pelo INSAAR.</i>	11
<i>Tabela 4 - Produção de lamas em Portugal.</i>	12
<i>Tabela 5 - Unidades de compostagem de lamas de ETAR na Europa e nos Estados Unidos.</i>	16
<i>Tabela 6 - Controlo dos parâmetros operacionais no processo de compostagem.</i>	24
<i>Tabela 7 - Parâmetros utilizados no cálculo do arejamento.</i>	25
<i>Tabela 8 - Composição química geral de diversos materiais orgânicos.</i>	26
<i>Tabela 9 - Proposta de normas técnicas sobre qualidade do composto, classes e valores limite.</i>	29
<i>Tabela 10 - Condições mínimas operatórias para obtenção da classificação do composto.</i>	29
<i>Tabela 11 - Sumário dos principais sistemas de compostagem.</i>	35
<i>Tabela 12 - Características da ETAR da zona em estudo.</i>	38
<i>Tabela 13 - Análises físico-químicas realizadas aos resíduos agro-industriais.</i>	40
<i>Tabela 14 - Fórmulas para o cálculo da quantidade de mistura de cada material.</i>	42
<i>Tabela 15 - Dados de base para o dimensionamento do sistema de compostagem.</i>	43
<i>Tabela 16 - Custos e ganhos a considerar no balanço económico do funcionamento da unidade de compostagem.</i>	46
<i>Tabela 17 - Valor médio de produção de lamas nas ETAR do Vale do Douro Norte no ano 2007 e 2008.</i>	49
<i>Tabela 18 - Quantidade de lama de projecto produzida em nas diferentes ETAR.</i>	50
<i>Tabela 19 - Comparação da concentração de metais pesados, compostos orgânicos e dioxinas, e dos parâmetros microbiológicos contidos nas lamas e impostos pela legislação.</i>	50
<i>Tabela 20 - Propriedades físico-químicas das lamas produzidas na ETAR de Vila Real e enviadas para valorização agrícola.</i>	51
<i>Tabela 21 - Resíduos agro-industriais com potencial para serem utilizados na compostagem.</i>	52
<i>Tabela 22 - Análise granulométrica dos resíduos florestais e do serrim.</i>	55
<i>Tabela 23 - Propriedades físico-químicas dos materiais de suporte.</i>	57
<i>Tabela 24 - Produção de resíduos agro-industriais na região em estudo.</i>	58
<i>Tabela 25 - Cálculo da humidade e do rácio C/N das lamas.</i>	59
<i>Tabela 26 - Massa de agente condicionante a adicionar por massa de lama.</i>	59
<i>Tabela 27 - Cálculo da nas necessidades iniciais de rega.</i>	60
<i>Tabela 28 - Equipamento volteador e dimensões de trabalho.</i>	60
<i>Tabela 29 - Área necessária para a degradação activa e maturação.</i>	61
<i>Tabela 30 - Área dedicada a armazenamento temporário.</i>	63
<i>Tabela 31 - Área total de implantação do sistema.</i>	63
<i>Tabela 32 - Propriedades dos materiais necessárias ao cálculo do arejamento.</i>	64
<i>Tabela 33 - Cálculo da humidade específica do ar de entrada e de saída.</i>	64
<i>Tabela 34 - Cálculo de calor libertado por massa de mistura a compostar.</i>	65
<i>Tabela 35 - Cálculo da massa de ar a introduzir na pilha por massa de mistura a biodegradar.</i>	65
<i>Tabela 36 - Caudal de ar a introduzir no sistema de compostagem em canais.</i>	66
<i>Tabela 37 - Itens considerados na avaliação dos custos para cada sistema.</i>	66
<i>Tabela 38 - Custo da maquinaria utilizada na compostagem.</i>	68
<i>Tabela 39 - Exemplo da apresentação da informação relativa às distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem.</i>	69
<i>Tabela 40 - Ordenação crescente dos somatórios das distâncias entre os pontos possíveis para a instalação da unidade e as ETAR.</i>	70
<i>Tabela 41 - Exemplo do cálculo de (α).</i>	70

Tabela 42 - Ordenação crescente dos somatórios de (α) para cada ponto possível de instalação da unidade de compostagem.	71
Tabela 43 - Custo do transporte anual anual das lamas desde as ETAR até à unidade de compostagem, segundo os dados do orçamento apresentados pela empresa transportadora.....	73
Tabela 44- Custos associados à gestão do transporte das lamas.....	73
Tabela 45 - Custo de transporte por ano.	74
Tabela 46 - Investimento necessário para instalar a unidade.	75
Tabela 47 - Número de horas de anuais de funcionamento do equipamento.....	76
Tabela 48 - Consumo energético do equipamento em utilização na unidade.....	77
Tabela 49 - Custos anuais de operação da unidade	77
Tabela 50 - Balanço económico da instalação e funcionamento da ETAR.	78
Tabela 51 - Regimes de Tempo - Temperatura para tratamento térmico.....	80
Tabela 52 - Tratamento térmico de lamas, exigência de contacto Tempo-Temperatura.	80
Tabela 53 - Condições mínimas de operação para que a compostagem possa ser considerada um PMRP.	81
Tabela 54 - Valores limite de concentração de metais pesados, compostos orgânicos e dioxinas, e dos parâmetros microbiológicos contidos nas lamas.....	92
Tabela 55 - Produção e destino final das lamas produzidas na UE-15 entre 1999-2001.....	93
Tabela 56 - Adeqas de Vinho e Lagares de Azeite na Região em estudo.....	94
Tabela 57 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (1.8).....	95
Tabela 58 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (2.8).....	96
Tabela 59 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (3.8).....	97
Tabela 60 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (4.8).....	98
Tabela 61 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (5.8).....	99
Tabela 62 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (6.8).....	100
Tabela 63 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (7.8).....	101
Tabela 64 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (8.8).....	102

Acrónimos

AOX	Compostos organohalogenados adsorvíveis ou haletos orgânicos adsorvíveis
ATMAD	Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, SA
DRADM	Direcção Regional de Agricultura de entre Douro e Minho
CEE	Comunidade Económica Europeia
CCDR	Comissão de coordenação e desenvolvimento regional
DEHP	Di (2-etilhexil) ftalato
DL	Decreto-Lei
DRA	Direcção Regional de Agricultura
EG	Entidades Gestoras
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
INAG	Instituto da Água
INSAAR	Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais
IRAR	Instituto Regulador de Águas e Resíduos
LAS	Alquilo benzenossulfonatos lineares
m.s.	massa seca
NPE	Nonilfenois e nonilfenois etoxilados
NMP	Número Mais Provável
PAH	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
PCB	Compostos bifenilos policlorados
PCDD/F	Policlorodibenzodioxinas/furanos
PEAASAR	Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais
PEAASAR II	Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais 2007-2013
PMRP	Processos para uma Maior Redução de Patogénicos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UE	União Europeia

1. Introdução

A revolução agrícola, intensificada no século XVIII, e principalmente a revolução industrial, que igualmente arrancou em Inglaterra na segunda metade do século XVIII, marcaram decisivamente o rumo da História a nível tecnológico, económico e social. As transformações introduzidas e expandidas mundialmente a partir do século XIX contribuíram para o nascimento de novas indústrias, que se foram instalando nas cidades, gerando um aumento da população urbana e graves problemas sociais e ambientais (Rodrigues, 1996).

O século XX ficou marcado, a nível mundial, por um crescimento populacional exponencial, que acompanhado por um desenvolvimento económico significativo, ainda que desigual, permitiu uma melhoria substancial das condições de vida das populações. Para este aumento da qualidade de vida, contribuiu também o crescente atendimento dos serviços de saneamento básico, em termos de abastecimento de água, de drenagem e tratamento de águas residuais. O acesso a estes serviços e a generalização da utilização de equipamentos domésticos intensificou o consumo de água e consequente produção de águas residuais. Ainda que de forma desfasada, esta realidade também vem sendo vivida em Portugal.

Com a adesão à Comunidade Económica Europeia (CEE) em 1986, Portugal, um país distante dos padrões de desenvolvimento dos parceiros europeus ocidentais, viu-se obrigado a adequar ou a criar legislação consonante com as directivas europeias, registando-se este acontecimento como um marco fundamental na produção e implementação de legislação nacional na área do ambiente.

A obrigatoriedade da recolha e tratamento das águas residuais urbanas, preconizada pela legislação europeia, fomentou a construção de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) por todo o país. Um dos subprodutos das ETAR, as lamas, apresenta necessidades de gestão cuidada tendo em consideração os seus potenciais efeitos negativos, devido à possível presença, em quantidades superiores às aquelas definidas como aceitáveis, de microrganismos patogénicos e metais pesados. Sendo ricas em matéria orgânica, possuem por isso um valor agronómico significativo para os solos portugueses, tradicionalmente pobres em matéria orgânica e nutrientes (Rosas, 2005).

A gestão das lamas produzidas nas ETAR pertencentes à rede do Vale do Douro Norte e administradas pela empresa Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, é actualmente realizada por uma entidade externa à empresa, tendo como principal destino final a valorização em solos agrícolas. O incumprimento de alguns parâmetros microbiológicos, e as crescentes limitações impostas pela legislação, impedem que esta solução continue a ser aplicada de uma forma acessível. Urge por isso encontrar alternativas de gestão que sejam mais vantajosas, a nível ambiental e financeiro, para a empresa.

A gestão das lamas representa um problema na medida em que estas sejam consideradas como um resíduo. Neste campo, a compostagem desempenha um papel preponderante ao considerá-las como uma matéria-prima, que, em conjunto com outros resíduos, nomeadamente de origem agro-industrial e florestal, dão origem a um produto final útil, de boa qualidade e que representa uma mais-valia económica, representado por isso uma oportunidade a equacionar e a estudar.

2. Objectivos

- Estudo técnico-económico de uma unidade para compostagem conjunta das lamas de ETAR e de resíduos agro-industriais e florestais na área do Vale do Douro Norte – Trás-os-Montes.
- Identificação de soluções tecnológicas que permitam diminuir a quantidade de microrganismos patogénicos presentes nas lamas de ETAR, possibilitando assim a sua valorização agrícola.

3. Enquadramento

3.1. Lamas de ETAR

Por imperativos ambientais e de saúde pública, as águas residuais, provenientes nomeadamente de usos domésticos, industriais e agrícolas, não podem ser descarregadas directamente para o meio receptor.

As águas residuais urbanas¹ são submetidas a um conjunto de tratamentos físicos, químicos e biológicos realizados nas ETAR, esquematizados genericamente na Figura 1, que visam separar os materiais sólidos, reduzir a carga de matéria orgânica, de nutrientes (azoto e fósforo) e de metais pesados, e reduzir/inactivar os microrganismos patogénicos contidos no afluente, permitindo a sua reutilização ou descarga em condições ambientalmente seguras.

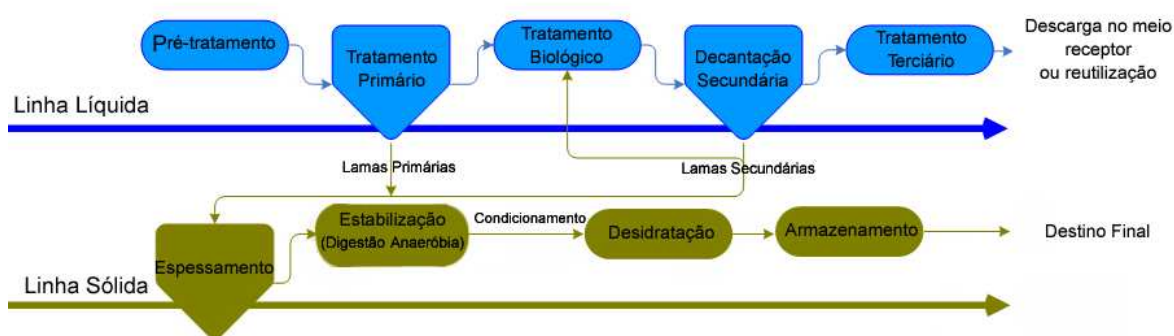


Figura 1 - Esquema genérico de funcionamento de uma ETAR.

Descrição do funcionamento de uma ETAR

3.1.1. Linha líquida

O tratamento da fase líquida é a fase de maior relevância nas ETAR, condicionando a quantidade e a qualidade de lamas produzidas. Os esquemas tradicionais de tratamento incluem uma etapa de pré-tratamento, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário.

3.1.1.1. Pré-tratamento ou tratamento preliminar

Destina-se a remover o material grosseiro (areias, material equiparado a resíduos sólidos urbanos e gorduras) contido nas águas residuais, e que poderiam causar entupimentos e desgaste do equipamento da linha de tratamento, nomeadamente em tubagens, bombas e equipamentos de mistura. O material separado nesta etapa é usualmente enviado para aterro, não devendo ser misturado com as lamas produzidas nos processos subsequentes.

¹ Águas residuais domésticas ou a mistura destas com águas residuais industriais e/ou com águas pluviais (DL_236/98)

3.1.1.2. Tratamento primário

Tem como finalidade remover parte dos sólidos que estão em suspensão nas águas residuais. Tal propósito é conseguido fazendo circular a água residual nos decantadores primários a velocidades reduzidas, ocorrendo a sua deposição por sedimentação.

As lamas produzidas são compostas principalmente por sólidos sedimentáveis. Contêm um teor elevado de matéria orgânica facilmente biodegradável, podendo exalar um forte odor devido à sua instabilidade e putrescibilidade – *Lamas Primárias*.

3.1.1.3. Tratamento secundário ou biológico

Tem como principal objectivo estabilizar a matéria orgânica e remover o material coloidal não sedimentado. Converte a matéria orgânica dissolvida em sólidos orgânicos e inorgânicos que posteriormente são removidos nos decantadores secundários. Para tal, são criadas as condições óptimas para o desenvolvimento bacteriano que consome matéria orgânica e nutrientes, em condições aeróbias, anaeróbias ou mistas. O crescimento ocorre em suspensão, em suportes ou combinando estas opções.

A lama produzida resulta principalmente da produção de biomassa, formando assim uma lama biológica – *Lamas Secundárias*.

3.1.1.4. Tratamento terciário ou avançado

Destina-se a remover, do efluente resultante do tratamento secundário, substâncias que o classificam como impróprio para descarga ou outro fim, implicando a remoção adicional de nutrientes (azoto e fósforo) e/ou sólidos suspensos totais para que a água seja ainda submetida a processos de desinfecção.

Do conjunto destes tratamentos resultam duas fases, uma líquida, que contém uma quantidade reduzida de poluentes e que permite a sua descarga ou utilização em condições ambientalmente correctas, e um produto semi-sólido, as lamas, que precisam de ser tratadas uma vez que foram acumulando o material removido da água residual.

3.1.2. **Linha sólida**

Uma lama pode ser definida como uma mistura de água e de sólidos separados de diversos tipos de águas, como resultado de processos naturais ou artificiais. As lamas resultantes dos tratamentos à linha líquida possuem uma quantidade elevada de humidade e de matéria orgânica (Tabela 1).

Tabela 1 - Características das lamas primárias e secundárias, adaptado de (Kiely, 1999) .

Parâmetro	Lamas primárias	Lamas secundárias
Sólidos Secos	2-6%	0,5-2%
Sólidos Voláteis	60-80%	50-70%
Coliformes Fecais	10^6 - 10^7	10^7 - 10^9

As etapas de tratamento das lamas incluem:

3.1.2.1. Espessamento

Procura diminuir o volume das lamas por remoção de parte da fracção líquida. Nas lamas primárias, mais densas, aplica-se habitualmente um espessamento gravítico, enquanto nas lamas secundárias, menos densas, se efectua a flotação ou centrifugação.

3.1.2.2. Estabilização

É efectuada com o intuito de diminuir o potencial de putrefacção das lamas, atenuar a produção de odores e a presença de microrganismos patogénicos. A degradação biológica da matéria orgânica em produtos finais não celulares contribui ainda para a redução do volume de lamas. Pode ser realizada biologicamente – por armazenamento de longa duração das lamas, por digestão anaeróbia (opção de estabilização bastante utilizada), digestão aeróbia e compostagem; utilizando processos químicos – por adição de cal, ainda que nesta situação ocorra uma inibição do crescimento microbológico e não uma diminuição do teor de matéria orgânica; e por processos físicos – secagem térmica e pasteurização.

3.1.2.3. Condicionamento

Visa otimizar a retenção de sólidos nos sistemas de desidratação por adição de coagulantes ou polielectrólitos.

3.1.2.4. Desidratação

Tem como objectivo retirar a máxima quantidade de água possível da lama, reduzindo assim o volume, facilitando o transporte e a sua manuseabilidade. Pode efectuar-se mecanicamente – filtros banda, filtros prensa, centrífugas, filtros de vácuo; ou naturalmente – por evaporação, ou por percolação em leitos e lagoas de secagem.

3.1.2.5. Amazenagem

Quando necessário, as lamas são armazenadas temporariamente antes de serem enviadas para o destino final.

As lamas resultantes dos processos de tratamento apresentados anteriormente e produzidas em ETAR são designadas como lamas de ETAR. Neste trabalho, o termo “lamas” refere-se sempre a lamas de ETAR, excepto nas situações em que for expresso o contrário.

3.2. Legislação

A adesão de Portugal à então designada CEE e actual União Europeia (UE) implicou uma adequação e convergência da legislação nacional às normas europeias. Um dos sectores onde o peso das normas comunitárias contribuiu para o florescimento de legislação nacional foi o sector ambiental. Efectivamente, a legislação portuguesa relativa à drenagem e tratamento de águas residuais e gestão

das lamas, é consequência da transposição das normas comunitárias para o direito interno. As exigências no que diz respeito à drenagem e tratamento de águas residuais têm como consequência directa um aumento da produção de lamas. Na Tabela 2 apresenta-se uma descrição sucinta da legislação base que regula o sector.

Tabela 2 - Resumo da legislação Comunitária e Portuguesa referente ao sector da drenagem e tratamento de águas residuais e gestão das lamas.

Instrumento Legal Comunitário	Instrumento Legal Nacional	Disposições Gerais
Directiva nº 86/278/CE	DL nº 446/91, revogado pelo DL nº 118/2006	Regulamenta a utilização de lamas em solos agrícolas.
Directiva nº 91/271/CE Directiva nº 98/15/CE	DL nº 152/97 DL nº 348/98	Define os requisitos dos sistemas de drenagem e tratamento das águas residuais urbanas.
Directiva nº 99/31/CE	DL nº 152/2002	Medidas, processos e orientações sobre a deposição de resíduos em aterro.

3.2.1. Directiva nº 86/278/CE

A directiva nº 86/278/CE, relativa à protecção do ambiente, e em especial dos solos na utilização agrícola de lamas de depuração (resultantes do tratamento de águas residuais domésticas, urbanas ou de composição similar), procura proteger o Homem, os animais e a vegetação contra os potenciais efeitos nocivos das lamas de ETAR. Para tal estabelece critérios de qualidade para as lamas e para os solos, fixando valores limite relativos às concentrações de metais pesados nos solos receptores de lamas, às concentrações de metais pesados nas lamas e às quantidades máximas anuais desses metais que podem ser introduzidas nos solos agrícolas, com base numa média de dez anos. Determina ainda que apenas podem ser utilizadas lamas às quais seja aplicado um tratamento que permita diminuir o seu poder de biodegradação (*lamas tratadas*), estipulando ainda o tipo de cultura e a época em que pode ser realizada a sua valorização. Define os métodos de referência, de amostragem e de análise das lamas e dos solos, que devem ser utilizados, bem como o dever da manutenção de registos actualizados de produção e utilização das lamas na agricultura.

O DL nº 118/2006 regula a utilização de lamas na agricultura em Portugal, baseando-se na directiva anteriormente apresentada. Define as lamas de composição similar às lamas de depuração, nomeadamente aquelas provenientes do tratamento de efluentes de preparação e processamento de frutos e legumes, óleos alimentares, café, conservas, da indústria dos lacticínios, da pasta do papel entre outros. Acrescenta que o tratamento aplicado às lamas, além de reduzir o poder de biodegradação, deve eliminar os microrganismos que ponham em risco a saúde pública. As limitações, no que concerne aos metais pesados, são idênticas à da Directiva, variando contudo o seu valor limite, introduzindo ainda limites à concentração de poluentes orgânicos e dioxinas nas

lamas. Impõe ainda restrições e limites geográficos à utilização das lamas, nomeadamente em zonas perto de captações de águas, de habitações, de escolas ou zonas de interesse público.

A legislação europeia neste campo está em revisão, sendo provável que a curto prazo sejam alterados alguns dos itens base, nomeadamente os valores limite para os metais pesados e a introdução de valores limite para poluentes orgânicos e microrganismos patogénicos (*Salmonella* e *Escherichia Coli*); a regulamentação da aplicação das lamas na silvicultura, na recuperação de solos degradados e em zonas verdes; a proibição da aplicação de lamas não tratadas segundo determinados processos que visem uma maior estabilização e higienização das lamas, restringindo a sua aplicação em função do tratamento; e a proposta de responsabilização do produtor das lamas na análise das lamas e do solo. Isso mesmo está expresso no “*Working Document on Sludge - 3rd Draft*” (Directorate-General, 2000) que, face aos progressos científicos e tecnológicos e à experiência acumulada desde a criação da directiva há mais de 20 anos, procura actualizá-la e aperfeiçoá-la.

No Anexo A, Tabela 54 estão apresentadas as concentrações limite de metais pesados e de alguns compostos orgânicos, impostos pela Directiva e Decreto-Lei em vigor, e as alterações proposta no documento de revisão da directiva.

3.2.2. Directiva nº 91/271/CE

A Directiva nº 91/271/CE, relativa ao tratamento de águas residuais urbanas, visa proteger o ambiente dos efeitos negativos provocados pelas descargas de águas residuais. Para tal, os estados-membros, deveriam garantir um nível de tratamento mínimo às águas residuais, de acordo com a dimensão dos aglomerados populacionais e da natureza das águas receptoras, de forma faseada, entre 1998 e 2005. São definidos 2 tipos de zonas de descarga: zonas sensíveis – aquelas que se revelam susceptíveis de eutrofização, as águas doces de superfície destinadas à captação de água potável com um elevado teor de nitratos e outras águas que necessitem de um grau de tratamento superior; e zonas menos sensíveis. É responsabilidade de cada estado-membro definir as respectivas zonas no respectivo território nacional. As zonas sensíveis e de maior população equivalente implicariam prioridade de acção e níveis de tratamento mais exigente.

A transposição para o direito interno foi realizada pelo DL nº 152/97 que aprovou uma lista de identificação de zonas sensíveis, de zonas menos sensíveis e o respectivo mapa, proibindo ainda a descarga de lamas em águas de superfície. Por seu turno, o DL nº 348/98 transpôs a Directiva nº 98/15/CE, que altera a mencionada Directiva nº 91/271/CE, no que respeita à concentração ou percentagem mínima de redução de fósforo e azoto totais para a descarga de efluentes de ETAR em zonas sensíveis.

A classificação das zonas sensíveis e menos sensíveis, de revisão obrigatória de 4 em 4 anos, está actualmente inscrita no DL nº 149/2004. De realçar que em Portugal, e para descargas em zonas sensíveis, deve ser aplicado às águas residuais um nível de tratamento terciário.

3.2.3. Directiva nº 99/31/CE

O DL nº 152/2002 transpôs para o direito nacional a Directiva nº 99/31/CE referente à deposição de resíduos em aterros. Sendo as lamas de ETAR consideradas como um resíduos industrial não

perigoso, poderão ser depositadas em aterros para resíduos não perigosos, desde que satisfaçam os critérios de admissão indicados no anexo III da referida lei, nomeadamente no que respeita ao teor de humidade, que deve ser inferior a 35% em peso.

A estratégia nacional para a redução dos resíduos urbanos biodegradáveis tende, contudo, a limitar a fracção biodegradável dos resíduos depositados em aterro. Em relação aos valores de 1995, até 2009 a quantidade em peso devia ser reduzida para 50%, e até 2016 para 35% (INR, 2003). Estas limitações denotam uma clara opção e uma tendência para a valorização dos resíduos orgânicos, como é o caso das lamas, em detrimento da sua deposição em aterro.

3.3. Produção de lamas

A compilação da informação relativa à produção de lamas em Portugal é um assunto que ainda está em evolução, sendo que a sua quantificação total é usualmente realizada tendo por base estimativas. Esta situação é algo que contradiz a directiva que regula a utilização de lamas na agricultura, já que o artigo 10º explicita claramente que “os Estados-Membros zelarão pela manutenção de registos actualizados onde se anotem as quantidades de lamas produzidas e as entregues à agricultura”, devendo ainda elaborar periodicamente um relatório síntese com essa informação, inicialmente 5 anos após a entrada em vigor da directiva, para posterior compilação e análise por parte da comissão europeia (CE, 1986).

A Figura 2 permite observar o crescimento verificado a nível de drenagem e tratamento de águas residuais em Portugal, principalmente a partir do ano 2000, ano em que foi implementado o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Águas Residuais (PEAASAR) para o período 2000-2006, que contribuiu decisivamente para a estruturação do sector no âmbito dos fundos comunitários atribuídos a Portugal pelo 3º Quadro Comunitário de Apoio.

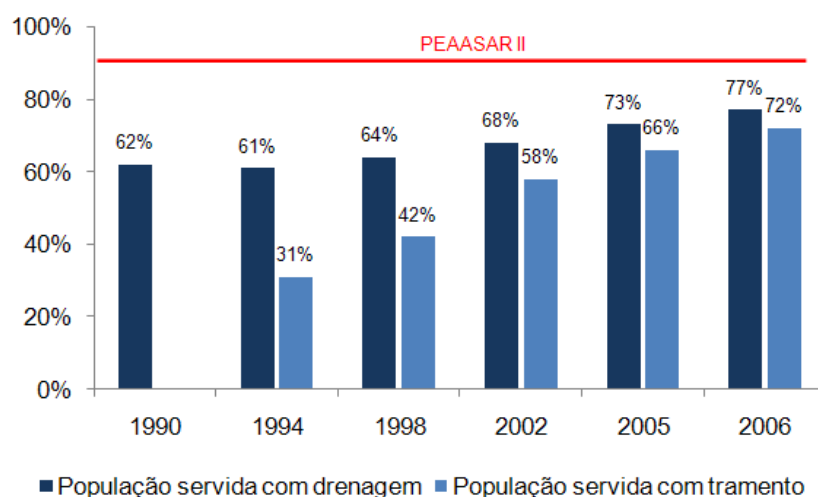


Figura 2 - Evolução da população servida com drenagem e tratamento de águas residuais em Portugal (IRAR, 2008).

De realçar o crescimento de mais de 70% entre 1998 e 2006 registado na população servida com tratamento de águas residuais, que tendeu a aproximar-se dos níveis de drenagem, respectivamente 72% e 77%, ainda assim insuficientes para atingir o objectivo de 90% proposto no PEAASAR 2000-

2006, considerado actualmente como a meta para o PEAASAR 2007-2013. O aumento na escala de tratamento pode induzir um aumento na produção de lamas como consequência lógica do incremento na quantidade de água residual a tratar.

3.3.1. INSAAR

Em Portugal, e no ano de 2002, o Instituto da Água (INAG) promoveu o Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais (INSAAR), que teve como objectivo centralizar a informação relativa ao ciclo urbano da água numa base de dados informática. Esta base de dados, preenchida e actualizada *on-line*, com uma periodicidade anual, pelas Entidades Gestoras (EG) dos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais, com a elaboração final de um relatório sobre o estado do sector em análise. É recolhido um conjunto considerável de indicadores físicos, de funcionamento e económico-financeiros, incluindo valores de produção de lamas. Os resultados obtidos das edições em 2002, 2005, 2006 e 2007, estão contidos na Tabela 3 (INAG, 2002-2007).

Tabela 3 - Lama produzida em Portugal, segundo os dados recolhidos pelo INSAAR.

Ano	Lama produzida (ton)
2002	299 000
2005	nd
2006	80 860
2007	197 000
nd- não disponível	

Os números apresentados são bastante incongruentes e ilógicos, reflectindo a precariedade dos dados de base. A falta de abrangência e muitas vezes de rigor nos estudos sobre esta temática pode ser exemplificada pela situação seguidamente descrita no relatório do INSAAR 2005. Em 2006 e em Portugal Continental, foram identificadas 605 EG de ETAR, tendo sido contactadas 319 para a participação no INSAAR 2005. A pequena dimensão e a situação pouco clara quanto à competência legal para a prestação dos serviços justificaram a não consideração das restantes EG nessa campanha. Das 236 (74%) que responderam aos inquéritos, apenas 9 o fizeram na totalidade. O facto de a resposta aos inquéritos não ser obrigatória contribuiu para uma falta de dados que não permite obter uma perspectiva real da situação da produção de lamas em Portugal. No entanto, a responsabilidade das Entidades Gestoras é significativa nesta área, dada a pouca receptividade e empenho dos dirigentes máximos de algumas entidades no fornecimento dos dados, a carência de equipamentos que permitem o preenchimento *on-line* dos dados e a sobrecarga e a acumulação de funções dos técnicos encarregados do preenchimento dos inquéritos (INAG, 2005)

Apesar de o programa apresentado anteriormente estar numa fase pouco desenvolvida e ainda não fornecer dados suficientemente rigorosos, está lançada a base do que poderá ser no futuro uma fonte de informação bastante credível. Para isto é necessário que as EG colaborem activamente na cedência de informação solicitada e o façam em tempo útil.

3.3.2. RASARP

O Instituto Regulador de Águas e Resíduos produz anualmente um relatório sobre o sector (Relatório Anual do Sector de Águas e Resíduos em Portugal), elabora uma caracterização geral, económica e financeira, e avalia o serviço prestado aos utilizadores bem como a qualidade da água para consumo humano. Entre os diversos indicadores desenvolvidos, um deles refere-se ao destino final dado às lamas de ETAR no qual avalia se lhes é dado ou não um destino adequado (IRAR, 2008).

Pressupõe-se que a execução dessa avaliação indique que o IRAR esteja na posse de dados relativos à produção e gestão das lamas, no entanto esta informação não nos foi cedida.

Outros autores indicam que Portugal produziu 250 000 toneladas em 1998 tendo previsto cerca de 350 000 toneladas de matéria seca para o ano de 2005 (Gonçalves, 2005), enquanto o estado Português enviou à União Europeia uma estimativa de produção de 177 000 toneladas para o período entre 1999-2001, Anexo B, Tabela 55. No âmbito dos relatórios da Comissão Europeia relativa à aplicação da legislação sobre valorização agrícola de lamas, estimou-se que para os anos do período 1995-2000 Portugal tenha produzido a quantidade de lamas expressa na Tabela 4 (CE, 2003).

Tabela 4 - Produção de lamas em Portugal.

Ano	Quantidade produzida (ton)
1995	148 555
1996	177 100
1997	214 200
1998	121 138
1999	374 147
2000	238 680

Todos estes valores estão expressos apenas para que se observe a panóplia de números que são apresentados a respeito desta matéria, e pela necessidade de uma recolha efectiva de dados junto das entidades gestoras de lamas.

3.4. Gestão das lamas

A gestão das lamas é fundamental na protecção ambiental e da saúde humana. Quando deficientemente geridas, as lamas podem degradar directamente a qualidade dos recursos naturais, principalmente dos solos e dos recursos hídricos. A lixiviação de nutrientes, azoto e fósforo, a presença de metais pesados, de poluentes orgânicos e microrganismos patogénicos são aspectos ambientais negativos que há que controlar. Contudo, o alto conteúdo em matéria orgânica que as lamas possuem, constitui-a como um recurso com um potencial agronómico ou energético que não deve ser desaproveitado.

A gestão ambientalmente segura de resíduos, e por isso também das lamas, deve seguir os princípios da política europeia de resíduos (CE, 2008):

- *Prevenção* – a produção de resíduos deve ser minimizada na fonte sempre que possível;
- *Responsabilidade do produtor* na gestão dos resíduos, devendo ainda suportar os custos decorrentes dessa gestão – *princípio do poluidor-pagador*;
- *Precaução* – os potenciais riscos decorrentes de determinada acção devem ser antecipados de forma a não provocarem um impacte ambiental negativo;
- *Proximidade* – os resíduos devem ser processados o mais próximo possível do local de geração.

Tendo presentes os princípios da política de gestão de resíduos, o destino final das lamas deverá ainda estar condicionado pela hierarquia de gestão de resíduos, que estabelece as seguintes prioridades:

- *Prevenção e redução* da produção de resíduos;
- Preparação para a *reutilização*, reciclagem e valorização energética, devendo ser dada prioridade à reutilização e à reciclagem material, em detrimento da recuperação energética;
- A *eliminação* deverá ser a última opção de gestão, e apenas quando não seja possível aplicar as alternativas apresentadas anteriormente, nomeadamente através da deposição em aterro ou da incineração sem valorização energética.

Estas preferências de gestão são consideradas no PEAASAR II (MAOTDR, 2007), no qual se indica que se devem privilegiar as soluções que visem:

- A redução da produção de lamas através de tecnologias que minimizem os subprodutos gerados no processo;
- A redução do volume das lamas através de tecnologias de desidratação, secagem ou compressão;
- A reutilização das lamas, devidamente inertizadas e compostas;
- A valorização das lamas através da produção de biogás;
- A deposição de lamas em aterro quando as suas características não permitam a reutilização

Na Figura 3 estão esquematizadas as principais opções para a gestão das lamas.

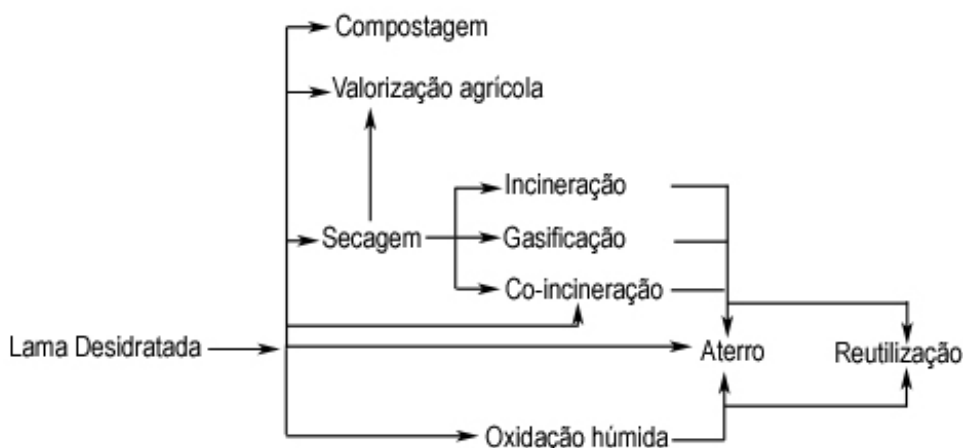


Figura 3 - Gestão de lamas, vias alternativas.

Das opções apresentadas na Figura 3, o destino final mais comum inclui a valorização agrícola, a deposição em aterro e a incineração.

A Figura 4 representa o destino final dado às lamas de ETAR nos países da UE-15 e em Portugal (Anexo B Tabela 53). O período considerado é entre 1999 e 2001 uma vez que nem todos os países disponibilizaram dados relativos ao mesmo período (CE, 2004)

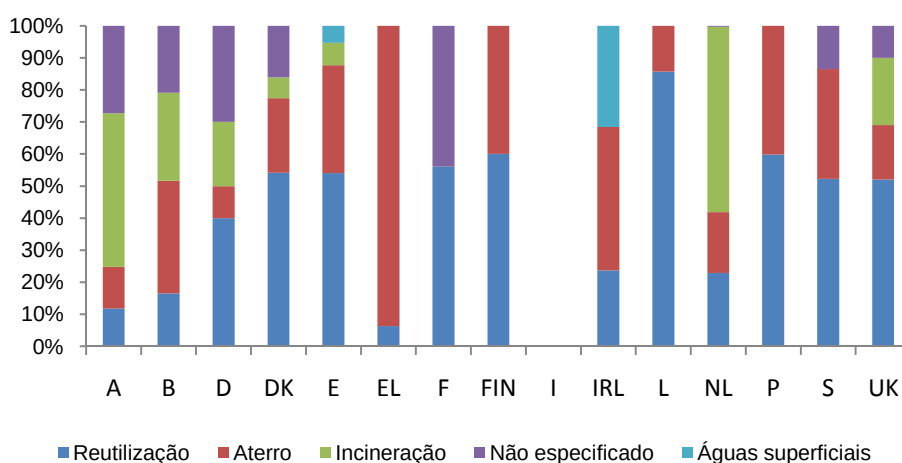


Figura 4 - Destino final das lamas de ETAR na UE-15 entre 1999-2001.

Os dados permitem afirmar que para o período em estudo, a opção preferencial a nível de gestão de lamas na UE era a reutilização seguida da deposição em aterro. No entanto, uma vez que para cerca de 20% da massa de lamas produzida não se especificou o destino final, não é praticável uma análise da situação real a nível comunitário. Na Grécia a reutilização era uma opção praticamente não utilizada em contraponto com a deposição em aterro, enquanto na Holanda e na Áustria a opção principal recaía sobre a incineração. A Irlanda ainda apresentava como destino final a descarga em águas superficiais, no entanto essa prática está proibida no espaço comunitário desde 1998. Portugal estimava a sua produção de lamas nas 300 000 toneladas com cerca de 60% das lamas a serem enviadas para valorização agrícola e 40% para aterro.

3.4.1. Reutilização - Valorização agrícola

O propósito da utilização directa das lamas na agricultura é aproveitar o elevado teor de matéria orgânica e de nutrientes, como azoto e fósforo, para aumentar a produtividade dos solos, sendo frequentemente uma opção de baixo custo. A quantidade anual a introduzir no solo está contudo limitada pela legislação nacional de cada país. Os requisitos comuns à legislação dos países comunitários incluem:

- A necessidade de realizar um pré-tratamento com vista à redução da humidade, substâncias orgânicas poluentes e dos microrganismos patogénicos;
- Limitações à quantidade máxima de massa seca a introduzir, por unidade de área e de tempo, considerando a quantidade de metais pesados contida na lama, a existente no solo, e o pH do solo;
- Limitações no tipo de cultura que pode ser plantada.

As desvantagens desta opção relacionam-se com a dependência do estabelecimento de acordos com os proprietários de zonas agrícolas que estejam dispostos a receber as lamas, o reduzido número de vezes por ano em que as lamas podem ser aplicadas nos solos e a consequente necessidade de armazenamento.

3.4.2. Compostagem

A compostagem das lamas de ETAR não aparece discriminada nas estatísticas apresentadas na Figura 4. É contudo uma prática disseminada pela Europa e bastante utilizada nos Estados Unidos (EUA). A Tabela 5 apresenta alguns casos de utilização da compostagem de lamas nos EUA e na Europa. Em Portugal, é utilizada unicamente na gestão das lamas produzidas na ETAR de Parada-Maia. Geralmente, as instalações que realizam compostagem de resíduos sólidos urbanos são também aquelas onde se efectua compostagem de lamas (ECN, 2009), o que torna difícil nomear unidades dedicadas exclusivamente ao tratamento de lamas.

Neste trabalho, o processo de compostagem está apresentado e caracterizado no capítulo 4.

A vantagem da aplicação desta alternativa relaciona-se com a redução do volume de material a ser transportado, com as facilidades no armazenamento e utilização em locais e períodos de tempo mais distantes em relação à altura de produção, sendo a aplicação no terreno facilitada pelo menor conteúdo em água. Realiza-se um controlo mais rigoroso da qualidade do produto, devido a uma selecção criteriosa dos materiais a co-compostar e do acompanhamento da evolução do processo, obtendo assim um produto estabilizado, higienizado e com um conteúdo húmico muito vantajoso para o solo.

As desvantagens, comparativamente à aplicação directa das lamas no solo, relacionam-se com os custos superiores de tratamento, e com a necessidade de escoar um produto num mercado bastante competitivo, onde os competidores directos terão tendência a aumentar e os produtos substitutivos já estão integrados no mercado.

Tabela 5 - Unidades de compostagem de lamas de ETAR na Europa e nos Estados Unidos.

País	Localidade	Tipo de processo	Capacidade de tratamento	Referência
Espanha	Múrcia	Em reator - canal	140 000 ton lama/ano	(PRLINE, 2003)
Espanha	Madrid – Villa nueva de la Cañada	Em reator - túnel	nd.	(RCIR, 2009)
Espanha	Jerez de la Frontera	Pilhas revolvidas	20 000 ton lama/ano	(ADJ, 2005)
Espanha	Valladolid	Em reator - túnel	80 000 ton lama/ano	(Bicoe, 2009)
Espanha	Sa Pobla (Mallorca)	Em reator - canal	8 000 ton lama/ano	(ISR, 2008)
Espanha	Felanitx (Mallorca)	Em reator - canal	19 000 ton lama/ano	(ISR, 2008)
França	Mont De Marsan	Em reator - canal	16 000 ton lama/ano	(Siemens, IPS Composting System: Mont De Marsan, France, 2004)
Irlanda	Cork County	Em reator	10 000 ton lama/ano	(EPA, 2005)
Irlanda	South Tipp.	Em reator	5 000 ton lama/ano	(EPA, 2005)
Irlanda	Meath	Pilhas revolvidas	10 000 ton lama/ano	(EPA, 2005)
USA	Neches, Texas	Pilhas revolvidas	1 400 ton lama/ano	(ANRA, 2003)
USA	New England, Maine	Em reator - Túnel	111 000 m ³ lama/ano	(NEO, 2009)
USA	Ardmore, Oklahoma	Em reator - canal	37 000 m ³ lama/ano	(Siemens, 2006)
USA	Bennington, Vermont	Em reator - canal	17 000 m ³ lama/ano	(Siemens, 1992)

3.4.3. Incineração

A incineração de lamas é uma das opções de gestão praticada a nível europeu. Pode ser realizada em instalações dedicadas ou em co-incineração. Se sujeitas a uma pré-secagem podem ser introduzidas em fornos de cimento, contribuindo com o seu poder calorífico² para o aquecimento do forno, opção esta que permite incorporar os metais pesados no *clinker*. Esta é uma opção viável quando não é possível realizar uma valorização material das lamas, principalmente se for realizada

² Lamas com 65% sólidos possuem um poder calorífico = 2000 kcal/kg de lama (ISWA, 2001)

em regime de co-incineração, já que o investimento numa central dedicada implicaria um investimento avultado e um caudal elevado e constante de lamas a serem transportadas até à unidade.

3.4.4. Deposição em aterro

A deposição indiscriminada de lamas é uma prática absurda, tendo em conta o não aproveitamento do conteúdo material e energético contido nas lamas. Ocupa desnecessariamente espaço em aterro e é uma opção que envolve custos que não podem ser desprezados. Apesar destes pontos negativos, as estatísticas mostram que esta é umas das opções mais utilizadas pelas entidades gestoras. As limitações legislativas à deposição de matérias biodegradáveis em aterro contribuirão decisivamente para inverter esta realidade.

3.4.5. Novas tecnologias

Algumas opções têm vindo a ser testadas e aplicadas e podem, no futuro, ter importância, nomeadamente a gaseificação³ (ISQ, 2008), a oxidação húmida (Khan, 1997) e a vermicompostagem (Foster, 2006).

Existem ainda outros destinos para lamas, que foram pontualmente utilizados, nomeadamente na recuperação de taludes (Robles, 2006) ou no encerramento de pedreiras (Eltiempo.com, 2008).

³ Processo de conversão térmica para produzir um gás combustível ou de síntese para posterior utilização.

4. Estado da Arte

A compostagem é um processo biológico e aeróbio de decomposição controlada da matéria orgânica, originando uma matéria húmica e estável, o composto. O material a compostar é acumulado em pilhas, desenvolvendo-se um processo idêntico à decomposição natural, excepto na intensidade e na aceleração que se obtém através da optimização das condições de desenvolvimento dos microrganismos.

4.1. Processo de compostagem

No processo de compostagem podem-se distinguir 2 períodos principais, um primeiro, de degradação activa e um segundo de maturação. O primeiro período, que inclui uma fase mésofila e uma fase termófila, é caracterizado por uma intensa actividade microbiana durante a qual uma fracção importante da matéria orgânica é degradada. No segundo período, regista-se um decréscimo da actividade microbiológica, estando ainda em degradação alguns produtos provenientes do período de degradação activa. Assim, o controlo da temperatura será um factor determinante ao longo do processo, favorecendo ou inibindo a actuação dos diferentes tipos de microrganismos.

Geralmente, distinguem-se 3 gamas de temperatura: psicrófila (0-25 °C), mesófila (25-45 °C) e termófila (>45 °C) (Epstein, 1997). A definição destas gamas está relacionada com picos de crescimento que uma classe de microrganismos tem para essa temperatura. No entanto, isso não implica que outros microrganismos não estejam presentes na pilha e não tenham actividade, simplesmente não são os dominantes.

A Figura 5 apresenta as diferentes fases do processo de compostagem e respectiva evolução da temperatura.

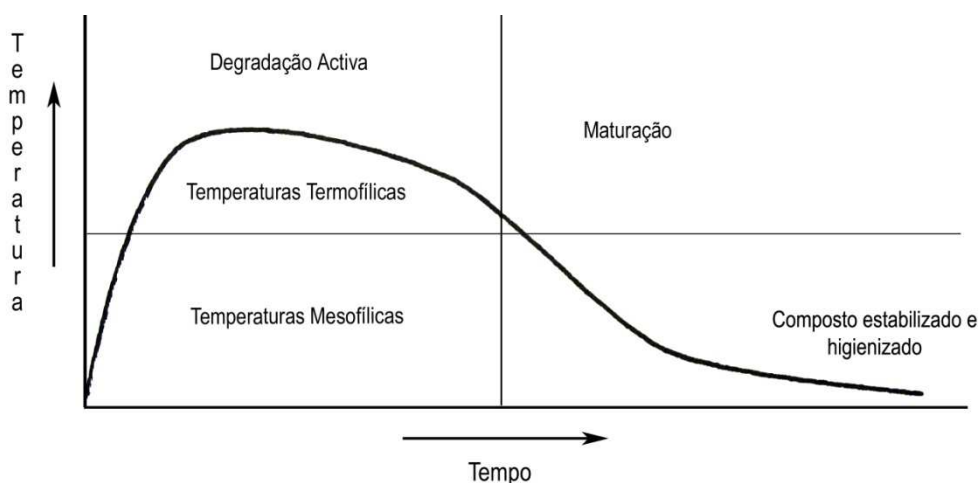


Figura 5 - Fases do processo de compostagem em função da temperatura da pilha, adaptado de (Epstein, 1997).

No início do processo registam-se temperaturas psicrófilas ou mesofílicas, dependendo da temperatura ambiente e da temperatura da mistura. Ocorre um período de latência, correspondente à adaptação dos microrganismos ao meio, degradando-se primeiramente as fontes de carbono mais acessíveis, depois do qual a temperatura começa a aumentar rapidamente, devido à intensa

libertação da energia resultante da degradação da matéria orgânica por organismos que realizam respiração aeróbia, como representado genericamente na Figura 6.

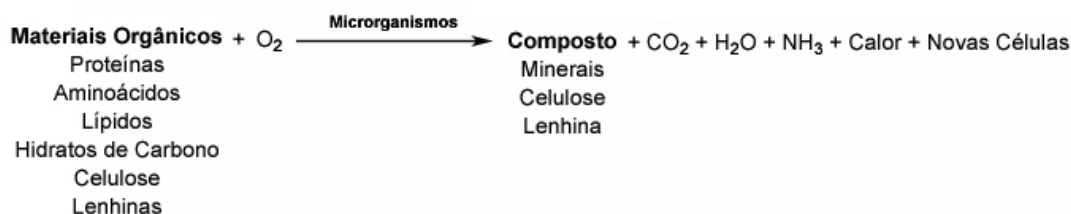


Figura 6 - Expressão da degradação biológica da matéria orgânica.

À medida que a temperatura vai aumentando, ao atingir a fase termófila, uma grande diversidade de microrganismos atinge o seu pico de crescimento e eficiência. A diversidade na população de microrganismos contribui para a decomposição de uma grande variedade de materiais, desde mais simples até materiais mais complexos. A temperatura atinge valores próximos dos 65 °C, valor ao qual a actividade microbiana decai, como resposta também à diminuição da quantidade de matéria orgânica facilmente degradável e à depleção do oxigénio. Nesta fase, a pilha tende a arrefecer dando novamente espaço à actividade dos microrganismos termófilos e mesófilos. É importante que se realize um controlo efectivo da temperatura da pilha, uma vez que, se por um lado, as altas temperaturas permitem a eliminação de microrganismos patogénicos e de sementes, por outro, existem microrganismos que vão ser importantes nas etapas seguintes e que não devem ser eliminados.

A exaustão de material facilmente biodegradável reduz a actividade microbiana e consequentemente a temperatura. A fase de degradação contínua do material orgânico mais resistente, ou seja a maturação, implica uma actividade microbiológica mais lenta e uma temperatura mais baixa, que são fundamentais para produção de composto estabilizado.

Curtas etapas de compostagem activa necessitam de períodos mais longos de maturação, sendo, por isso, necessário assegurar a manutenção das condições de humidade e arejamento da pilha, e ainda aconselhável a realocização ou o cobrimento da pilha para evitar contaminações.

4.2. Estabilização do composto

Existem diversos critérios que permitem aferir a maturidade do produto e considerar terminado o período de maturação do processo de compostagem, uma vez que a aplicação de um composto não estável teria efeitos fitotóxicos, destacando-se:

- O declínio da temperatura no final do processo de maturação, uma vez que a libertação de calor é função da taxa de oxidação dos compostos orgânicos;
- Potencial de reaquecimento da pilha;
- O decréscimo do conteúdo orgânico do composto, nomeadamente por avaliação dos conteúdos em carbono, sólidos voláteis, cinzas e rácio C/N;
- A presença de constituintes químicos como os nitratos e a ausência de amónia;
- Ausência de odores agressivos;

- Testes de fitotoxicidade e de sementeiras.

4.3. Transformações microbiológicas no processo

O processo de compostagem é desenvolvido por diferentes tipos de microrganismos, predominantemente aeróbios, que decompõem a matéria orgânica obtendo por esta via o material e a energia necessárias à síntese celular e ao crescimento. Podem distinguir-se três classes: bactérias, fungos e actinomicetas, que são capazes de metabolizar substâncias mais simples, aminoácidos e açúcares, ou degradar compostos mais complexos como proteínas e hidratos de carbono em monómeros (Silva M. E., 2003):

- Proteínas → péptidos → aminoácidos → compostos aminados → compostos azotados da biomassa → azoto atmosférico ou amoníaco.
- Hidratos de carbonos → açúcares simples → ácidos orgânicos → CO₂ e compostos de carbono da biomassa.

Os compostos orgânicos facilmente biodegradáveis nos estágios iniciais da compostagem são caracterizados por uma estrutura molecular simples, baixo peso molecular, sendo solúveis em água, o que permite que sejam metabolizados por organismos mais simples e não especializados, como são as bactérias. À medida que a quantidade destes compostos diminui, incrementa-se a degradação de outros mais complexos, de maior peso molecular e constituído por cadeias químicas mais longas. Isto só é passível de ser realizado por intermédio de organismos mais especializados capazes de produzir enzimas, nomeadamente os fungos, permitindo assim a utilização dos componentes hidrolisados, por microrganismos mais simples.

4.4. Factores condicionantes do processo de compostagem

- Razão C/N
- Arejamento e temperatura
- Humidade
- pH
- Granulometria
- Inóculo

4.4.1. Razão C/N

Os microrganismos necessitam de uma variedade de nutrientes em grande quantidade, nomeadamente carbono, azoto, fósforo e potássio. O carbono é utilizado como fonte de energia e no crescimento dos microrganismos, diminuindo progressivamente a sua quantidade ao longo do desenvolvimento do processo. O azoto é utilizado para a síntese de material celular, aminoácidos e proteínas. Estes dois nutrientes são aqueles que exercem maior influência no processo, sendo a sua avaliação e controlo um elemento fundamental para o sistema.

Para $C/N = 20$, o azoto não limita a velocidade do processo, mas acima de $C/N = 80$, a degradação termófila é impedida pela deficiência em azoto, operando por isso a maior parte dos sistemas entre esses limites (Pereira, UA). Para relações C/N reduzidas o azoto ficará em excesso e poderá ser perdido como amoníaco causando odores desagradáveis. Para relações C/N mais elevadas a falta de azoto irá limitar o crescimento microbiano e o carbono não será todo degradado implicando que a temperatura não aumente e a que a compostagem se processe mais lentamente.

A razão óptima será função do tipo de materiais. Para a maioria dos materiais uma relação de $25 < C/N < 30$ será a indicada, sendo que para materiais de cariz celulósico, onde a disponibilidade de carbono rapidamente metabolizável é menor, se recomenda uma relação de $35 < C/N < 40$ (Haug, 1993).

4.4.2. Arejamento e temperatura

Para que os organismos que realizam respiração sobrevivam, é necessário que exista quantidade suficiente de oxigénio molecular no interior da pilha, sendo a concentração mínima requerida de 10%, ainda que os microrganismos tolerem concentração até 5% (Baca, 1996). A quantidade de ar fornecido à pilha não implica necessariamente que este esteja disponível para os microrganismos. Para que isso aconteça é necessário que exista no meio uma porosidade e uma humidade adequada, permitindo uma eficiente difusão do ar.

O arejamento contribui ainda para a remoção de calor e o vapor de água formado na oxidação microbológica, que por sua vez regula a velocidade das reacções e a eliminação dos agentes patogénicos, sendo necessário aumentar o caudal de ar para que a temperatura não ultrapassa a gama 45-65 °C (Pereira, UA) ou diminui-lo quando o efeito pretendido é o contrário. Consequentemente as necessidades de arejamento serão superiores na fase de degradação activa quando comparadas com a fase de maturação.

4.4.3. Humidade

A humidade é outro parâmetro fundamental para o bom funcionamento do sistema de compostagem, uma vez que os microrganismos necessitam de um ambiente aquoso para se movimentarem e para o transporte de nutrientes, sendo também o meio onde vivem e onde ocorrem as principais reacções químicas. No entanto, a saturação da pilha com água conduziria ao desenvolvimento de condições anaeróbias. O controlo da humidade da pilha será função de compromisso entre a necessidade de água para que ocorram as reacções e a necessidade de ar para que estas se desenvolvam aerobiamente. Os valores indicados de humidade situam-se na gama 40-65%, sendo o limite função da porosidade dos materiais a compostar (Graves R., 2000) (Epstein, 1997) (Haug, 1993).

A evaporação da água que se verifica ao longo do processo pode ser compensada por rega evitando o sobreaquecimento da mistura.

4.4.4. pH

O pH do material a compostar não tem um impacto significativo no processo de compostagem, porque os diversos microrganismos prosperam em condições de pH diferentes. A gama ideal de pH pode no entanto ser definida por um valor entre os 6,5 e 8,0 (Epstein, 1997). Na maioria das situações não há necessidade de controlar o pH uma vez que existe uma regulação natural intrínseca à capacidade tampão da pilha de compostagem.

Pode no entanto ser necessário realizar correcções quando, no período inicial se formem condições ácidas que promovam um tempo de latência demasiado prolongado, ou nos casos em que o pH ultrapassa os 8,5 uma vez que promove a conversão dos compostos azotados em amónia, o que torna ainda mais alcalino o meio, provocando a perda de azoto da mistura por volatilização da amónia (expressão 1).



4.4.5. Granulometria

O tamanho do material deve estar compreendido numa gama de 2 a 7 cm (Pereira, UA). Um tamanho reduzido das partículas permite aumentar a área específica das partículas, aumentando a área de contacto com os microrganismos, o que favorece a velocidade de degradação da matéria. Um tamanho correcto do material a compostar permite criar condições estruturais e de porosidade adequadas a uma boa difusão de ar, de água, facilitando a mistura e evitando a possível compactação e diminuição do espaço intersticial.

4.4.6. Inóculo

Para acelerar o processo, diminuindo o período de latência, pode ser adicionada na nova mistura a compostar uma quantidade entre 1-5% (Pereira, UA) de matéria num estado mais avançado de decomposição, introduzindo assim uma população de microrganismos já adaptados às condições da pilha.

Não existem, contudo, dados consistentes que permitam concluir sobre a influência positiva da realização de inoculações. Convém destacar a importância da preparação de uma mistura de materiais com um conteúdo C/N, humidade, tamanho de partículas e regulação de temperaturas óptimos, de forma a otimizar o processo.

4.4.7. Resumo dos parâmetros a controlar no processo de compostagem

Na Tabela 6 estão resumidas as condições que devem ser mantidas durante o processo de compostagem.

Tabela 6 - Controlo dos parâmetros operacionais no processo de compostagem.

Parâmetro	Gama
Razão C/N	25 - 30
Temperatura (°C)	45 - 65
Humidade (%)	40 - 65
pH	6,5 - 8,0
Granulometria (cm)	2,0 – 7,0
Inóculo (%)	1 - 5

4.5. Cálculo das necessidades de arejamento

A quantidade de ar que é necessário fornecer à pilha para suprir as necessidades de oxigénio molecular, indispensável à degradação microbiológica da matéria orgânica (exigência estequiométrica), é significativamente inferior à que é necessária para a remoção de humidade e do calor libertado durante a degradação microbiológica. Assim, se forem satisfeitos estes requisitos, também será a exigência estequiométrica.

O fornecimento de ar à pilha é geralmente estimado pela quantidade de ar requerido para a remoção de calor, particularmente se a remoção de humidade não for fundamental para a operação. Esta estimativa está condicionada e dificultada pelo facto de não ocorrer uma decomposição total da matéria orgânica, pelas variações nas taxas de oxidação e pela heterogeneidade da mistura.

De referir que o calor produzido é resultado da oxidação microbiológica da fracção biodegradável da matéria orgânica (*bvs*). Estudos desenvolvidos por (Chandler, 1980) e apresentados por (Haug, 1993) indicam uma forte correlação entre o conteúdo em lenhina da matéria orgânica e a biodegradabilidade de um substrato (expressão 2).

$$bvs = 0,830 - (0,028 \cdot X) \quad [2]$$

Onde, *bvs* = fracção biodegradável dos sólidos voláteis (matéria orgânica)

X = conteúdo em lenhina, % dos sólidos voláteis.

Esta correlação foi obtida por meio de experiências de digestão anaeróbia de diversos substratos. Ainda que seja razoável a aplicação da expressão para as condições aeróbias da compostagem, necessita, todavia, de ser devidamente testada (Haug, 1993).

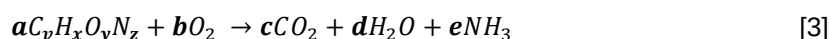
Metodologia de Cálculo

A nomenclatura utilizada ao longo dos cálculos está apresenta na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados no cálculo do arejamento.

Símbolo	Significado	Unidades
m_m	Massa da mistura	kg
ts	Fracção sólida da mistura	-
vs	Fracção volátil dos sólidos secos	-
bvs	Fracção biodegradável dos sólidos voláteis	-
X_i	Massa de O_2 por massa de bvs do material i a compostar	kg/kg
X	Massa de O_2 por massa de bvs da mistura	kg/kg
Y	Massa de ar por massa de mistura	kg/kg
q_{mm}	Calor libertado por massa de mistura	kcal/kg
q_v	Calor necessário para vaporizar a água	kcal
q_{va}	Calor necessário para aquecer o vapor de água até à temperatura de saída	kcal
q_a	Calor necessário para aquecer o ar até à temperatura de saída	kcal
m_{as}	Massa de ar seco	kg
h_v	Entalpia de vaporização da água	kcal/kg
h_{va}	Calor específico do vapor de água	kcal/kg °C
h_a	Calor específico do ar	kcal/kg °C
T_s	Temperatura de saída	°C
T_e	Temperatura de entrada	°C
w_s	Humidade específica do ar de saída	kg água/kg ar seco
w_e	Humidade específica do ar introduzido	kg água/kg ar seco

1. Para determinar a quantidade de calor que será libertado, é necessário estimar, em primeiro lugar, as exigências estequiométricas de oxigénio para todos os materiais a biodegradar (expressão 3) (Haug, 1993).



2. Depois de acertar as equações, determina-se (X_i), a massa de O_2 a fornecer por massa de bvs de cada material.

O oxigénio requerido para a nitrificação é desprezável uma vez que é bastante inferior aquele necessário à oxidação da matéria orgânica. Na Tabela 8 estão apresentadas as fórmulas químicas genéricas de alguns resíduos.

Tabela 8 - Composição química geral de diversos materiais orgânicos (Haug, 1993).

Componente dos resíduos	Composição química típica
Hidratos de carbono	$(C_6H_{10}O_5)_x$
Proteínas	$C_{16}H_{24}O_5N_4$
Gorduras	$C_{50}H_{90}O_6$
Lamas Primárias	$C_{22}H_{39}O_{10}N$
Lamas Mistas	$C_{10}H_{19}O_3N$
Madeira	$C_{294}H_{420}O_{186}N$

3. O calor libertado é função da massa de O_2 oxigénio fornecida à mistura (3260 kcal/kg O_2) (Haug, 1993). Assim, o calor por massa de mistura libertado pela degradação microbológica da matéria orgânica (qmm), é calculado através da expressão 4.

$$qmm = \sum (Xi \cdot 3260 \cdot ts \cdot vs \cdot bvs) \quad [4]$$

4. Termodinamicamente, o calor gerado aquece o ar seco e o vapor de água introduzido na pilha fornece a entalpia de vaporização da água e aquece o vapor de água formado até à temperatura de saída do gás.

Assim, o calor necessário para vaporizar a água, aquecer o vapor de água e o ar até à temperatura de saída é calculado respectivamente pelas expressões 5, 6 e 7.

$$q_v = m_{as} \cdot (ws - we) \cdot hv \quad [5]$$

com $hv = 585,8$ kcal/ kg água.

$$q_{va} = m_{as} \cdot ws \cdot h_{va} \cdot (Ts - Te) \quad [6]$$

com $h_{va} = 0,44$ kcal/kg $^{\circ}C$.

$$q_a = m_{as} \cdot h_a \cdot (Ts - Te) \quad [7]$$

com $h_a = 0,24$ kcal/kg $^{\circ}C$.

As expressões 5 e 6 implicam o cálculo da humidade específica do ar, à temperatura a que entra (we) e sai (ws) do sistema, sendo definida como a massa de água transportada por massa unitária de ar seco.

Determinação de w :

- a. A pressão de saturação do vapor de água ($Psat$) é função da temperatura e pode ser calculada segundo a equação de Antoine simplificada (expressão 8).

$$\log_{10} Psat = \frac{a}{T} + b \quad [8]$$

com $Psat$ = pressão de saturação do vapor de água à temperatura T , mm Hg
 a = constante igual a - 2238 para a água

b = constante igual a 8,896 para a água

T = temperatura absoluta, °K

b. A pressão de vapor (P_v) à temperatura (T) será função da humidade relativa (Φ) (expressão 9).

$$P_v = \Phi \cdot P_{sat} \quad [9]$$

com P_v = mm Hg

Φ = humidade relativa (relação entre a quantidade de vapor de água que o ar contém e a quantidade máxima que teria à pressão de saturação)

c. A humidade específica é então calculada considerando a pressão de vapor e a pressão atmosférica (P_{atm}) (expressão 10).

$$w = \frac{18,015}{28,96} \cdot \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad [10]$$

com w = kg água/kg ar seco

P_{atm} = mm Hg

5. No estado de equilíbrio, o calor libertado pela oxidação microbiológica iguala os requisitos de calor descritos no ponto 4. Assim,

$$Y \cdot \left(\frac{q_v}{m_{as}} + \frac{q_{va}}{m_{as}} + \frac{q_a}{m_{as}} \right) = q_{mm} \quad [11]$$

6. Resolvendo a equação em ordem a (Y) obtém-se por fim o valor da massa de ar a introduzir na pilha de compostagem por massa de mistura a biodegradar.

O valor estimado das necessidades de arejamento representa a quantidade total de ar que é necessário fornecer ao longo do ciclo de compostagem. Num sistema contínuo, como é o caso do sistema em canal, a obtenção do valor da taxa de arejamento pode ser aproximado, considerando um volume unitário e diário de mistura que entra na pilha. Assim, a quantidade de ar necessário para oxidar essa massa de mistura representa o caudal diário a introduzir na pilha.

4.6. Produção de odores

A produção de odores numa unidade de compostagem é inevitável uma vez que a maioria dos substratos orgânicos utilizados na compostagem possuem odores característicos. Estes podem ser minimizados mas nunca totalmente eliminados.

Pilhas demasiado largas e húmidas, com uma porosidade reduzida ou com taxas de degradação biológicas muito elevadas contribuem para uma disponibilidade reduzida de oxigénio molecular no meio, reduzindo a actividade das bactérias aeróbias. Estas serão substituídas por bactérias anaeróbias, cujo metabolismo é responsável pela libertação de odores, nomeadamente pela

decomposição anaeróbia de proteínas originando aminas, e de outros compostos contendo enxofre, libertando gás sulfídrico (H_2S). A hidrólise de ácidos gordos constituintes de óleos e gorduras contribui para a formação de ácidos voláteis como o ácido acético ou propiónico. A produção de amoníaco (NH_3) decorre da decomposição de compostos azotados tanto em condições aeróbias como anaeróbias e ocorre em misturas em que a relação C/N é baixa, existindo um excesso de azoto, que ao não ser consumido pelos microrganismos, é facilmente vaporizado (Haug, 1993).

Um arejamento correcto das misturas em compostagem, que permita manter as condições de aerobiose, é fundamental, na medida em que estando estabelecidas essas condições, as bactérias consumirão esses compostos responsáveis pelos odores. Este é um dos princípios base utilizado nos biofiltros utilizados em instalações que recolhem e tratam os gases libertados durante a compostagem.

4.7. Qualidade final do composto

A qualidade do composto está habitualmente associada à presença reduzida de contaminantes, ao conteúdo de nutrientes e de fitonutrientes, ao aspecto e à facilidade de aplicação do produto. Está dependente do material a compostar, da sua proveniência, do tipo e do desenvolvimento do processo de compostagem, sendo por isso necessário realizar um controlo às matérias-primas, ao sistema de compostagem e ao produto final. As propriedades do produto final condicionarão a sua utilização, pelo que as exigências de qualidade estarão ainda dependentes do destino final para o qual for produzido o composto.

Os sistemas mais antigos, principalmente aqueles que compostavam resíduos sólidos urbanos indiferenciados, com a venda de composto de aparência e qualidade inapropriada, contribuíram para desprestigiar este produto. Será por isso importante que se desenvolva uma ferramenta que permita garantir a qualidade do composto, transmitindo segurança e confiança aos potenciais compradores.

A qualidade do produto final é uma questão que ainda se encontra pendente na legislação Europeia e Portuguesa. Alguns países pertencentes à UE já possuem padrões de qualidade para os compostos, apesar de não se verificar uniformidade quer a nível de parâmetros a analisar quer a nível dos limites propostos, nomeadamente na Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Holanda, Itália e Suécia (Queda, 2008).

Em 2001 foi apresentando, a nível europeu, um documento de trabalho sobre esta temática, o "*Biological Treatment – 2nd draft*" no qual são propostas classes para a qualidade do composto e limites de concentração de metais pesados e microrganismos patogénicos (Directorate-General, 2001).

Em Portugal, foi apresentada uma "Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto" onde são igualmente definidas classes para a qualidade de composto, especificações e restrições à sua utilização (Baptista, 2005). A Tabela 9 apresenta a classificação dos compostos em função do valor máximo de metais pesados, inertes e microrganismos patogénicos, para as duas propostas de norma.

Tabela 9 - Proposta de normas técnicas sobre qualidade do composto, classes e valores limite.

Parâmetro	Unidades	Biological Treatment – 2nd draft (2001)*			Proposta de Norma Técnica (2005)**		
		Classe I	Classe II	Resíduo Biodegradável Estabilizado***	Casse I	Classe II	Classe III
Cádmio	mg/kg m.s.	0,7	1,5	5	0,7	1,5	5
Chumbo	mg/kg m.s.	100	150	500	100	150	500
Cobre	mg/kg m.s.	100	150	600	100	200	600
Crómio	mg/kg m.s.	100	150	600	100	150	600
Mercúrio	mg/kg m.s.	0,5	1	5	0,7	1,5	5
Níquel	mg/kg m.s.	50	75	150	50	100	200
Zinco	mg/kg m.s.	200	400	1500	200	500	1500
Materiais inertes > 2 mm	%	0,5	0,5	3	0,5	1	3
Pedras > 5 mm	%	5	5	-	5	5	-
Salmonella spp.		Ausente em 50 g	Ausente em 50 g	Ausente em 25 g	Ausente em 25 g	Ausente em 25 g	Ausente em 25 g
Clostridium perfringens		Ausente em 1 g	Ausente em 1 g	Ausente em 1 g	-	-	-
Escherichia coli	(NMP/g)	-	-	1000	1000	1000	1000

* Valores normalizados para conteúdo em matéria orgânica igual a 30%.

** Valores normalizados para conteúdo em matéria orgânica igual a 40% para RSU e 50% para lamas de ETAR.

*** Aplicado a resíduos sólidos urbanos compostados de forma indiferenciada.

m.s. – massa seca

Para que esta classificação possa ser validada, os processos de compostagem devem ainda estar condicionados pelos períodos e temperaturas mínimas apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Condições mínimas operatórias para obtenção da classificação do composto.

Processo	Temperatura	Degradação activa	Viragens
Pilhas mecanicamente revolvidas	≥ 55 °C	2 semanas	5
Pilhas mecanicamente revolvidas	≥ 65 °C	1 semana	2
Reactor	≥ 60 °C	1 semana	nd.

4.8. Vantagens de aplicação de composto no solo

O solo tem como função dar suporte às raízes das plantas, sendo que é esse o meio onde ocorrem os principais processos de nutrição das plantas. As suas propriedades condicionarão por isso a saúde e o desenvolvimento das plantas. A componente que melhores propriedades confere ao solo é o húmus, a fracção de matéria orgânica estável. A melhor forma de aumentar o seu conteúdo é adicionando um composto de qualidade.

A aplicação de composto, pelo seu conteúdo elevado em substâncias húmicas, desenvolve as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo:

- Melhora a estrutura e agregação do solo, aumentando a porosidade, a permeabilidade e a ventilação, diminuindo consequentemente a densidade aparente dos solos, contribuindo assim para diversificar e incrementar a actividade microbiana e a capacidade de absorção e retenção de humidade no solo;
- Aumenta a capacidade tampão e de troca catiónica, disponibilizando os nutrientes de forma progressiva, evitando a sua perda por lixiviação.
- A sua coloração escura favorece a absorção e conservação de calor;

Tecnicamente, a fertilização é o enriquecimento dos solos no sentido de nutrir as plantas. Distinguem-se nesta área os adubos, que contêm concentrações elevadas de nutrientes e que por isso fertilizam de forma directa o solo, e os correctivos que tendem a enriquecer o solo pelo seu teor significativo em matéria orgânica, contribuindo indirectamente para o aumento da fertilidade dos solos. Os compostos, pelas suas propriedades químicas, são tradicionalmente classificados e utilizados como correctivos orgânicos.

4.9. Sistemas de compostagem

Na sua forma mais básica, a compostagem não necessita da aplicação da tecnologia, sendo simplesmente o resultado natural da degradação microbiológica da matéria orgânica na presença de oxigénio. A introdução da tecnologia tem como objectivo regular e controlar o processo, com o intuito de produzir compostos finais de melhor qualidade e aumentar a velocidade de reacção, processando assim uma quantidade superior de materiais. Existe uma variedade de sistemas que podem ser aplicados à compostagem. Os mais utilizados incluem:

- Pilhas estáticas;
- Pilhas estáticas alongadas;
- Pilhas revolvidas;
- Pilhas estáticas arejadas;
- Sistemas em reactor.

4.9.1. Pilhas estáticas

Produção de composto numa pilha, com arejamento natural e viragens periódicas, de forma a restabelecer a porosidade da pilha. Uma vez que o arejamento é natural, as dimensões da pilha devem ser suficientemente reduzidas para permitir o movimento passivo do ar, impedindo a formação de zonas anaeróbias. O tipo de arejamento condiciona a duração do processo, implicando um período bastante longo, com a

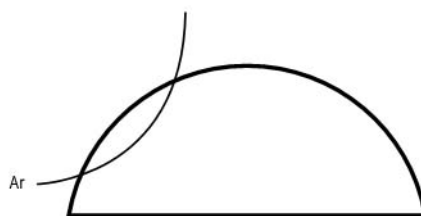


Figura 7 - Pilhas estáticas, adaptado de (Graves R., 2000).

possibilidade de formação de zonas anaeróbias e consequente desenvolvimento de odores. Implica uma reduzida utilização de tecnologia e um labor humano intermédio para a produção de um composto de média qualidade, (Graves R., 2000).

4.9.2. Pilhas estáticas alongadas

O material a ser compostado é preparado e amontoado em pilhas que se mantêm sem revolvimento, sendo sujeitas a arejamento natural por longos períodos de tempo através de tubos enterrados na base da pilha. Cobrir a pilha com uma camada de composto previne a perda de humidade, reduz os problemas de odores e produz um composto uniforme.

É uma opção de baixo custo que requer uma quantidade de terreno superior mas uma menor intervenção humana. Em virtude do não controlo do processo, o composto final apresenta uma qualidade média (Graves R., 2000).

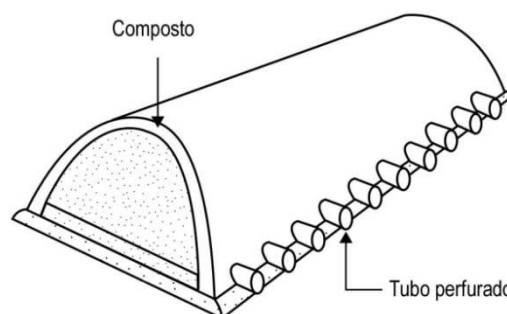


Figura 8 - Pilhas estáticas alongadas, adaptado de (Graves R., 2000).

4.9.3. Pilhas revolvidas

A pilha é sujeita a um revolvimento mecânico frequente, permitindo assim a mistura do material, a manutenção de uma porosidade adequada, um maior arejamento, a libertação de calor e de vapor de água, regulando a temperatura e contribuindo por isso para uma diminuição do período de compostagem. Para se alcançar uma decomposição uniforme da matéria e a eliminação dos agentes patogénicos, o revolvimento deve ser efectuado dos extremos para o centro da pilha, uma vez que aí as temperaturas são superiores.

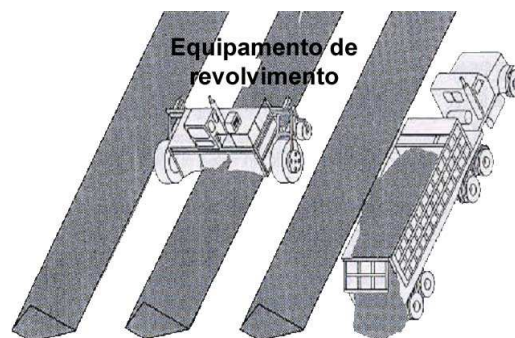


Figura 9 - Pilhas revolvidas, adaptado de (Fernandes & Silva, UEL)

Implica uma reduzida utilização de tecnologia e um labor humano intermédio para a produção de um composto uniforme e de boa qualidade (Ministry of agriculture, 1996B).

4.9.4. Pilhas estáticas arejadas

O sistema é idêntico ao das pilhas estáticas alongadas. A principal diferença está na existência de ventiladores que podem aspirar ou insuflar ar na pilha. Esta está construída acima de uma estrutura de difusão de ar, como tubos de plástico perfurados, cones de arejamento ou por perfurações no pavimento. O material a compostar deve ser colocado sobre uma camada porosa, como composto final ou pedaços de madeira, aplicando-se no final uma camada no topo da pilha que forneça isolamento. Neste tipo de sistema, não existe agitação mecânica da pilha que possa contribuir para o

arrefecimento da pilha, podendo funcionar em regime contínuo ou pontualmente, associados a intervalos de tempo previamente definidos ou às variações de temperatura do composto.

A maior dificuldade que estes sistemas apresentam está relacionada com a não difusão eficiente de ar por toda a pilha e a possibilidade da formação de curto circuitos de ar. Estes causam significativas perdas de humidade nesses canais, originando uma secura excessiva do material e consequente diminuição da actividade microbiana.

A presença de odores indesejáveis pode ser facilmente controlada nestes sistemas, por alterações nos caudais de ar insuflados, espessando a camada isolante superior ou instalando biofiltros. A aplicação de pressões negativas permite drenar o ar contido na pilha, conduzindo-o a um biofiltro antes de ser libertado para a atmosfera. Com a aplicação de pressões positivas, o ar é forçado a sair da pilha, atravessando a camada isolante de composto maturado, purificando assim o gás de saída (Graves R., 2000) (Ministry of agriculture, 1996B).

4.9.5. Sistemas em reactor

Os sistemas em reactor são desenhados para proporcionar condições óptimas de compostagem, envolvendo a mistura mecânica e automática do composto sob condições ambientais controladas, com a possibilidade de arejamento forçado. Os sistemas mais aplicados são do tipo silo vertical, canal, ou tambor rotativo.

O sistema constituído por silos é um método rápido de compostagem que exige uma etapa prolongada de maturação. O material a compostar é carregado no topo do silo e é removido no fundo. O arejamento é forçado e fornecido desde a base, tendo por isso um percurso ascendente e

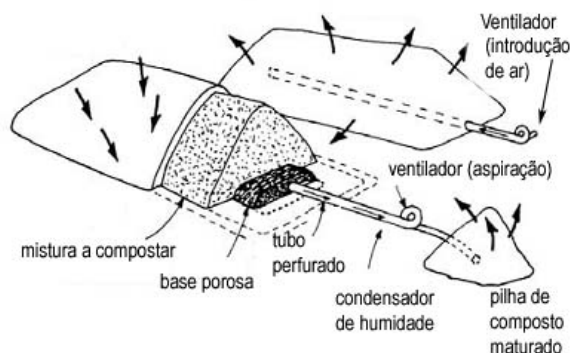


Figura 10 - Pilhas estáticas arejadas, adaptado de (Ministry of agriculture, 1996B)

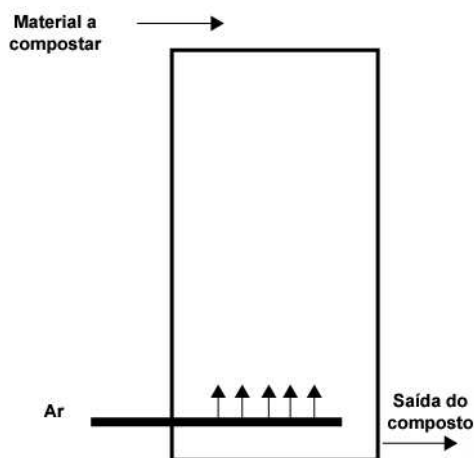


Figura 11 - Silo vertical, adaptado de (Ministry of agriculture, 1996B)

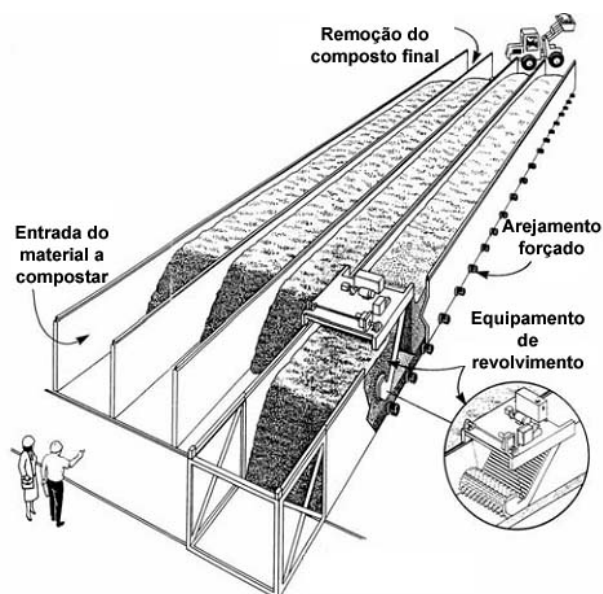


Figura 12 - Sistema em canal, adaptado de (Ministry of agriculture, 1996B)

em contra-corrente com o material. O fluxo de ar de saída pode ser recolhido e direccionado a um sistema de tratamento de odores.

No sistema em canal, constituído por longos e estreitos canais, o material a compostar é virado por um sistema automático apoiado em carris. Pode ser instalado um sistema de difusores na base e nas laterais dos canais para forçar o arejamento,

No sistema de tambor rotativo, o material é introduzido numa das extremidades do tambor, que é inclinado e que ao rodar lentamente desloca o material, por gravidade, para a extremidade oposta, podendo ser insuflado ar em contracorrente.

Estes sistemas envolvem custos de instalação e operação significativos, uma vez que a maioria dos processos é automatizado. Apesar disto, é bastante utilizado, uma vez que permite um maior controlo de odores e um controlo eficaz de todo o processo permitindo a obtenção de um produto final de alta qualidade, reduzidos requisitos de mão-de-obra e uma maior aceitação das populações devido à estética/aparência das instalações de compostagem.

4.10. Comparação dos diferentes sistemas de compostagem

À escala industrial, as pilhas estáticas e pilhas estáticas alongadas, não são frequentemente utilizadas, devido aos longos períodos necessários à compostagem e ao reduzido controlo do processo.

4.10.1. Pilhas revolvidas

4.10.1.6. Vantagens

- Facilmente adaptável a qualquer tipo de exploração;
- Capacidade para processar grandes quantidades de matéria desde que exista uma adequada área de implantação;
- Os frequentes revolvimentos controlam a porosidade e o arejamento das pilhas, contribuindo para uma maior secagem e separação de materiais, aumentando a qualidade do produto final, quando comparado com as pilhas estáticas.

4.10.1.7. Desvantagens

- A produção em terreno aberto torna as pilhas sensíveis às condições atmosféricas, principalmente à precipitação e a temperaturas baixas;
- Necessidade de viragens frequentes, principalmente nas etapas iniciais, de forma a se manterem boas condições de porosidade e de temperatura termofílica, o que exige um grande labor humano e de utilização de equipamentos mecânicos;
- Custos assinaláveis a médio prazo resultantes do uso e desgaste dos equipamentos.

4.10.2. Pilhas estáticas arejadas

4.10.2.8. Vantagens

- Podem ser maiores do que as pilhas revolvidas uma vez que ao contrário destas, o arejamento é forçado;
- Não é necessário espaço para o equipamento de viragem;
- O aumento no arejamento encurta o tempo de duração da compostagem;
- O controlo dos ventiladores, por tempo de funcionamento ou temperatura da pilha, permite menores variações de temperatura e um produto final mais consistente;
- A elevada temperatura aumenta a eliminação de agentes patogénicos;
- Requer um menor investimento de capital quando comparado com as operações do sistema em reator que também utilizam arejamento forçado.

4.10.2.9. Desvantagens

- Quando a mistura é realizada de forma deficiente, no que concerne à porosidade e à estruturação da pilha, podem criar-se “curto-circuitos” de ar que implicarão uma desigual compostagem da pilha e à produção de um composto de menor qualidade;
- Os orifícios dos tubos de arejamento podem entupir-se, impedindo assim o correcto arejamento de toda a pilha. Esta situação é de difícil correcção uma vez que aqueles estão enterrados na base da pilha;
- A instalação, remoção e os danos provocados nos tubos de arejamento durante a formação das pilhas podem constituir um problema;
- Necessidade de investimento para a instalação do sistema de arejamento, nomeadamente dos ventiladores e tubos de condução de ar;
- O arejamento forçado tende a secar a pilha de composto. Quando em excesso, pode impedir a estabilização do composto.

4.10.3. Sistemas em Reator

4.10.3.10. Vantagens

- O facto de o processo se desenvolver no interior de uma estrutura protectora anula os efeitos negativos das condições atmosféricas, incrementando o controlo da qualidade e consistência do produto final, reduzindo ainda o potencial de problemas relacionados com os odores;
- O controlo dos odores pode ser realizado por diluição do ar interior com ar proveniente do exterior ou por aplicação de um sistema de tratamento desses odores;
- Permitem uma gestão eficiente do espaço, possibilitando a preparação de pilhas com uma altura superior quando comparadas com as pilhas revolvidas;
- Requerem menor intervenção humana uma vez que o processo de viragem da pilha é automático.

4.10.3.11. Desvantagens

- Custos elevados de investimento, operação e manutenção associados ao equipamento automático de revolvimento do material;
- As avarias nesse equipamento podem atrasar a compostagem se este não for reparado com brevidade;
- A estabilização do produto final pode não ser tão eficiente tendo em conta o reduzido período de tempo em que se desenvolve a compostagem.
- Sistema com pouca flexibilidade no que diz respeito à localização e ao equipamento utilizado.

4.11. Resumo dos principais sistemas de compostagem

Tabela 11 - Sumário dos principais sistemas de compostagem, adaptado de (Ministry of agriculture, 1996B).

	Pilhas estáticas	Pilhas revolvidas	Pilhas estáticas arejadas	Sistemas em reator
Geral	Reduzida utilização da tecnologia. Problemas de qualidade.	Aplicados em explorações agrícolas.	Indicado para usos municipais ou explorações agrícolas.	Sistemas de grande dimensão para aplicações comerciais.
Mão-de-obra	Reduzido.	Crescente com a frequência de arejamento.	Importante no planeamento e concepção do sistema. Monitorização.	Necessita de níveis de gestão e de produção consistentes para se obter a maior eficiência.
Instalação	Necessita de extensas áreas de implantação.	Necessita de extensas áreas de implantação.	Menor quantidade de área requerida, devido a taxas superiores de compostagem e de volume da pilha.	Áreas limitadas, devido a taxas elevadas de compostagem e a uma operação contínua.
Degradação activa	6 - 24 meses	21 - 40 dias	21 - 40 dias	21 - 35 dias
Maturação	-	>30 dias	>30 dias	>30 dias
Dimensões				
Altura	1 - 4 m	1 - 2,8 m	3 - 4,5 m	Variável
Largura	3 - 7m	3 - 6 m	Variável	Variável
Comprimento	Variável	Variável	Variável	Variável
Sistema de arejamento	Convecção natural.	Revolvimento mecânico e convecção natural.	Arejamento forçado.	Intenso revolvimento mecânico e arejamento forçado.
Controlo do processo	Apenas a mistura inicial.	Mistura inicial e revolvimentos.	Mistura inicial, arejamento e temperatura.	Mistura inicial, arejamento, temperatura e revolvimentos.
Odores	Quanto mais larga a pilha, maior a possibilidade de ocorrência.	As viragens podem libertar odores nas semanas iniciais.	Podem ser controlados por isolamento da pilha ou filtração do ar da pilha.	Podem ocorrer devido a falhas no equipamento ou deficiências no projecto do sistema.

5. Estudo de caso

A área em estudo, designada por rede do Vale do Douro Norte, está inserida no Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento de Trás-os-Montes e Alto Douro, Figura 13, que é gerido pela empresa Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, SA. Compreende os municípios de Alijó, Mesão Frio, Murça, Peso da Régua, Sabrosa, Sta. Marta de Penaguião, e Vila Real. Abrange uma área de 1214 km² e entre 2004 e 2007 servia uma população de cerca de 80 000 de habitantes, período correspondente à entrada em funcionamento de cada uma das estações de tratamento. As ETAR instaladas em cada município estão representadas na Figura 14.

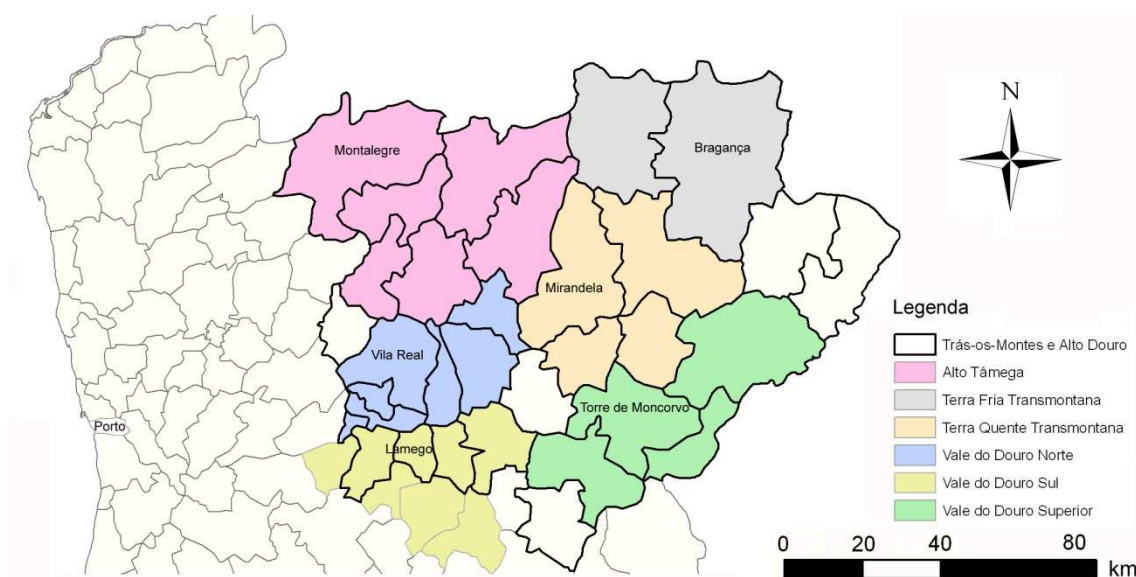


Figura 13 - Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Na Tabela 12 são apresentadas informações relativas ao tipo de efluente industrial tratado nas distintas ETAR (ainda que as estas estejam destinadas fundamentalmente ao tratamento de águas residuais domésticas), o nível de tratamento a que as águas residuais são sujeitas, bem como o tipo de desidratação e de armazenamento das lamas.

Nota:

Alguns dos dados utilizados na realização deste trabalho correspondem a informação relativa à gestão interna e ao desempenho do sistema que só à empresa dizem respeito. Uma vez que esta tese estará à disposição de qualquer pessoa, optou-se por limitar a apresentação desse tipo de informação.

As marcas dos equipamentos considerados neste trabalho não traduzem qualquer preferência por parte do autor, correspondendo simplesmente às entidades que foram contactadas e das quais se obteve uma resposta aos pedidos de informação.

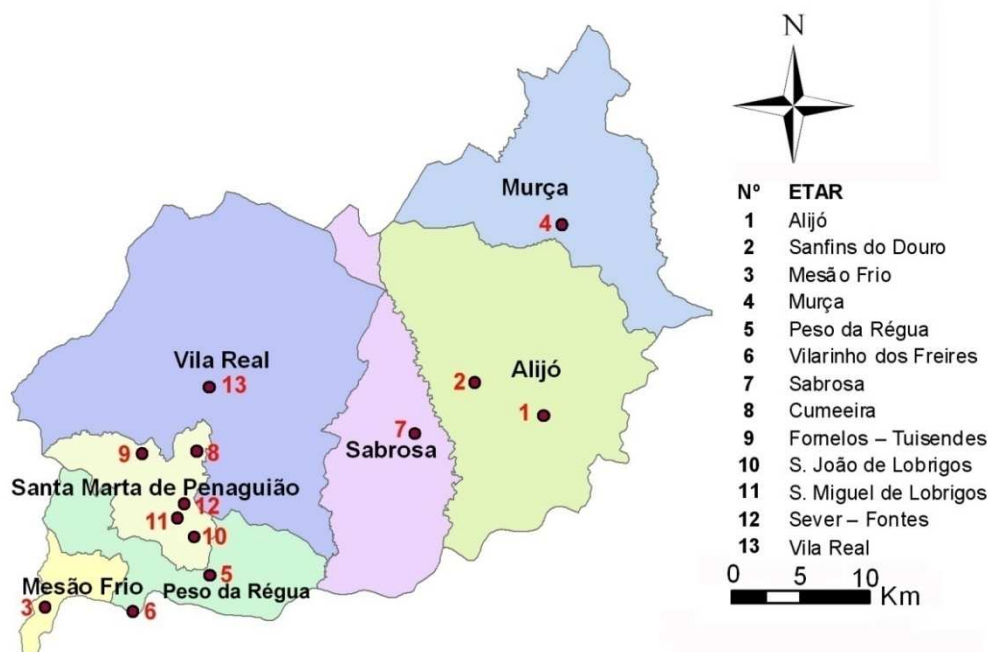


Figura 14 - Municípios constituintes da rede Vale do Douro Norte e ETAR instaladas em cada município.

Tabela 12 - Características da ETAR da zona em estudo.

ETAR	Tipo de efluente industrial	Nível de Tratamento Instalado	Desidratação	Armazenamento de lamas
Alijó	Vitivinícola	Terciário (N e P)	Centrífuga	Silo
Sanfins do Douro	Vitivinícola	Secundário	Centrífuga	Contentor
Mesão Frio	Vitivinícola	Secundário	Filtro de Banda	Contentor
Murça	Vitivinícola	Terciário (N e P)	Centrífuga	Silo
Peso da Régua	Vitivinícola	Terciário + Desinfecção	Centrífuga	Silo
Vilarinho dos Freires	Não tem	Terciário (N)	Sacos Filtrantes	Sacos filtrantes
Sabrosa	Vitivinícola e Azeite	Terciário (N e P)	Centrífuga	Contentor
Cumeeira	Vitivinícola	Terciário (N)	Sacos Filtrantes	Sacos filtrantes
Fornelos - Tuisendes	Não tem	Terciário (N)	Sacos Filtrantes	Sacos filtrantes
S. João Lobrigos	Vitivinícola; Azeite	Terciário (N)	Sacos Filtrantes	Sacos filtrantes
S. Miguel de Lobrigos	Vitivinícola	Terciário (N)	Sacos Filtrantes	Sacos filtrantes
Server-Fontes	Não tem	Terciário (N)	Sacos Filtrantes	Sacos filtrantes
Vila Real*	Tinturarias, Vitivinícola, Matadouro, Gráficas	Secundário	Filtro de Bandas	Silo

* Vila Real é a única ETAR na qual existe estabilização de lamas (por digestão anaeróbia).

6. Metodologia

O estudo técnico-económico da unidade para compostagem conjunta das lamas de ETAR incluiu:

1. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, das lamas produzidas;
2. Caracterização das práticas actuais da empresa no âmbito da gestão das lamas produzidas;
3. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, de produtos agro-industriais produzidos na zona em estudo;
4. Estudo técnico e económico dos processos alternativos de compostagem, incluindo uma proposta para a localização da unidade de compostagem.

O estudo das soluções tecnológicas que permitem diminuir a quantidade de microrganismos patogénicos presentes nas lamas de ETAR, incluiu:

1. A identificação e caracterização dos processos que permitem alcançar os requisitos mínimos estabelecidos;
2. Comentário crítico às opções apresentadas.

6.1. Estudo técnico-económico da unidade de compostagem conjunta das lamas de ETAR

6.1.1. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, das lamas produzidas

Os dados necessários à caracterização qualitativa e quantitativa das lamas produzidas nas ETAR da rede do Vale do Douro Norte, foram fornecidos pela empresa.

Para determinado ano, o valor de lama produzida não corresponde contudo à quantidade que seria produzida num cenário de utilização total da capacidade de tratamento de águas residuais instalada. Definiu-se, para tal, uma variável denominada “*Rácio de Utilização da ETAR*” (R_{ETAR}) (expressão 12), que relaciona o caudal anual de água residual tratada (Q_{art}), em cada ETAR com a capacidade hidráulica instalada (C_i).

$$R_{ETAR} = \frac{Q_{art}}{C_i} \quad [12]$$

A massa de lama de projecto (M_{lp}) será por isso definida tendo em consideração o valor anual de lamas produzidas em cada ETAR (M_{lamas}) e o respectivo “*Rácio de Utilização* (expressão 13).

$$M_{lp} = \sum \frac{M_{lamas}}{R_{ETAR}} \quad [13]$$

6.1.2. Caracterização das práticas actuais da empresa no âmbito da gestão das lamas

O conhecimento das práticas da empresa é fundamental para que se possam comparar os gastos e ganhos resultantes dessa gestão, com aqueles que decorreriam da implantação de um novo sistema.

6.1.3. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, de produtos agro-industriais produzidos na zona em estudo

Os materiais a co-compostar com as lamas constituem o meio de suporte e agente condicionante que permite que o processo de compostagem arranque e se desenvolva em condições que possibilitem a obtenção de um produto final de boa qualidade.

A identificação dos materiais a co-compostar incluiu os seguintes critérios:

- Produção e disponibilidade elevada na região em estudo;
- Obtenção dos materiais de forma gratuita ou com custos de aquisição reduzidos;
- Elevado teor de matéria orgânica/carbono orgânico e do rácio C/N;
- Estrutura e tamanho do material;
- Actividade de origem, excluindo-se materiais provenientes de actividades com potencial de contaminação com metais pesados e/ou micropoluentes orgânicos.

6.1.3.12. Análise qualitativa dos materiais destinados à compostagem

Na Tabela 13 estão apresentadas as propriedades físico-químicas dos materiais sujeitos a caracterização laboratorial bem como o método utilizado para tal.

Tabela 13 - Análises físico-químicas realizadas aos resíduos agro-industriais.

Parâmetro analisado	Método
Análise granulométrica	Peneiração do material.
Massa volúmica aparente	Peso da massa de material contido num recipiente de volume conhecido.
pH	Agitação em meio líquido e medição com sondas de pH e de condutividade.
Condutividade	
Humidade	Secagem e pesagem.
Matéria orgânica	Calcinação e pesagem.
Azoto total de Kjeldahl (NTK)	Digestão ácida, destilação e titulação.

Preparação da amostra

Com excepção da análise granulométrica, todas as análises foram realizadas após trituração do material. A análise do teor de matéria orgânica e de NTK, realizadas na base seca, implicaram uma secagem prévia do material a uma temperatura de 105 °C e durante 24h.

Carbono orgânico

O teor de matéria orgânica (m_o) foi determinado com o intuito de assim se poder estimar o valor do carbono orgânico (C_{org}) presente na amostra, uma vez que na matéria orgânica existe uma concentração relativamente constante de carbono. O cálculo do carbono orgânico é realizado por meio da expressão 14, assumindo que todo o carbono contido nas misturas é orgânico (Haug, 1993) (Polprasert, 2007).

$$\% \text{ Corg} = \frac{\% \text{ mo}}{1,8} \quad [14]$$

Rácio C/N

Para o cálculo do rácio C/N utilizam-se os valores obtidos para o carbono orgânico e para o azoto total de Kjeldahl (NTK), segundo a expressão 15.

$$C/N = \frac{\% \text{ Corg}}{\% \text{ NTK}} \quad [15]$$

6.1.3.13. Produção de resíduos agro-industriais no Vale do Douro Norte

A produção de resíduos agro-industriais na região em estudo foi realizada através do contacto pessoal com produtores dos resíduos potencialmente utilizáveis no processo de compostagem.

6.1.4. Estudo técnico e económico dos processos alternativos de compostagem, incluindo uma proposta para a localização da unidade de compostagem

As lamas e os resíduos agro-industriais possuem um valor económico limitado antes do processo de compostagem. Os custos de valorização não podem superar determinados limites, tendo em consideração os produtos concorrentes existentes no mercado. É necessário encontrar um sistema de compostagem que acarrete os menores custos de investimento e que apesar de altamente mecanizado, seja tecnologicamente simples, permitindo obter um produto final de boa qualidade.

Esta fase do estudo está subdividida em 7 etapas:

1. Selecção dos sistemas de compostagem a analisar;
2. Descrição do funcionamento de cada um dos sistemas;
3. Cálculo das misturas a compostar;
4. Cálculo das dimensões das pilhas de compostagem e respectiva área de implantação;
5. Estimativa dos custos associados a cada um dos sistemas;
6. Proposta de localização da unidade de compostagem;
7. Balanço económico do funcionamento da unidade.

6.1.4.14. Seleccção dos sistemas de compostagem a analisar

A selecção do sistema de compostagem está condicionada pela questão do clima da região em estudo, nomeadamente devido à elevada pluviosidade anual, não podendo este aspecto ser descurado. O tipo de sistema a utilizar terá também influência decisiva no dimensionamento da instalação, uma vez que determina o tempo de residência necessário em cada fase do processo e consequentemente as áreas necessárias à implantação.

6.1.4.15. Descrição de funcionamento de cada um dos sistemas

Escolhidos os sistemas a analisar, a sua descrição permite compreender as operações que se irão desenvolver dentro da unidade, bem como do equipamento e funcionários necessários à sua gestão.

6.1.4.16. Cálculo das misturas a compostar

Os principais factores, a considerar no cálculo da quantidade de cada material a compostar, são o rácio C/N, o conteúdo em humidade e a porosidade. As fórmulas a utilizar no cálculo da mistura de 2 ou mais materiais estão apresentadas na Tabela 14 (Ministry of agriculture, 1996A).

Tabela 14 - Fórmulas para o cálculo da quantidade de mistura de cada material.

Nomenclatura	
a, b, c	Massa do material, $a, b, c \dots$
$\%Ha, \%Hb, \%Hc$	% de humidade do material $a, b, c \dots$
$\%Ca, \%Cb, \%Cc,$	% de carbono orgânico do material $a, b, c \dots$ (na base seca)
$\%Na, \%Nb, \%Nc$	% de azoto total do material $a, b, c \dots$ (na base seca)
R	Rácio de C/N desejado na mistura
Ra, Rb, Rc	Rácio de C/N no material $a, b, c \dots$
Fórmula para a mistura de 2 materiais	
kg de material a por kg de b :	
$a = \frac{\%Nb}{\%Na} \times \frac{R - Rb}{Ra - R} \times \frac{100 - \%Hb}{100 - \%Ha}$	
[16]	
Fórmula para a mistura de vários materiais	
$\text{Rácio } C/N = \frac{[\%Ca \cdot a \cdot (100 - \%Ha)] + [\%Cb \cdot b \cdot (100 - \%Hb)] + [\%Cc \cdot c \cdot (100 - \%Hc)] + \dots}{[\%Na \cdot a \cdot (100 - \%Ha)] + [\%Nb \cdot b \cdot (100 - \%Hb)] + [\%Nc \cdot c \cdot (100 - \%Hc)] + \dots}$	
[17]	
Teor de humidade na mistura	
$\%H_{mistura} = \frac{(a \cdot \%Ha) + (b \cdot \%Hb) + (c \cdot \%Hc) + \dots}{(a + b + c + \dots)}$	
[18]	

Na mistura, valores de massa volúmica aparente inferiores a 640 kg/m^3 são geralmente indicadores de uma porosidade adequada à compostagem (Ministry of agriculture, 1996A).

6.1.4.17. Cálculo das dimensões das pilhas de compostagem e consequente área de implantação

O cálculo das dimensões das pilhas está condicionado pelo tipo de sistema e maquinaria a utilizar, sendo que, para pilhas revolvidas, a secção terá forma triangular e para o sistema em canal, terá secção rectangular. Os dados de base a utilizar no dimensionamento estão inscritos na Tabela 15. Os cálculos foram realizados utilizando folha de Excel®.

Tabela 15 - Dados de base para o dimensionamento do sistema de compostagem.

Dados	Sigla	Unidades
Fase de degradação activa		
Massa de lama a compostar por dia	$m_{lama/d}$	kg/dia
Massa volúmica aparente da lama	ρ_{lama}	kg/m ³
Massa do meio de suporte a utilizar por dia	$m_{msup/d}$	kg/dia
Massa volúmica do meio de suporte	ρ_{msup}	kg/m ³
Tempo de retenção da fase de degradação activa	t_{ca}	dias
Largura e altura de trabalho	$L_{ca}; H_{ca}$	m
Comprimento da pilha/canal	P_{ca}	m
Espaçamento entre as pilhas/canais	E_{ca}	m
Fase de maturação		
Diminuição do volume na mistura após degradação activa	ΔV	%
Tempo de retenção da fase de maturação	t_m	dias
Largura e altura	$L_m; H_m$	m
Comprimento máximo da pilha/canal	$P_{m_{max}}$	m
Espaçamento entre as pilhas/canais	E_m	m

Parâmetros como (t_{ca}), (ΔV), (t_m) e outras propriedades, como o volume a compostar após a mistura, devem ser determinados experimentalmente numa instalação piloto, uma vez que são função específica do tipo de materiais e do processo de compostagem utilizado, divergindo bastante entre sistemas.

A área necessária para implantar o sistema de compostagem segue a seguinte ordem de cálculo:

1. Massa de meio de suporte a adicionar por massa de lama a compostar (expressão 16).
2. Volume de lama e de meio de suporte a compostar por dia (expressão 19).

$$V_{/d} = \frac{m_{lama/d}}{\rho_{lama}} + \frac{m_{msup/d}}{\rho_{msup}} \quad [19]$$

Área necessária para a degradação activa

1. Definição do tempo de retenção e cálculo do volume total (V_t) a compostar durante esse período (expressão 20).

$$V_t = V_{/d} \cdot t_{ca} \quad [20]$$

2. Definição da largura, altura de trabalho e comprimento máximo da pilha/canal.
3. Cálculo da secção da pilha/canal (expressões 21 e 22).

$$\text{Secção triangular} \quad S = \frac{L_{ca} \cdot H_{ca}}{2} \quad [21]$$

$$\text{Secção rectangular} \quad S = L_{ca} \cdot H_{ca} \quad [22]$$

4. Cálculo do número de pilhas/canais (expressão 23).

$$n^{\circ} = \frac{Vt}{S \cdot Pca} \quad [23]$$

5. Arredondamento por excesso do nº de pilhas/canais ($n^{\circ} \rightarrow N^{\circ}$).
6. Cálculo da área de degradação activa (A_{ca}) (expressão 24).

$$A_{ca} = Lca \cdot Pca \cdot N^{\circ} \quad [24]$$

7. Definição do espaçamento entre as pilhas/canais e cálculo da área total de degradação activa (AT_{ca}):

O cálculo do espaçamento entre as pilhas⁴/canais é realizado de forma diferente consoante o sistema utilizado. Assim, para pilhas revolvidas mecanicamente aplicam-se as expressões 25 e 26.

Se N° for par

$$AT_{ca} = Aca + \left[\left(\frac{N^{\circ}}{2} + 1 \right) \cdot E_L + \frac{N^{\circ}}{2} \cdot E_C \right] \cdot Pca \quad [25]$$

Se N° for ímpar

$$AT_{ca} = Aca + \left[\frac{N^{\circ} - 1}{2} \cdot E_C + \left(\frac{N^{\circ}}{2} + 1,5 \right) \cdot E_L \right] \cdot Pca \quad [26]$$

Para o sistema em canal, aplica-se a expressão 27.

$$AT_{ca} = Aca + (N^{\circ} + 1) \cdot Eca \cdot Pca \quad [27]$$

Área necessária para a maturação

1. Definição do tempo de retenção e cálculo do volume de material a maturar (V_m) (expressão 28).

$$V_m = V_{jd} \cdot \Delta V \cdot tm \quad [28]$$

2. A ordem de cálculo segue o procedimento apresentado para a área necessária para a degradação activa, a partir da expressão 21.

As necessidades de espaço não se reduzem contudo à área de degradação activa e maturação, pelo que não convém esquecer as áreas necessárias à recepção e processamento das matérias-primas, para a afinação do composto, ensacagem, e armazenamento temporário, de matérias-primas e de produto final.

6.1.4.18. Estimativa dos custos associados a cada um dos sistemas

No projecto de unidades de compostagem, as dimensões das instalações, o tipo de plataforma de trabalho, de máquinas utilizadas e o controlo dos lixiviados, são factores que contribuem para uma variação significativa do custo final associado a cada uma das alternativas.

Esta etapa é fundamental uma vez que será a base para a tomada de decisão para escolha do tipo de sistema de compostagem a instalar.

⁴ As pilhas estão agrupadas duas a duas, com um espaçamento curto entre si suficiente para a passagem das rodas do volteador (E_C). Cada agrupamento de duas pilhas está separado dos restantes por um espaçamento largo (E_L).

6.1.4.19. Proposta de localização da unidade de compostagem.

A localização da unidade de compostagem tem uma influência significativa nos custos de operação, devido aos gastos resultante do transporte dos materiais.

Apesar de não poderem ser negligenciados os custos resultantes do transporte dos restantes subprodutos, a sua consideração na localização da unidade implicaria a introdução de variáveis que não dependem do controlo da empresa e que facilmente poderiam deixar de existir ou ser substituídas, pelo que a nível da localização apenas se consideram as lamas produzidas nas ETAR.

O objectivo desta fase é encontrar um local compreendido entre as diversas ETAR que minimize os custos de transporte. Para tal é necessária informação relativa à:

- Localização geográfica das ETAR;
- Mapa das estradas da região em estudo;
- Quantidade de lama produzida em cada ETAR.

O preço de aquisição do terreno é considerado independente da zona de implantação.

A obtenção da solução está dividida em duas fases:

1. A primeira fase consiste no cálculo da distância entre cada ETAR e um conjunto de pontos possíveis de implantação, espalhados de forma uniforme pela área em estudo, utilizando para tal a ferramenta informática Arcgis 9.2.
2. Na segunda fase, desenvolvida em Excel®, e a partir dos resultados obtidos na fase 1, calcula-se para cada ponto o custo de transporte desde cada ETAR até esse local, sendo o custo função da distância e da quantidade de lama aí produzida. O lugar óptimo de implantação será aquele para o qual o somatório dos custos de transporte seja mais reduzido.

Desenvolvimento da fase 1

O Arcgis (ESRI, 2009) é um sistema de informação geográfica (SIG) que permite a sobreposição de mapas temáticos, permitindo relacioná-los espacialmente e geograficamente, fornecendo assim uma maior compreensão sobre uma determinada área em estudo. As ferramentas disponibilizadas pelo programa possibilitam a organização e visualização de dados, a produção de mapas, a consulta e a análise espacial da informação. A escolha dos níveis de informação a combinar depende do propósito do estudo bem como da existência/disponibilidade dos dados, como por exemplo, hidrografia, geologia, altimetria, precipitação, radiação solar, concelhos, estradas, ferrovias, hospitais, escolas, museus, basicamente toda a informação que possa ser georreferenciada.

O cálculo das distâncias, entre as ETAR e os pontos possíveis para a instalação da unidade de compostagem, implica as seguintes operações:

1. Utilizando o *ArcCatalog*, criar uma “*Network dataset*” a partir do mapa das estradas.
2. No *Arcmap*, activar a extensão “*Network analyst*” e utilizar esta ferramenta que está alojada no “*ArcToolbox*”.

3. Para que a análise se possa realizar, é necessário que as ETAR estejam referenciadas, que as estradas tenham definido o atributo “*length*” e que sejam marcados todos os pontos possíveis de instalação da unidade.
4. O cálculo das distâncias é realizada ponto a ponto, pelo que é necessário repetir a análise apresentada no ponto 5 para todos os pontos de instalação a considerar.
5. A função a operar no “*Network analyst*” é “*New closest facility*”, definindo as “*Facilities*” como o ponto de instalação da unidade de compostagem, e os “*Incidents*” como as ETAR. É necessário ter em atenção que em “*Layer properties*” e no separador “*Accumulation*”, deve estar activado o item “*Length*”, para que o resultado dê a soma da distância percorrida em todos os troços da estrada que liga o ponto de instalação e cada ETAR.
6. Abrindo a “*Attribute Table*” das “*Routes*” que se formaram, no separador opções basta carregar em “*Export*”, sendo os resultados visualizáveis em Excel.

Desenvolvimento da fase 2

Utilizando Excel, para cada ponto definido na fase 1 e considerando a quantidade anual de lama de projecto em cada ETAR (m_{lama}), a distância entre essa ETAR e esse ponto (d) e um factor de ponderação do custo de transporte por massa de lama e distância percorrida (c), calcula-se o valor do custo de transporte (α) apresentado na expressão 29. O ponto de implantação da unidade será aquele no qual o somatório de todos os (α) for menor.

$$\alpha = m_{lama} \cdot d \cdot c \quad [29]$$

6.1.4.20. Balanço económico do funcionamento da unidade

A última fase do estudo visa comparar os custos globais resultantes da instalação e funcionamento da unidade com os ganhos financeiros advindos da sua exploração (Tabela 16).

Tabela 16 - Custos e ganhos a considerar no balanço económico do funcionamento da unidade de compostagem.

Custos
<i>Investimento</i>
Obra de construção civil
Aquisição de maquinaria
<i>Exploração da unidade</i>
Recolha e transporte dos materiais até à unidade
Utilização da maquinaria
Gastos com funcionários
Ganhos
Venda do composto produzido

Este balanço permitirá perceber se a instalação da unidade de compostagem de lamas, aproveitando os resíduos agro-industriais produzidos na região, permite à empresa ATMAD reduzir os custos relativos à gestão das lamas.

6.2. Identificação de soluções tecnológicas que permitem diminuir a quantidade de microrganismos patogénicos presentes nas lamas de ETAR

A identificação de soluções que permitem diminuir o número de microrganismos patogénicos presentes nas lamas produzidas nas ETAR, visa obter, de forma resumida, conhecimentos relativos às opções de eliminação que na prática são implementadas a nível mundial.

7. Resultados e Discussão

7.1. Estudo técnico-económico da unidade de compostagem conjunta das lamas de ETAR

7.1.1. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, das lamas produzidas no Vale do Douro Norte

7.1.1.1. Produção de lamas

Na Tabela 17 estão inscritos os valores médios de produção de lamas referentes a 2007 e 2008 (excepto para o Peso da Régua – valor correspondente a 2008). De notar que o valor de produção de lamas apresentado para o Peso da Régua corresponde à soma do total de lamas produzido em 8 ETAR: Peso da Régua, Vilarinho de Freires-Poiars, Mesão Frio, Cumieira, Fornelos - Tuisendes, S. João de Lobrigos, S. Miguel de Lobrigos e Sever-Fontes. Essas lamas são transportados para o Peso da Régua onde posteriormente são desidratadas e armazenadas até serem enviadas para valorização agrícola.

Tabela 17 - Valor médio de produção de lamas nas ETAR do Vale do Douro Norte no ano 2007 e 2008.

Município	ETAR	Quantidade de lama (ton/ano)
Alijó	<i>Alijó-Favaíos</i>	117
Alijó	<i>Sanfins do Douro</i>	71
Mesão Frio	Mesão Frio	-
Murça	<i>Murça</i>	58
Peso da Régua	Vilarinho dos Freires-Poiars	-
Peso da Régua	<i>Peso da Régua*</i>	664
Sabrosa	<i>Sabrosa</i>	148
Santa Marta Penaguião	Cumieira	-
Santa Marta Penaguião	S. João de Lobrigos	-
Santa Marta Penaguião	S. Miguel de Lobrigos	-
Santa Marta Penaguião	Fornelos-Tuisendes	-
Santa Marta Penaguião	Sever-Fontes	-
Vila Real	<i>Vila Real</i>	2955
Total		4013

*valor referente a 2008

O valor de massa de lama a considerar no projecto corresponde à quantidade produzida numa situação de utilização total da capacidade instalada das ETAR, calculado por intermédio da expressão 12 e 13, e está apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Quantidade de lama de projecto produzida nas diferentes ETAR.

Município	ETAR	Quantidade de lama de projecto (ton/ano)
Alijó	Alijó-Favaíes	160
Alijó	Sanfins do Douro	134
Murça	Murça	159
Peso da Régua	Peso da Régua	1388
Sabrosa	Sabrosa	369
Vila Real	Vila Real	4805
Total		7015

7.1.1.2. Análise qualitativa das lamas no Vale do Douro Norte

O regime implementado pela empresa ATMAD de análise às lamas destinadas à valorização agrícola, implica a realização de análises bianuais, correspondentes à campanha Primavera-Verão e Outono-Inverno. Os dados relativos às análises dos anos 2007 e 2008 foram comparados com os limites impostos pela legislação nacional (DL nº 118/2006) e pela proposta de revisão da directiva comunitário que regula esta temática (Directiva 86/278/CE) no que concerne aos metais pesados, aos compostos orgânicos e dioxinas, e aos limites dos parâmetros microbiológicos impostos pela DRADM. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Comparação da concentração de metais pesados, compostos orgânicos e dioxinas, e dos parâmetros microbiológicos contidos nas lamas e impostos pela legislação.

Elemento	Unidades	Limite		ETAR					
		DL 118/2006	3º Draft	Alijó	Sanfins do Douro	Murça	Régua	Sabrosa	Vila Real
Cádmio	mg/kg ms	20	10						
Cobre	mg/kg ms	1000	750						
Níquel	mg/kg ms	300	300						
Chumbo	mg/kg ms	750	750						
Zinco	mg/kg ms	2500	2500						
Mercúrio	mg/kg ms	16	10						
Crómio	mg/kg ms	1000	1000						
AOX	mg/kg ms	500	500						
LAS	mg/kg ms	2600	2600						
DEHP	mg/kg ms	100	100						
NPE	mg/kg ms	50	50						
PAH	mg/kg ms	6	6						
PCB	mg/kg ms	0,8	0,8						
PCDD/F	ng TE/kg ms	100	100						
E.coli	NMP /g	1000		S	S	S	S	S	S
Salmonelas	/25g	Ausência							

I - Inferior aos limites estabelecidos; S – Superior aos limites estabelecidos.

Em nenhuma situação se verificou nas lamas uma presença de metais pesados, compostos orgânicos e dioxinas, ou salmonelas superior aos limites estabelecidos. De referir que os valores encontrados e registados apresentavam gamas de valor frequentemente 5 vezes inferior aquele proposto pelo 3º draft, que sugere valores iguais ou inferiores aqueles constantes na legislação portuguesa. A presença contínua de valores superiores de *Escherichia Coli* condiciona a gestão das

lamas, implicando a introdução de um tratamento que elimine essa contaminação permitindo assim a valorização agrícola.

Nas campanhas de amostragem e análise realizadas pela empresa são também medidas as propriedades físico-químicas apresentadas na Tabela 20, cujos valores correspondem ao valor médio registado nas campanhas de 2007, 2008 e Primavera-Verão de 2009 para a ETAR de Vila Real. Sendo esta a principal instalação produtora de lamas na área delimitada, com mais de 70% do total, as suas propriedades foram utilizadas como referência ao longo do desenvolvimento do estudo.

Tabela 20 - Propriedades físico-químicas das lamas produzidas na ETAR de Vila Real e enviadas para valorização agrícola.

	Unidades	Média	Desvio Padrão
pH	Escala de Sorensen	7,08	0,44
Matéria seca	%	16	1,3
Matéria orgânica	%	71	2,3
Azoto total	mg/kg N	61200	7259
Azoto nítrico	mg/kg N	11,46	5
Azoto amoniacal	mg/kg N	4660	3360
Fósforo total	mg/kg P	20400	2074

7.1.2. Caracterização das práticas actuais da empresa no âmbito da gestão das lamas produzidas

As lamas produzidas têm como destino a valorização agrícola nas ETAR de Vila Real e da Régua (que inclui as lamas produzidas nas ETAR de Vilarinho de Freires-Poiares, Mesão Frio, Cumeeira, Fornelos - Tuisendes, S. João de Lobrigos, S. Miguel de Lobrigos e Sever-Fontes), e a deposição em aterro, para as lamas produzidas em Alijó, Sanfins do Douro, Murça e Sabrosa. A prática de deposição em aterro tende a ser eliminada, optando-se por soluções que permitam a valorização agrícola das lamas.

A recolha, transporte e respectiva valorização/deposição das lamas é executada através de entidades externas à ATMAD. A resposta desta entidade face ao problema levantado pela contaminação microbiológica implica a compostagem das lamas, opção que acarreta um aumento inevitável do custo praticado actualmente para a realização desse serviço, sendo este mais elevado para as ETAR que se encontram mais para o interior da região, nomeadamente Alijó, Sabrosa e Murça.

Considerando a produção média de lamas entre 2007 e 2008 e o valor da proposta mais baixa apresentada para a gestão das lamas, por compostagem, e para todas as ETAR do sistema, obtém-se um gasto total da ordem dos 115 000 € por ano, para a realização desse serviço por uma entidade externa à empresa. Num cenário de utilização total da capacidade instalada, mas utilizando os valores actuais de custo, esse valor seria de cerca de 200 000 €.

7.1.3. Identificação e caracterização, qualitativa e quantitativa, de produtos agro-industriais produzidos na zona em estudo

Os subprodutos/resíduos de origem agro-industrial e respectiva origem, identificados na região e com potencial para serem utilizados, estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resíduos agro-industriais com potencial para serem utilizados na compostagem.

Material	Proveniência
Engaço de uva	Lagares de vinho
Folhas de oliveira	Lagares de azeite
Resíduos florestais processados	Produtores florestais / limpeza de mato
Serrim	Serrações de madeira

7.1.3.1. Engaço de uva

O sector vitivinícola apresenta-se como uma das actividades mais importante do sector agrícola a nível nacional, representando cerca de 50% do volume de negócios. No ano de 2006 ocupava aproximadamente 240 000 hectares, com os quais se produziram cerca de 600 000 m³ de vinho na campanha de 2007/2008, posicionando Portugal como o 5º maior produtor de vinho a nível comunitário. A região de Trás-os-Montes produziu no mesmo período cerca de 9 800 m³ de vinho, representando cerca de 1,5 % do total da produção nacional (IVV, 2008).

Os subprodutos da vinificação estão estimados num intervalo de 25%-30% da quantidade de vinho produzida (kg/l), sendo que o engaço de uva (parte lenhosa do cacho que suporta os bagos da uva) representa um valor entre 3%-4% (Silva L. , ESAV) ou 2,5-7,5% (Nerantzis, e-JST). Este material é separado mecanicamente após a recepção na adega e antes da prensagem da uva. Usualmente, é utilizado como alimento para os animais, é espalhado nos solos, ou acaba por ser queimado sem qualquer valorização energética.

A produção de engaço de uva está restringida à época das vindimas, tipicamente entre os meses de Setembro e Outubro nesta região de Trás-os-Montes.

7.1.3.2. Folhas de oliveira

A indústria extractiva do azeite apresenta-se como uma actividade de grande importância económica e social nos países do mediterrâneo, sendo Espanha, Itália e Grécia os maiores produtores mundiais. Em Portugal, a produção de azeite na campanha 2005/2006 foi da ordem das 30 000 toneladas, sendo o Alentejo e Trás-os-Montes e Alto Douro equitativamente responsáveis por mais de 60% da produção total nacional (MADRP, 2006) . De carácter sazonal, esta actividade desenvolve-se entre os meses de Novembro a Fevereiro.

A apanha da azeitona, que pode ser manual ou mecânica, contribui para o desprendimento de folhas de oliveira que são transportadas para os lagares. À entrada do lagar, realiza-se uma operação preliminar de separação das folhas, sendo estas amontoadas, e posteriormente queimadas ou espalhadas pelo solo, tornando-se assim num resíduo sem valor, mas com um potencial de

valorização orgânico a não desprezar. A massa de folha de azeitona obtida por massa de azeitona processada está cifrada em 5% (Ecopoda, 2006).

7.1.3.3. Resíduos florestais

A floresta é um bem que interessa preservar do ponto de vista ambiental e socioeconómico, representa cerca de 38% da ocupação do solo em Portugal Continental (DGRF, 2006), estimando-se a produção económica anual em 1,3 mil milhões de euros⁵ (DGRF, 2006B). Uma gestão adequada que permita garantir a sua renovação e valorização implica que a biomassa, resultante da exploração florestal e acumulada nas florestas, seja devidamente recolhida e tratada.

A Estratégia Nacional para as Florestas tem, como prioridade, a criação de um mercado para os materiais combustíveis que promova o aproveitamento dos matos e reduza os custos líquidos de limpeza de povoamentos, sugerindo o aproveitamento da biomassa florestal para a produção de energia (DGRF, 2006B).

A produção de resíduos florestais é contínua ao longo do ano, tendo contudo especial predominância antes da época de maior calor, como resposta à prevenção contra os incêndios florestais, e está estimada em 1 ton/ha de área florestal. Contudo, com a previsão da construção de centrais de biomassa para Trás-os-Montes, é provável que o preço actual de venda de resíduos florestais pelos produtores florestais, 35 €/ton (preço incluindo transporte), aumente, criando assim um forte concorrente na possível aquisição deste material (APVC, 2009).

7.1.3.4. Serrim

O serrim é um material produzido em serralharias de forma contínua ao longo do ano, possuindo potencial para ser utilizado na compostagem devido às suas propriedades químicas,

7.1.4. Análise qualitativa dos materiais destinados à compostagem

As análises das propriedades físico-químicas dos materiais a compostar foram realizadas no Laboratório de Engenharia Sanitária da FEUP.

É fundamental conhecer as propriedades dos materiais a compostar, para averiguar a sua adequabilidade ao processo de compostagem, e posteriormente proceder ao cálculo das quantidades a utilizar na preparação das misturas a compostar.

7.1.4.1. Amostragem

Engaço de uva: O engaço de uva foi recolhido no princípio do mês de Abril. Encontrava-se amontoado há mais de 6 meses numa zona descoberta de uma adega situada na zona de Santa Marta de Penaguião, estando por isso sujeito às diferentes condições climáticas e à degradação biológica. A Figura 15 apresenta uma imagem do engaço recolhido para análise.

⁵ Estimativa que considera os produtos tradicionais (a madeira, a cortiça e a resina) assim como os frutos, cogumelos, plantas aromáticas, silvopastorícia, caça, recreio e paisagem, protecção do solo e dos recursos hídricos, biodiversidade, e outros valores ambientais como o sequestro do carbono.



Figura 15 - Engaço de uva

Folhas de oliveira: As folhas foram apanhadas também no mês de Abril, estando ainda suspensas nos ramos das oliveiras (Figura 16).



Figura 16 - Folhas de oliveira.

Resíduos florestal processado: Resultante das actividades florestais, foi cedido pela Associação dos Produtores Florestais do Vale da Campeã em estado já triturado (Figura 17).



Figura 17 - Resíduo florestal processado.

Serrim: O serrim foi recolhido numa serração de madeira próxima da ETAR de Vila Real e é proveniente do corte de madeira bruta e não de carpintarias (Figura 18).



Figura 18 - Serrim.

7.1.4.2. Análise Granulométrica

A análise granulométrica dos resíduos agro-industriais foi realizada para os resíduos florestais e para o serrim. No caso do engaço de uva, este constituía um emaranhado bastante consistente, Figura 19, pelo que seria necessário tritirá-lo para assim permitir a análise, retirando por isso o sentido à medição. As folhas de oliveira apresentavam homogeneidade a nível de tamanho, pelo que se optou por medir o comprimento e a largura das folhas. Os resultados estão apresentados na Tabela 22.



Figura 19 - Emaranhado de engaço de uva.

Tabela 22 - Análise granulométrica dos resíduos florestais e do serrim.

Resíduo florestal			Serrim			Folhas de oliveira
Crivo (mm)	Massa (g)	Total (%)	Crivo (mm)	Massa (g)	Total (%)	Gama de valores (cm)
13,20	208,43	13,9	2,36	0,5	0,5	Comprimento
9,50	151,89	10,2	1,70	8,48	7,8	
6,70	270,72	18,1	1,18	16,45	15,2	Largura
4,75	170,32	11,4	0,85	22,08	20,4	
3,35	155,01	10,4	0,425	28,13	26,0	1 - 1,25
2,36	92,99	6,2	<0,425	32,72	30,2	
1,70	104,32	7,0	Total	108,36	100	
<1,70	342,65	22,9				
Total	1496	100				

Por comparação, observa-se que o serrim apresenta partículas cujo calibre é extremamente reduzido, anulando a sua disponibilidade para a compostagem, uma vez que as partículas teriam tendência a formar grânulos muito compactos, não contribuindo para o aumento de porosidade e consequente arejamento da pilha. O resíduo florestal, embora apresente apenas um 14% de partículas com calibre superior a 1,32 cm (o que poderia significar uma inaptidão para a compostagem), na realidade é considerado como um bom meio de suporte. Isto porque a informação que é transmitida através da medição do calibre de cada partícula é o valor da dimensão mais curta que cada fragmento possui, e não o seu comprimento e largura. Como demonstra a Figura 20, no crivo de 4,75 mm por exemplo, podem facilmente encontrar-se fragmentos com comprimentos superiores a 2 cm. A Figura 21 apresenta alguns dos materiais encontrados nos crivos de dimensão igual ou superior a 3,35 mm, considerados como aptos para compostagem e que na amostra em estudo representaram 64% da massa de resíduo analisado.



Figura 20 - Resíduo florestal retido no crivo de 4,75 mm.



Figura 21 - Materiais retidos nos crivos com malha acima de 3,35 mm.

7.1.4.3. Análises físico-químicas

Os resultados das análises realizadas aos materiais de suporte encontram-se apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Propriedades físico-químicas dos materiais de suporte.

	Unidades	Engaço de uva	Folhas de oliveira	Resíduo florestal	Serrim
pH	Escala de Sorensen	7,03	6,11	6,32	6,06
Condutividade	µS/cm	179	310	74	78
Humidade	%	14	33	13	17
Matéria orgânica	%	86,6	96,6	85,3	98,9
Azoto total de kjeldahl	%	1,03	1,37	0,82	0,98
Carbono orgânico	%	48,1	53,7	47,4	54,9
C/N	-	46,6	39,2	57,8	56,0
Massa volúmica aparente	kg/m ³	254	183	207	139

É interessante observar que todos os materiais apresentam um elevado teor de matéria carbonácea e valores de C/N capazes de compensar os valores mais reduzidos apresentados pelas lamas. Apresentam também um reduzido valor de massa volúmica aparente, o que indica que terão um bom potencial para serem utilizados como meio estruturante para condicionar de forma favorável a porosidade das lamas. As folhas de oliveira apresentam um elevado teor de azoto daí que o respectivo valor de C/N seja o mais baixo do grupo analisado. A nível desta relação, os resíduos florestais e o serrim são aqueles que apresentam valores mais elevados.

7.1.5. Produção de resíduos agro-industriais no Vale do Douro Norte

Na Tabela 24 estão apresentados os locais e respectivas produções de subprodutos com interesse para a compostagem para os quais se obtiveram dados. No Anexo C, Tabela 56, apresentam-se as adegas e os lagares de azeite localizados na região.

Tabela 24 - Produção de resíduos agro-industriais na região em estudo.

Material	Empresa	Local	Produção aproximada em 2008	Produção potencial de de resíduo (ton/ano)
Engaço de uva*	Adega Cooperativa de Santa Marta	Santa Marta de Penaguião	Vinho 12000 m ³	480
	Adega Cooperativa de Alijó	Alijó	Vinho 2250 m ³	90
Folhas de oliveira**	Cooperativa agrícola dos Olivicultores de Murça	Murça	Azeitona 1800 ton	90
	Quinta de St ^a Eugénia	Alijó	Azeitona 470 ton	23,5
Resíduos florestais***	nd.	Vale da Campeã - Vila Real	Área florestal 2800 ha	2800 ton
Serrim	nd.	nd.	nd.	nd.

*Considerando 4% do total da massa de vinho produzido.

**Considerando 5% do total de azeitona processada.

*** Potencial máximo a produzir, considerando a produção de 1ton/ha área florestal.

7.1.6. Estudo técnico e económico dos processos alternativos de compostagem, incluindo uma proposta para a localização da unidade de compostagem

7.1.6.1. Seleccção dos sistemas de compostagem a analisar

A procura de um sistema simples de baixo custo, mas eficiente, conduziu à selecção de 2 sistemas de compostagem, optando-se apenas por sistemas que impliquem um revolvimento frequente da mistura. Assegura-se assim uma correcta homogeneização da mistura e a possibilidade de deslocação do material para a zona central da pilha, local onde a temperatura é mais elevada, no sentido de assegurar uma correcta higienização.

Os sistemas em análise são:

- (A) - Pilhas revolvidas com uma volteadora acoplada a um tractor agrícola ou com uma volteadora autónoma;
- (B) - Canal com arejamento forçado e revolvimento automático.

A nível da instalação de uma cobertura, considerou-se para o sistema (A) a utilização de um geotêxtil, ou a implantação de uma estrutura rígida, sendo esta última opção a que será considerada no sistema (B).

7.1.6.2. Descrição de funcionamento de cada um dos processos

O esquema de funcionamento de cada um dos sistemas é bastante semelhante e pressupõe a:

- Recolha e armazenamento temporário das lamas, com uma etapa de pré-processamento (trituração) dos materiais de suporte;
- Colocação dos materiais nas leiras a compostar para o sistema (A) e na parte inicial dos canais de compostagem para o sistema (B);

- Mistura dos materiais com o equipamento de revolvimento;
- Revolvimentos periódicos para todos os sistemas e arejamento forçado para o sistema (B) durante o período de degradação activa;
- Recolha dos lixiviados e reutilização para rega do composto;
- Maturação do composto – em ambos os sistemas a maturação é realizada no mesmo tipo de pilha/canal. No caso da compostagem em canal, quando termina o período de degradação activa, o composto atinge o final do canal e é transferido para um canal onde o arejamento é menos intenso, atravessando esse novo canal durante o período de maturação;
- Revolvimento do composto durante a fase de maturação mas com uma menor frequência do que na fase de degradação activa;
- Crivagem e ensacamento, ou armazenamento temporário a granel, do composto.

7.1.6.3. Cálculo das misturas a compostar

Considerando as características das lamas apresentadas na Tabela 20, calculou-se o respectivo valor da humidade e da relação C/N (expressão 14 e 15), apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Cálculo da humidade e do rácio C/N das lamas.

Parâmetro	Valor
Matéria Seca (%)	16
Matéria Orgânica (%)	71
Azoto Total (%)	6,12
Humidade (%)	84
Carbono orgânico (%)	39,4
C/N	6,4

A Tabela 26 apresenta a quantidade de material a compostar em função da lama produzida, considerando apenas a mistura de 2 materiais (expressão 16) e os valores apresentados na Tabela 23. Pretende-se que a mistura contenha um rácio de C/N igual a 30 ($R = 30$) e uma humidade na mistura igual a 55% ($\%H_{\text{mistura}} = 55\%$)

Tabela 26 - Massa de agente condicionante a adicionar por massa de lama.

	Resíduo		
	Engaço de uva	Folhas de oliveira	Resíduo florestal
b	1	1	1
%Ha	14	33	13
%Hb	84	84	84
%Na	1,03	1,37	0,82
%Nb	6,12	6,12	6,12
Ra	46,7	39,2	57,8
Rb	6,4	6,4	6,4
R	30	30	30
a	1,5622	2,7365	1,1652
Humidade da mistura	41,3	46,6	45,8

a - kg agente condicionante; b - kg lama

O material para o qual é necessário adicionar maior quantidade para equilibrar o rácio C/N da mistura são as folhas de oliveira e pelo contrário, aquele que menor quantidade necessita de ser adicionado é o resíduo florestal. Este era um resultado expectável considerando que quanto menor o rácio de C/N num material maior a quantidade que se tem de adicionar para atingir um mesmo objectivo de C/N numa pilha a compostar. De referir que a adição dos agentes condicionantes provoca uma secagem da pilha, pelo que é necessário regar a pilha para se atingir o valor mínimo pretendido.

O cálculo da quantidade de água a adicionar é realizado por meio da expressão 16 e está apresentada na Tabela 27.

Tabela 27 - Cálculo da nas necessidades iniciais de rega.

	Engaço de uva	Folhas de oliveira	Resíduo florestal
%H - % de humidade requerida na mistura a compostar	55	55	55
%Ha – conteúdo de humidade da água (100%)	100	100	100
%Hb – conteúdo de humidade da mistura	41,3	46,6	45,8
$a = \frac{\%Hb - \%H}{\%H - \%Ha}$			
a – kg de água a adicionar por kg de mistura (b)	0,3044	0,1877	0,2044

O facto de ainda se ter de adicionar água à mistura poderia suscitar dúvidas na medida em que as lamas possuem um teor muito elevado de água, o que supostamente compensaria os níveis reduzidos de humidade dos agentes condicionantes. Os cálculos demonstram o contrário, pelo que este é um aspecto que deve ser tido em consideração.

7.1.6.4. Cálculo das dimensões das pilhas de compostagem e consequente área de implantação

O cálculo das pilhas de compostagem foi realizado para os 3 sistemas seleccionados, considerando como agente de suporte os resíduos florestais. Isto porque face aos resultados obtidos na prospecção dos resíduos agro-industriais produzidos na região, se verificou que a quantidade produzida dos restantes resíduos seria manifestamente inferior face à quantidade de lama, sendo que aqueles com maior potencial de produção seriam os de origem florestal. Por outro lado, um dos materiais que pode ser adquirido para ser utilizado como substitutivo seria a casca de pinheiro cuja origem e propriedades são semelhantes à dos resíduos florestais. Consideraram-se as quantidades de lamas produzidas no ano 2007/2008 (M_{lamas}) e a lama de projecto (M_{lp}), existindo assim a possibilidade de fasear a construção. As dimensões de trabalho da maquinaria a utilizar estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Equipamento volteador e dimensões de trabalho.

Equipamento	Modelo	Largura de trabalho (m)	Altura de trabalho (m)
Volteador acoplado a tractor agrícola	Komptech Topturn 300	3,0	1,6
Volteador Autónomo	Komptech Topturn X53	5,0	2,4
Canal	Transformcompost Turner	3,0	2,4

O tempo de retenção é outro parâmetro que deve ser determinado experimentalmente. Os valores adoptados são por isso idênticos aos utilizados em instalações semelhantes (Werf, 2005) (Allan, 2001), adicionando-se um pequeno acréscimo a cada etapa de modo a que os cálculos sejam mais conservadores. Os resultados estão apresentados na Tabela 29. Para facilitar a leitura da informação, apresentam-se os dados introduzidos a azul e a **vermelho** os resultados obtidos.

Tabela 29 - Área necessária para a degradação activa e maturação.

	Unidades	Volteador acoplado a tractor agrícola		Volteadora autónoma		Canal	
		MI _{amas}	MI _p	MI _{amas}	MI _p	MI _{amas}	MI _p
Massa de Lama/ano	kg	4013000	7015000	4013000	7015000	4013	7015000
Massa de Lama/dia	kg	10995	19219	10995	19219	10995	19219
Massa de meio de suporte/dia	kg	12811	22394	12811	22394	12811	22394
ρ lama	kg/m ³	980	980	980	980	980	980
ρ meio de suporte	kg/m ³	207	207	207	207	207	207
Volume de lama/dia	m ³	11,2	19,6	11,2	19,6	11,2	19,6
Volume de meio suporte/dia	m ³	62,0	108,3	62,0	108,3	62,0	108,3
Volume total/dia	m ³ /d	73,2	127,9	73,2	127,9	73,2	127,9
Degradação activa							
Tempo de retenção	dias	30	30	30	30	20	20
Volume	m ³	2195	3838	2195	3838	1464	2559
Largura	m	3,0	3,0	5,0	5,0	3,0	3,0
Altura	m	1,6	1,6	2,4	2,4	2,4	2,4
Comprimento	m	50	50	50	50	50	50
Área de secção	m ²	2,4	2,4	6	6	7,2	7,2
nº de pilhas		18,3	32,0	7,3	12,8	4,1	7,1
nº de pilhas arredondado		19	32	8	13	5	8
Área necessária pilhas	m ²	1520	2560	960	1560	750	1200
Espaçamento curto entre pilhas	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3
Espaçamento largo entre pilhas	m	2,5	2,5	2,5	2,5	-	-
Área pilhas + espaçamento	m ²	3070	5135	1685	2710	765	1335
Maturação							
Diminuição do volume de mistura a maturar	%	50	50	50	50	50	50
Volume a maturar/dia	m ³ /d	36,6	64,0	36,6	64,0	36,6	64,0
Tempo de retenção	dias	30	30	30	30	25	25
Volume a maturar	m ³	1097,7	1918,9	1097,7	1918,9	914,8	1599,1
Largura	m	3	3	5	5	3	3
Altura	m	1,6	1,6	2,4	2,4	2,4	2,4
Comprimento	m	50	50	50	50	50	50
Área de secção	m ²	2,4	2,4	6	6	7,2	7,2
nº de pilhas		9,1	16,0	3,7	6,4	2,5	4,4
nº de pilhas arredondado		10	17	4	7	3	5
Área necessária para pilhas	m ²	800	1360	480	840	450	750
Espaçamento curto entre pilhas	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3
Espaçamento largo entre pilhas	m	2,5	2,5	2,5	2,5	-	-
Área pilhas + espaçamento	m ²	1675	2810	905	1540	510	840
Total							
nº pilhas		29	49	12	20	8	13
Área ocupada	m ²	4745	7945	2590	4250	1260	2040

Observa-se que existe uma diferença substancial nas necessidades de espaço entre os diversos sistemas. A discrepância entre o sistema por volteador acoplado a um tractor agrícola e por volteador autónomo deve-se às dimensões de trabalho, mais reduzidas para o primeiro equipamento, uma vez que se mantiveram iguais as condições de funcionamento. No sistema em canal, apesar de as dimensões de trabalho serem inferiores à do volteador autónomo, os tempos de retenção são mais reduzidos, daí que o espaço ocupado seja quase metade do necessário para aquele equipamento. Excepto para o sistema em canal, de referir a importância do cálculo das áreas de espaçamento entre as pilhas, que chegam a ocupar entre a 40%-50% da área de implantação.

As áreas totais do sistema devem ainda incluir as áreas necessárias ao funcionamento dos equipamentos de trituração, crivagem, ensacamento e armazenamento temporário.

- Trituração – as dimensões do equipamento considerado correspondem ao Komptech Terminator R 3400 eléctrico:

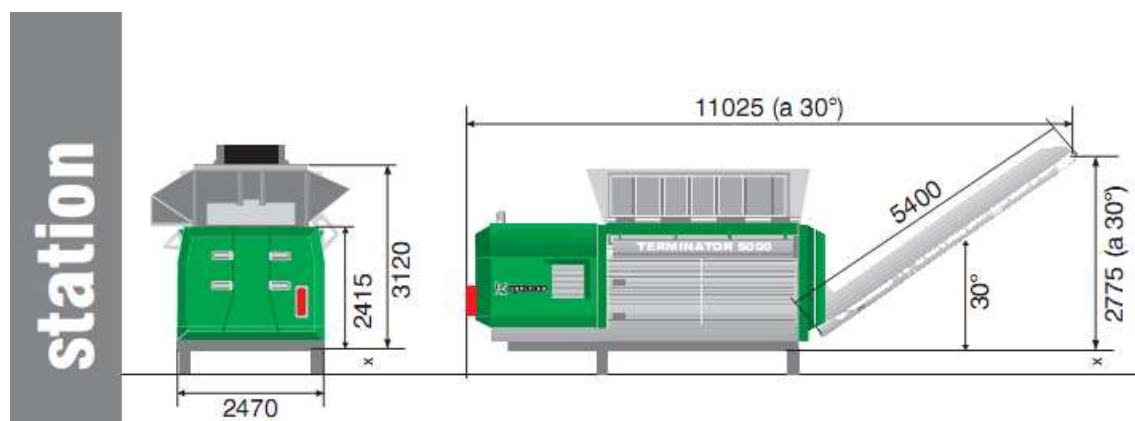


Figura 22 - Triturador Komptech R 3400

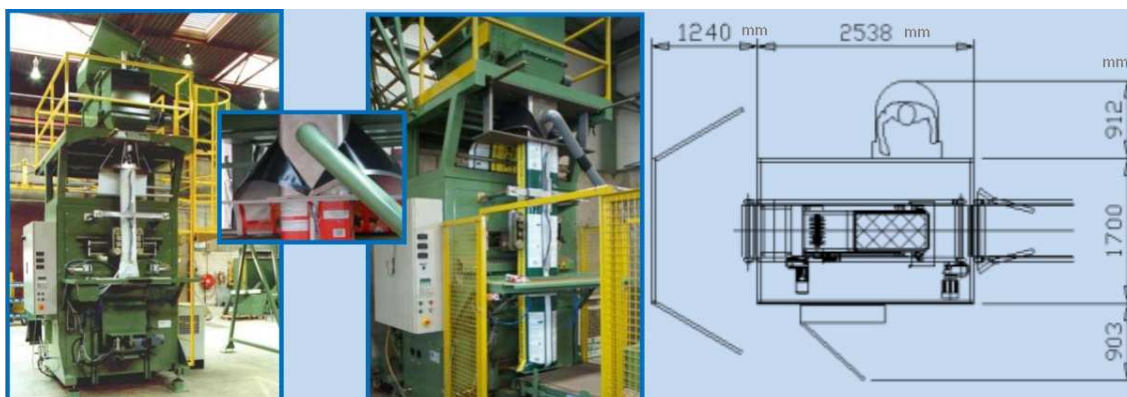
Considerando uma zona tampão em torno do equipamento de 2 metros e da zona de descarga de 4 m, obtém-se uma área total de 80 m².

- Crivagem do composto – Komptech Primus:



Considerando uma distância de 2 m em torno do equipamento, a área ocupada é igual a 140 m².

- Ensacagem do composto – Automatic bagging machine ASV80:



Considerando uma distância de 2 m em torno do equipamento, a área ocupada é igual a 55 m².

- Armazenamento temporário - Tabela 30
 - o Lamas – 7 dias.
 - o Meio de suporte – 14 dias.
 - o Composto – 2 meses de produção.
 - o Altura máxima de armazenamento – 3 m.

Tabela 30 - Área dedicada a armazenamento temporário.

	(m ³ /d)	Dias	Total (m ³)	Área (m ²)
Lamas	19,6	7	137	46
Meio de suporte	108,3	14	1516	505
Composto*	51,18	60	3071	1024
Área total				1575

*Admitindo 40 % do volume diário de mistura que entra para compostagem.

A área total de implantação de cada sistema está apresentada na Tabela 31.

Tabela 31 - Área total de implantação do sistema.

	Unidades	Volteador acoplado a tractor agrícola	Volteador autónomo	Canal
Trituração	m ²	80	80	80
Crivagem	m ²	140	140	140
Ensacamento	m ²	55	55	55
Armazenamento temporário	m ²	1575	1575	1575
Total Parcial	m ²	1850	1850	1850
Total compostagem	m ²	7945	4250	2040
Total	m ²	9795	6100	3890

Novamente se verifica a importância do cálculo das áreas associadas às operações complementares que são indispensáveis ao funcionamento do sistema, variando a sua contribuição para a área total, num valor entre os 20%-50%, sendo necessários em todos os sistemas.

7.1.6.5. Cálculo das necessidades de arejamento do sistema em canal

O cálculo do arejamento é realizado segundo o procedimento apresentado no capítulo 4.5, para a mistura de lamas e resíduos florestais. O teor em lenhina para cada material foi retirado da bibliografia (Epstein, 1997) sendo a fracção biodegradável calculada por meio da expressão 2. As propriedades dos materiais em estudo estão apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 - Propriedades dos materiais necessárias ao cálculo do arejamento.

Parâmetro	Unidades	Lamas	Resíduos florestais
Massa/dia	kg	19219	22394
ts	-	0,16	0,77
vs	-	0,71	0,85
Teor em lenhina	%	6,9	27,8
bvs	-	0,64	0,05

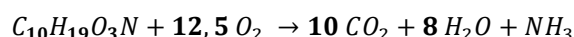
Admitiu-se que o ar ambiente possui uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa de 75%. O gás sai saturado da pilha a uma temperatura de 55 °C. A pressão de saturação do vapor de água, pressão de vapor e humidade específica foram calculados para as condições de entrada e saída segundo a expressão 8, 9 e 10, e estão apresentadas na Tabela 33.

Tabela 33 - Cálculo da humidade específica do ar de entrada e de saída.

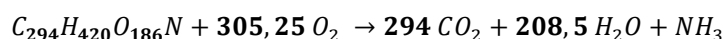
	Unidades	Valor
P_{atm}	mm Hg	760
T_e	°C	20
Φ_e	-	0,75
$Psat_e$	mm Hg	18,10
Pv_e	mm Hg	13,6
w_e	kg água/kg ar seco	0,0113
T_s	°C	55
Φ_s	-	1
$Psat_s$	mm Hg	118,3
Pv_s	mm Hg	118,3
w_s	kg água/kg ar seco	0,1147

- Cálculos das necessidades estequiométricas:

Lama



Resíduo florestal (madeira)



A Tabela 34 apresenta o cálculo da massa de O_2 a fornecer por massa de *bvs* de material (X_i), bem como o calor libertado por massa de mistura (**qmm**) (expressão 4).

Tabela 34 - Cálculo de calor libertado por massa de mistura a compostar.

	Unidades	Lama	Resíduo florestal
nº moles do material	kmol	1	1
Massa molar do material	kg/kmol	201	6938
Massa <i>bvs</i> de material	kg	201	6938
nº moles O_2	kmol	12,5	305,25
Massa molar do O_2	kg/kmol	32	32
Massa de O_2	kg	400	9768
X_i	kg O_2 /kg massa <i>bvs</i>	1,99	1,41
q_{mmi}	kcal/kg material <i>i</i>	469,3	155
qmm	kcal/kg mistura	624,3	

A Tabela 35 apresenta os cálculos intermédios que permitem obter o valor de massa a introduzir na pilha por unidade de mistura a biodegradar (expressão 11).

Tabela 35 - Cálculo da massa de ar a introduzir na pilha por massa de mistura a biodegradar.

	Unidades	Valor	Expressão
w_s	kg água/kg ar seco	0,1147	-
w_e	kg água/kg ar seco	0,0113	-
h_v	kcal/kg água °C	585,8	-
q_v/m_{as}	kcal/kg ar seco	60,6	(5)
T_s	° C	55	-
T_e	° C	20	-
h_{va}	kcal/ kg água °C	0,44	-
q_{va}/m_{as}	kcal/kg ar seco	1,77	(6)
h_a	kcal/ kg ar	0,24	-
q_a/m_{as}	kcal/kg ar seco °C	8,4	(7)
qmm	kcal/kg mistura	624,3	-
Y	kg ar/kg mistura	8,8	-

Verifica-se que por cada kg de mistura a compostar por dia é necessário introduzir 8,8 kg de ar. Assumindo uma densidade do ar igual a $1,20 \text{ kg/m}^3$, tem-se que é necessário introduzir por dia $7,33 \text{ m}^3$ ar/kg mistura a compostar (Tabela 36).

Tabela 36 - Caudal de ar a introduzir no sistema de compostagem em canais.

	Unidades	Valor
Massa de mistura por dia	kg	41 614
Caudal diário de ar por massa de mistura	m ³ ar/kg mistura	7,33
Caudal total de ar	m ³ /dia	305 030
Caudal total de ar	m³/min	211

7.1.6.6. Estimativa dos custos de implantação associados a cada um dos sistemas

A Tabela 37 apresenta os itens considerados na avaliação dos custos para cada sistema.

Tabela 37 - Itens considerados na avaliação dos custos para cada sistema.

	Pilhas revolvidas	Canal
Aquisição do terreno	+	+
Plataforma de trabalho	+	+
Cobertura rígida	+	+
Cobertura geotêxtil	+	-
Vedação	+	+
Pá carregadora	+	+
Triturador	+	+
Volteador	+	-
Volteador automático	-	+
Ventilador de arejamento	-	+
Crivador	+	+
Ensacador	+	+

(+) Considerado; (-) não considerado.

Os valores relativos a maquinaria foram preferencialmente obtidos através do contacto directo com o fabricante ou representante da marca, procurando-se obter ainda informação relativa aos custos de operação.

Os custos da obra de construção civil foram fornecidos por uma construtora (CCA, 2009). Apesar de representarem apenas uma estimativa, permitem contudo obter uma ordem de grandeza dos custos associados a cada opção.

Aquisição do terreno

O custo de aquisição do terreno foi considerado independente da localização da zona na região de Trás-os-Montes e Alto Douro, mas classificado como terreno agrícola, cujo preço está estimado em 2,5 €/m² (APVC, 2009).

Custo da obra de construção civil (no ano 2009)

- Plataforma de betão: 120 €/m²
 - o Movimento de terras – desmatação, regularização do terreno, escavação e abertura de caixa.
 - o Massame de betão e plataforma com 0,15 m de betão com malhasol incorporada.
- Cobertura rígida: 175 €/m²
 - o Cobertura em chapa metálica, apoiada em estrutura constituída por asnas e madres, suportada por pilares metálicos fixados a maciços de betão. Altura livre igual a 5 m.
- Canais: 300€/m³ de betão armado
 - o Canais em betão armado de 2,4 m de altura, 0,30 m de espessura, e 3 metros de distância entre muros, com 3 tubagens em PVC por canal para a realização do arejamento.
- Vedação: 40 €/m
 - o Vedação em rede de malha de 50x50mm em arame plastificado de 2 m de altura.

Cobertura geotêxtil

A cobertura das pilhas de compostagem com uma cobertura geotêxtil de polipropileno impede que a chuva se infiltre nas pilhas, permitindo contudo as trocas gasosas. Assim, é assegurado o correcto arejamento das pilhas reduzindo a produção de lixiviados e a perda de nutrientes. As coberturas são certificadas como inertes podendo ser posteriormente recicláveis. Têm um período mínimo de vida de 3 anos, sendo resistentes aos raios ultra violeta e quimicamente estáveis nas diferentes gamas de pH. O *Toptex* vendido pela empresa *TenCate* é vendido em rolos de 50 m de comprimento por 4, 5 ou 6 m de largura.

- Preço para Portugal: 1,40 €/m² (Wallnöfer, 2009).

Maquinaria

Da maquinaria necessária ao processo e apresentada na Tabela 38 apenas não se obtiveram dados reais relativos à ensacagem. Esta é também uma opção de investimento que deve ser ponderada, na medida em que parte da produção pode ser vendida a granel, e por isso carregada directamente em camião pela pá carregadora, ou embalada e vendida em embalagens de quantidades reduzidas. É provável que inicialmente os pequenos consumidores não tenham apetência para comprar um produto desconhecido, pelo que no período inicial sejam os agricultores os principais escoadores do composto.

Tabela 38 - Custo da maquinaria utilizada na compostagem.

	Marca/Modelo	Rendimento	Custo de aquisição	Referência
Volteador acoplado a tractor	Komptech Topturn 300	500 m ³ /h	60 000 €	(Ecopoda, 2006)
Tractor	New Holland TDD 95 DT	-	27 000 €	(Parma, 2009)
Volteador autónomo	TopTurn X53	Até 3500 m ³ /h	298 000 €	(Varejão, 2009)
Volteador automático (canal)	Transformcompost Turner	Até 35 000 ton/ano	550 000 \$ 390 000 €* 390 000 €*	(Paul, 2009)
Ventilador	METEC-CMR-2271-4T	577 m ³ /min	3 300 €	(Oliveira, 2007)
Triturador	Komptech Termintator 3400 eléctrico	Até 45 ton/h	285 000 €	(Varejão, 2009)
Separador/ Crivo	Komptech Primus	Até 70 m ³ /h	95 000 €	(Varejão, 2009)
Ensacagem	Slootweg - automatic bagging machine ASV80	nd.	nd.	nd.
Pá carregadora	Doosan DL 300		95 000 €	(Tuecherer, 2009)

*À taxa de câmbio de 7 de Junho de 2009

7.1.6.7. Proposta de localização da unidade de compostagem

Cálculo das distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a instalação da unidade de compostagem

Como descrito no procedimento para o desenvolvimento da fase 1, em primeiro lugar definiram-se os pontos possíveis para a instalação da unidade de compostagem. A marcação dos pontos foi realizada criando uma dispersão o mais uniforme possível ao longo da área em estudo, providenciando que cada local contido no mapa distasse no máximo 5 km, em linha recta, até um possível ponto de implantação. Isso foi assegurado mediante a introdução de um *buffer* de 5 km em cada ponto introduzido. No total foram introduzidos 44 pontos, numerados de [0-43]. A Figura 23 apresenta os pontos sujeitos a avaliação e a reunião de todos os *buffers* criados.

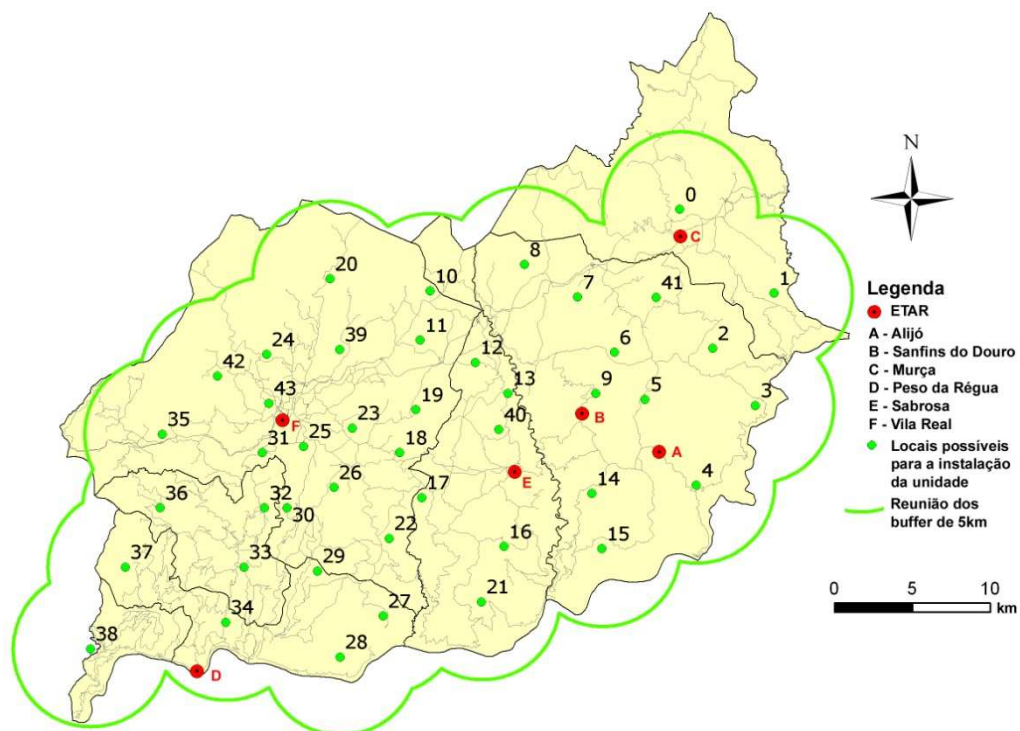


Figura 23 - Locais considerados como possíveis para a implantação da unidade de compostagem e sujeitos a avaliação.

A extracção da informação gerada no SIG permite obter as distâncias entre os pontos possíveis de instalação e cada uma das ETAR. Esta informação está exemplificada para os pontos 0 e 43 na Tabela 39, estando totalmente apresentada no Anexo D.

Tabela 39 - Exemplo da apresentação da informação relativa às distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem.

Facility ID	Incident ID	Lenght (m)	Lenght (km)
0	Peso da Régua	57427	57
0	Sanfins do Douro	30373	30
0	Alijó	24767	25
0	Murça	2858	3
0	Vila Real	36351	36
0	Sabrosa	31404	31
43	Peso da Régua	24920	25
43	Sanfins do Douro	32336	32
43	Alijó	37049	37
43	Murça	34428	34
43	Vila Real	1858	2
43	Sabrosa	21149	21

Para obter o local que minimize as distâncias entre as ETAR basta somar para cada ponto as distâncias, e procurar o menor valor resultante desse somatório. A Tabela 40 apresenta o resultado, ordenado por ordem crescente, da soma dos valores parciais de distância para cada ponto, do qual

resulta que o ponto que minimiza as distâncias entre as ETAR é o ponto nº 17, sendo que o ponto nº 37 seria aquele que maximizaria as distâncias.

Tabela 40 - Ordenação crescente dos somatórios das distâncias entre os pontos possíveis para a instalação da unidade e as ETAR.

Ponto nº	Σ km	Ponto nº	Σ km	Ponto nº	Σ km	Ponto nº	Σ km
17	120	5	141	30	159	3	195
40	122	6	141	4	162	35	195
13	126	22	142	41	162	21	196
18	128	19	143	2	167	20	200
12	131	10	145	24	171	34	202
9	133	7	152	25	171	33	206
23	134	43	152	15	178	1	219
14	136	16	155	27	180	36	229
8	138	31	156	0	183	28	233
11	138	39	157	42	186	38	261
26	139	29	159	32	186	37	273

O local de implantação da unidade não corresponde contudo ao ponto que minimiza as distâncias às ETAR, mas sim ao local a encontrar por meio da aplicação do procedimento correspondente à fase 2. Assim, considerando as distâncias determinadas na fase 1 e exemplificadas na Tabela 41, a quantidade de lama de projecto para cada ETAR, e admitindo que o factor de ponderação dos custos de transporte (simbolicamente valorados como 1) é independente da localização geográfica das ETAR e que por isso os custos apenas dependem da distância percorrida e da quantidade de lama transportada, obtêm-se como solução da expressão 29 os resultados exemplificados na Tabela 41, para os pontos 0 e 43, e que estão apresentados no Anexo D.

Tabela 41 - Exemplo do cálculo de (α).

Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton)	c (um./km.ton)	α (um.)
0	Peso da Régua	57	1388	1	79708
0	Sanfins do Douro	30	134	1	4070
0	Alijó	25	160	1	3963
0	Murça	3	159	1	454
0	Vila Real	36	4805	1	174668
0	Sabrosa	31	369	1	11588
Σ (α)					274452
43	Peso da Régua	25	1388	1	34589
43	Sanfins do Douro	32	134	1	4333
43	Alijó	37	160	1	5928
43	Murça	34	159	1	5474
43	Vila Real	2	4805	1	8928
43	Sabrosa	21	369	1	7804
Σ (α)					67056

um. – unidade monetária

A Tabela 42 apresenta o resultado, ordenado por ordem crescente, do somatório de (α) para cada ponto possível, onde se observa que o local de implantação da unidade de compostagem que implicaria menores custos seria o ponto 43.

Tabela 42 - Ordenação crescente dos somatórios de (α) para cada ponto possível de instalação da unidade de compostagem.

Ponto nº	$\Sigma(\alpha)$ (um.)	Ponto nº	$\Sigma(\alpha)$ (um.)	Ponto nº	$\Sigma(\alpha)$ (um.)	Ponto nº	$\Sigma(\alpha)$ (um.)
43	67056	29	118337	36	149446	9	234606
31	68043	30	118337	13	160934	14	239959
23	81341	19	118411	27	161839	21	251690
26	90356	22	118580	40	171468	5	255214
24	93143	17	121005	16	184789	41	266992
25	93143	33	121459	8	185072	2	273191
39	98083	11	122564	37	197735	0	274452
32	99876	34	133560	28	202861	4	285452
18	101770	20	135410	38	212598	15	290802
42	107631	12	141626	6	220381	3	302498
35	113113	10	142081	7	221240	1	325690

Na Figura 24 está representado o ponto onde seria implantada a unidade de compostagem bem como o caminho mais curto entre esse local e as ETAR. A obtenção deste local era previsível uma vez que a ETAR de Vila Real representa a maior parte da quantidade de lama produzida, sendo natural que os pontos subsequentes ao ponto nº 43 se encontrem também nas proximidades dessa mesma ETAR. Como seria de esperar, em situação oposta e mais desvantajosa encontram-se os pontos situados nas extremidades dos concelhos, nomeadamente os pontos nº 1, 3 e 15.

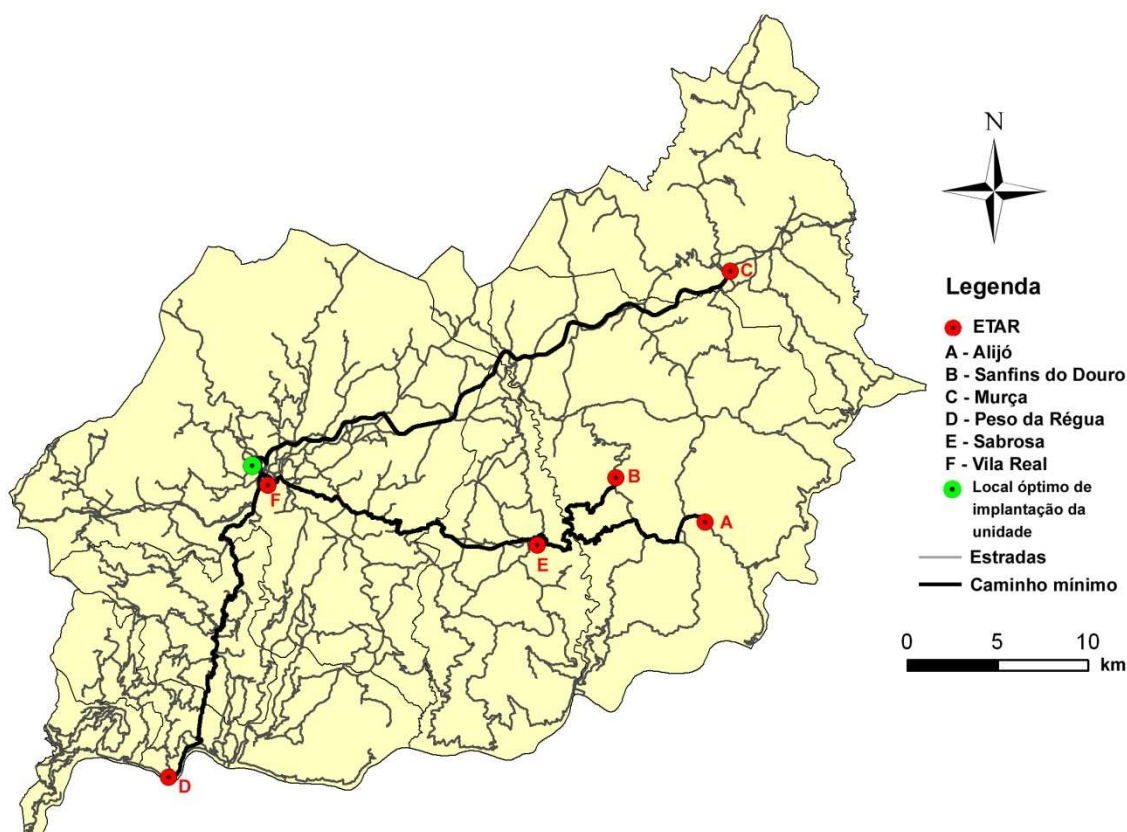


Figura 24 - Local proposto para a instalação da unidade de compostagem.

Cálculo dos custos de transporte

Os custos de transporte associados à instalação da unidade de compostagem advêm do transporte das lamas e do transporte dos materiais a compostar. A quantificação destes gastos foi realizada considerando duas alternativas:

- Transporte adjudicado a uma transportadora;
- Transporte realizado pela empresa.

Transporte adjudicado a uma transportadora

A avaliação desta possibilidade pressupõe um pedido de orçamento de transporte de distintos materiais junto de uma empresa do ramo, que colabora com a ATMAD. Para cada ETAR foi pedido um custo específico, considerando que as distâncias ao ponto de chegada definido variavam entre 17 e 30 km. A resposta para o conjunto de circuitos apresentados implicaria um custo de 45 €/ton, não considerando directamente as distâncias entre os pontos de carga e descarga. A Tabela 43 apresenta os valores decorrentes do transporte das lamas para a unidade, considerando a quantidade de lamas produzida em 2008 e aquela que seria produzida num cenário de utilização da capacidade máxima das ETAR.

Tabela 43 - Custo do transporte anual anual das lamas desde as ETAR até à unidade de compostagem, segundo os dados do orçamento apresentados pela empresa transportadora.

Cenário	Quantidade de lamas (ton/ano)	Custo de transporte (€/ton)	Total (€/ano)
Lamas 2007/2008	4013	45	180 585
Lamas de projecto	7015	45	315 675

Observa-se que segundo esta estimativa, e só no transporte de lamas, a empresa pagaria mais do que se mantivesse as opções de gestão actualmente praticadas, pelo que esta não é uma opção viável.

Transporte realizado pela empresa

A responsabilidade no transporte dos materiais até à unidade de compostagem exige que a empresa adquira um veículo que permita executar essa tarefa. A solução passa pela aquisição de um camião equipado com um sistema de carga constituído por um braço de carga central, frequentemente denominado *Ampliroll*. No caso dos resíduos agro-industriais, parqueia-se em cada ponto de carga uma caixa metálica, para onde os resíduos vão progressivamente sendo depositados e acumulados. Quando a caixa estiver cheia o camião leva uma vazia e realiza a troca. Para as lamas, armazenadas nos silos das ETAR, o camião desloca-se ao local de carga e executa a descarga dos silos, não havendo necessidade de parquear as caixas nas ETAR. A Figura 25 apresenta o tipo de camião e de caixas necessárias ao transporte dos materiais.



Figura 25 - Colocação da caixa em cima do chassis e camião com caixa de 25 m³ (Sounete, 2009).

Os custos a considerar para esta opção incluem a aquisição do camião, a instalação do braço de carga e das caixas e os gastos com combustível. Os custos de transporte são calculados com base na quilometragem. Esta informação está apresentada na Tabela 44.

Tabela 44- Custos associados à gestão do transporte das lamas.

	Modelo	Aquisição	Referência
Camião	MAN TGS 35360 8x4 BL	95 000 €	(Miranda, 2009)
Braço de Carga	IT20/6L	25 000 €	(Figueiredo, 2009)
Caixa	30 (m ³)	4 500 €	(Figueiredo, 2009)
Camião €/km = 0,50 €*			

* com base num consumo de 50L/100 km e preço do gasóleo = 1€/L (Rvolta, 2009)

A MAN possui ainda contractos de custo variável para a manutenção e reparação dos veículos, considerando-se neste estudo um custo mensal de 360€.

Para o cálculo do custo anual de transporte consideram-se as distâncias das ETAR ao ponto 43⁶, ponto óptimo para a localização, o valor de lama produzida em cada instalação, e a carga do camião. Admitiu-se a compra de duas caixas que têm uma capacidade de 30 m³, considerando-se contudo para efeitos de cálculo que em cada carga se transportam 25 m³ de lama, ou seja, 24,5 ton. Considerou-se ainda que os custos de aquisição do equipamento se reflectem directamente no custo de transporte (incorporação desse custo num período de 10 anos). Os resultados estão apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Custo de transporte por ano.

Unidade de compostagem	ETAR	Distância (km)	Mlp (ton/ano)	Nº viagens	Σ km/ano	Custo €/ano
43	Peso da Régua	25	1388	57	2850	1425
43	Sanfins do Douro	32	134	6	384	192
43	Alijó	37	160	7	518	259
43	Murça	34	159	6	408	204
43	Vila Real	2	4805	197	788	394
43	Sabrosa	21	369	16	672	336
Total Parcial						2810
Manutenção e reparação / ano						4320
Aquisição do equipamento / ano						12900
Total						20030

Os custos de transporte realizados pela empresa representam um encargo substancialmente inferior quando comparado com uma transportadora, pelo que deve ser uma opção a considerar seriamente.

7.1.6.8. Balanço económico do funcionamento da unidade

No cenário em análise considera-se que existe uma afluência contínua de lamas e resíduos florestais à unidade e que o composto produzido é totalmente escoado.

Investimento

A Tabela 46 apresenta os custos de investimento para cada um dos sistemas considerados. De referir que se considerou que em todos os sistemas, a zona de armazenamento temporário, trituração, crivagem e ensacamento se realizam numa zona protegida por uma cobertura rígida.

Nos custos de construção dos canais foi necessário considerar o volume ocupado por cada murete do canal, sendo o número de muretes igual ao número de canais mais um.

Nos sistemas em que se opta por utilizar a cobertura geotêxtil, teve-se em consideração a área lateral e o número de pilhas, e não a área de compostagem. Uma vez que a durabilidade mínima das telas é de 3 anos, incluiu-se no custo a quantidade suficiente de geotêxtil para um período de 20 anos.

⁶ Uma vez que o camião estará parqueado na unidade de compostagem, a distância a percorrer pelo camião é o dobro da distância real entre as ETAR e a unidade.

Para o cálculo do perímetro da vedação, considerou-se uma área de implantação de forma rectangular fixando uma das dimensões em 60 m.

Tabela 46 - Investimento necessário para instalar a unidade.

	Unidades	Custo unitário	Volteador acoplado		Volteador autónomo		Canal
			CG	CR	CG	CR	
Área de compostagem	m ²	-	7 945	7 945	4 250	4 250	2 040
Área de operações complementares	m ²	-	1 850	1 850	1 850	1 850	1 850
Compra do terreno	€	2,5 €/m ²	24 488	24 488	15 250	15 250	9 725
Plataforma de trabalho	€	125 €/m ²	1 175 400	1 175 400	732 000	732 000	466 800
Construção dos canais	€	300 €/m ³ betão	-	-	-	-	151200
Cobertura rígida	€	175 €/m ²	323 750	1 714 125	323 750	1 067 500	680 750
Cobertura geotêxtil	€	1,40 €/m ²	105 316		67 925		
Vedação	€	40 €/m	8 930	8 930	6 467	6 467	4 993
Total obra	€	-	1 637 884	2 922 943	1 145 391	1 821 217	1 313 468
Pá carregadora	€	-	95 000	95 000	95 000	95 000	95 000
Triturador	€	-	285 000	285 000	285 000	285 000	285 000
Volteador	€	-	87 000	87 000	298 000	298 000	390 000
Ventilador	€	-	-	-	-	-	3 300
Crivador	€	-	95 000	95 000	95 000	95 000	95 000
Total maquinaria	€	-	562 000	562 000	773 000	773 000	868 300
Investimento total	€	-	2 199 884	3 484 943	1 918 391	2 594 217	2 181 768

CG – Cobertura geotêxtil; CR – Cobertura rígida

Observa-se que a opção que menor investimento implica é um sistema constituído por um volteador autónomo, estando as pilhas cobertas pela cobertura geotêxtil.

Em todos os sistemas se verifica que a obra de construção civil é responsável pela maioria dos gastos, entre 60 % a 80 %, advindos principalmente da plataforma de trabalho e da instalação de uma cobertura rígida. Daí que no sentido de se reduzirem custos, se possa optar por uma plataforma de trabalho mais simples e mais barata, em asfalto por exemplo. No caso da cobertura rígida a solução passa por reduzir as áreas de armazenamento temporário de matéria-prima e de composto, o que implica uma negociação com os fornecedores e com os potenciais clientes no sentido de escoar o produto rapidamente.

Ao nível da maquinaria também se verificam preços elevados ao nível do triturador e do volteador autónomo. Efectivamente estes preços numa situação real são mais reduzidos, uma vez que os equipamentos para os quais se obtiveram preços têm um desempenho muito superior ao necessário. Exemplificando, o triturador tem uma capacidade de 45 ton/h, e a massa de meio de suporte a processar por dia é inferior a 25 ton. Da mesma forma, o volteador autónomo tem uma capacidade de trabalho de 3500 ton/h para um volume a voltar de 5000 ton, o que significa que uma máquina de menor capacidade, de inferior investimento e custo de operação poderia ser utilizada.

É imprescindível não esquecer que nenhum dos custos foi objecto de negociação. Assim, e considerando todos as condicionantes desta estimativa, conclui-se que o custo apresentado é significativamente superior aquele que pode ser obtido numa situação real.

Exploração da unidade

Os custos de operação foram calculados considerando o consumo de combustível/electricidade por hora de trabalho do equipamento e o período de funcionamento admitido para cada máquina. Acrescentou-se a este cálculo o valor a pagar a dois funcionários responsáveis pela gestão do sistema e pelo transporte das lamas até à unidade, bem como a aquisição dos resíduos florestais. Admitiu-se uma presença laboral dos trabalhadores na unidade 312 dias por ano. Assim, os pressupostos para o cálculo dos custos de operação incluíram:

- Custo de transporte apresentado na Tabela 45.
- Compra dos resíduos florestais – 35 €/ton.
- 2 Funcionários - Salário igual a 600 € mensais e pagamento de 14 meses/ano.
- Volteador acoplado a tractor agrícola – Volteadas a cada 3 dias. Capacidade de 500 m³/hora.
- Volteador autónomo – Viragens a cada 3 dias. Capacidade de 3500 m³/hora.
- Volteador automática – Cada dia durante 365 dias por ano. Capacidade de 500 m³/h.
- Funcionamento do ventilador durante 24 h por dia, 365 dias por ano.
- Crivador – volume de composto a crivar igual a 50% do volume de mistura a compostar por ano (23348 m³) e uma capacidade de processamento de 70 m³/h.
- Triturador – Volume de resíduos florestais a processar igual a 8174 toneladas por ano e uma capacidade de processamento de 45 toneladas por hora.
- Pá carregadora – admitiu-se um total de 3 horas de trabalho por dia.

A Tabela 47 apresenta o número de horas anuais de funcionamento de cada equipamento

Tabela 47 - Número de horas de anuais de funcionamento do equipamento.

	Material a processar	Unidades	Capacidade do equipamento	Unidades	Horas de funcionamento por ano
Volteador acoplado a tractor agrícola	5 757	m ³ de mistura na unidade	500	m ³ /h	1390
Volteador autónomo	5 757	m ³ de mistura na unidade	3500	m ³ /h	199
Volteador automático	4 158	m ³ de mistura na unidade	500	m ³ /h	3 036
Ventilador	-	-	-	-	8 760
Crivador	23 348	m ³ /ano	70	m ³ /h	334
Triturador	8 174	ton/ano	45	ton/h	182
Pá carregadora	admite-se uma utilização de 3 h/dia				936

Na Tabela 48 está apresentada a informação relativa ao consumo energético e respectivo custo de trabalho por hora de cada máquina. A obtenção dos consumos energéticos deve ser obtida

preferencialmente junto do fornecedor do equipamento, sendo que apenas se recebeu esta informação do fornecedor do volteador automática. Assim os valores apresentados correspondem a equipamentos de motorização igual ou similar aos utilizados. O preço por litro de gasóleo foi considerado igual a 1€ e da electricidade igual 0,07 €/kwh.

Tabela 48 - Consumo energético do equipamento em utilização na unidade

Equipamento	Motorização	Potência (kw)	Consumo (l/h)	Custo unitário €/h trabalho	Referência do consumo
Tractor agrícola	Diesel	67	19	19	(Holland, 2009)
Volteador autónomo	Diesel	242	51	51	(CD300M, 2009)
Volteador automático	Diesel	111	29	29	(Paul, 2009)
Ventilador	Eléctrico	11	-	1,3*	(METEC, 2009)
Triturador	Eléctrico	160	-	18,7*	(Komptech, 2009)
Crivador	Diesel	38	6,5	6,5	(Power, 2009)
Pá carregadora	Diesel	164	15	15	(PEC, 2009)

*Admitindo um rendimento energético do equipamento igual a 60%.

Na Tabela 49 estão inscritos os custos anuais de operação da unidade.

Tabela 49 - Custos anuais de operação da unidade

	Custo unitário €/h de trabalho	h/ano	Volteador acoplado a tractor agrícola (€/ano)	Volteador autónomo (€/ano)	Canal (€/ano)
Recolha e transporte dos materiais até à unidade	-	-	20 030	20 030	20 030
Compra dos resíduos florestais	-	-	286 090	286 090	286 090
Gastos com funcionários	-	-	16 800	16 800	16 800
Total parcial	-	-	322 920	322 920	322 920
Tractor agrícola	19	1 207	26 410	-	-
Volteador autónomo	51	172	-	10 149	-
Volteador automático	31	3 035	-	-	88 044
Ventilador	1,3	8 760	-	-	11 242
Triturador	18,7	182	3 211	3 211	3 211
Crivador	6,5	334	3 397	3 397	3 397
Pá carregadora	15	936	14 040	14 040	14 040
Total	-	-	368 938	352 677	441 814

É interessante observar que o custo de associado à maquinaria representa uma pequena parte dos custos totais de operação, entre 8% a 27%. Efectivamente, a compra dos resíduos florestais, indispensável para o funcionamento do processo, representa mais de 65% dos custos totais, daí que uma tentativa de reduzir custos tem obrigatoriamente de considerar este aspecto. De realçar o reduzido impacto dos custos de transporte das lamas no custo total, confirmando que a opção de adquirir uma viatura e gerir este encargo é a mais indicada para a empresa.

O custo de operação da maquinaria é condicionado pelo revolvimento das pilhas, sendo o sistema em canal o que maiores gastos implica. Se por um lado o custo unitário de utilização do volteador autónomo é bastante elevado, a sua capacidade de trabalho também o é, daí que no final seja esta a opção mais vantajosa a nível de custos de operação.

Ganhos resultantes da venda do composto

O valor de venda a granel de produto resultante da compostagem de lamas de ETAR na única unidade de compostagem dedicada a este tipo de material em Portugal, na ETAR de Parada-Maia, ronda os 30 €/m³. Assim, considerando a produção de composto para venda igual a 40% do volume anual de mistura a compostar (18 678 m³), o potencial de ganhos é igual a 560 000 €/ano.

Balanço económico

O balanço dos custos, dos benefícios e do tempo mínimo necessário para a recuperação do investimento está apresentado na Tabela 50. A recuperação do investimento é calculada dividindo o valor do investimento pelo balanço anual.

Tabela 50 - Balanço económico da instalação e funcionamento da unidade de compostagem.

	Volteador acoplado a tractor agrícola	Volteador autónomo	Canal
Custos de operação (€/ano)	368.938	352.667	441.814
Potenciais ganhos (€/ano)	560.000	560.000	560.000
Balanço (€/ano)	191.062	207.323	118.186
Investimento (€)	2.199.884	1.918.391	2.181.768
Recuperação do investimento (anos)	12	10	19

Da análise da Tabela 50 retira-se que a opção mais vantajosa para a gestão das lamas da ETAR da zona em estudo é a opção por um sistema utilizando um volteador autónomo, sendo que para todas as opções consideração o balanço económico entre os custos de operação e os ganhos é positivo. No entanto o período de recuperação do investimento seria demasiado elevado para o sistema em canal, cerca de 19 anos, condicionando decisivamente a opção a escolher. No cálculo da recuperação do investimento considerou-se uma venda total do composto. Previsivelmente, este facto não ser verificará no início da actividade, uma vez que o produto é desconhecido no mercado, daí que seja necessário o investimento numa equipa de publicidade, promoção e comercialização do produto, aumentando assim o período necessário para recuperar o investimento.

7.2. Soluções tecnológicas que permitem diminuir a quantidade de microrganismos patogénicos presentes nas lamas de ETAR

No esgoto, os microrganismos patogénicos estão essencialmente associados aos sólidos insolúveis. No tratamento primário estes sólidos são concentrados, implicando assim que as lamas primárias possuam uma concentração de agentes patogénicos superior à da água residual. Os processos de tratamento biológicos das águas residuais vão reduzir o número deste tipo de microrganismos presentes, tanto na linha de tratamento líquida como na linha sólida, nomeadamente nas lamas secundárias. Essas etapas podem no entanto não ser suficientes para que as lamas não se apresentem como uma ameaça para a saúde pública e para o ambiente, e para que se possa fazer uma correcta valorização agrícola destas. Para que esta situação se verifique, é necessário que se cumpram os valores limites estabelecidos.

A Direcção Regional de Agricultura entre Douro e Minho impõe limites no que concerne à presença de duas bactérias indicadoras, a *Escherichia Coli* (NMP $\leq$ 1000/g de produto) e a *Salmonella sp* (negativo/25 g de produto).

A sobrevivência dos microrganismos existentes nas lamas pode ser influenciada por vários factores como pH, a temperatura, a presença de microrganismos competidores, o nível de humidade, a concentração de nutrientes e a presença de substâncias químicas inibitórias.

Os processos que demonstraram capacidade para eliminar e conter o crescimento dos microrganismos patogénicos dentro dos limites apresentados anteriormente, incluem tratamentos térmicos, químicos e processos para uma maior redução de patogénicos (PMRP) (US.EPA, 2003) (Carrington, 2001)

7.2.1. Tratamento térmico

Baseia-se na elevação da temperatura das lamas acima da gama térmófila (>45 °C). Tem em consideração as características da lama, nomeadamente a percentagem de sólidos, as exigências a nível de temperatura e o tempo de residência a essa mesma temperatura (Tabela 51).

Tabela 51 - Regimes de Tempo - Temperatura para tratamento térmico.

Regime	Características das lamas	Tempo - Temperatura requerida ¹
(A)	Mínimo de 7% de sólidos	$D = 131700000/10^{0,1400t}$
		$t \geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ²
		$D \geq 0,0139$ ³ (20min)
(B)	Mínimo de 7% de sólidos, pequenas partículas aquecidas por contacto com gases quentes ou um liquido imiscível	$D = 131700000/10^{0,1400t}$
		$t \geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
		$D \geq 1,74 \times 10^{-4}$ (15s)
(C)	Menos de 7% de sólidos e sujeita a tratamentos térmicos com tempos de contacto inferiores a 30 minutos.	$D = 131700000/10^{0,1400t}$
		$t \geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
		$1,74 \times 10^{-4} \leq D \leq 0,021$ (30min)
(D)	Menos de 7% de sólidos e sujeita a tratamentos térmicos com tempos de contacto mínimo de 30 minutos.	$D = 50070000/10^{0,1400t}$
		$t \geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
		$D \geq 0,021$

1- D = tempo em dias; t = temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

2- A restrição a temperaturas inferiores a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ é imposta devido à incerteza relativa à relação tempo-temperatura para temperaturas abaixo desse valor.

3- O tempo mínimo de 20 minutos é requerido para assegurar um aquecimento uniforme da lama.

As condições necessárias de tempo-temperatura, para uma lama mista que contenha uma quantidade de sólidos inferior a 7%, e para um tempo de residência superior a 30 minutos, estão apresentadas na Tabela 52. Observa-se um aumento exponencial no período de tempo necessário para atingir os objectivos em função da diminuição da temperatura.

Tabela 52 - Tratamento térmico de lamas, exigência de contacto Tempo-Temperatura.

T ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo
67	30 min
65	1 hora
60	4h 48 min
55	1 dia
50	5 dias

7.2.2. Tratamento térmico e químico

Este tratamento exige a exposição das lamas a condições agressivas de pH e temperatura:

- Elevação e manutenção por 72 horas do pH a valores superiores a 12;
- Manutenção da temperatura acima de $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período mínimo de 12 horas durante o período em que o pH é superior a 12;
- Secagem natural das lamas até 50% de sólidos depois do período de 72 horas de pH elevado.

Estas condições hostis, de elevado pH, elevada temperatura e reduzida humidade durante longos períodos, permitem a existência de um processo menos rígido para a relação tempo-temperatura, quando comparado com o tratamento térmico. A dosagem de cal que permite manter o $\text{pH} > 11$ por

um mínimo de 14 dias varia entre os 200-500 g de Ca(OH)_2 por kg de massa seca de lama (Gray, 2004).

A utilização de cal é um processo que implica um baixo investimento, mas que pode acarretar custos significativos de operação a menos que a compra de cal, por exemplo como pó de fornos de cimento, seja barata. Ao aumentar o volume de lamas produzidas terá também como consequência negativa um custo de transporte superior até ao local de valorização.

7.2.3. Processos para uma maior redução de patogénicos

Destacam-se ainda mais 7 processos, apresentados sucintamente, que permitem igualmente alcançar os objectivos pretendidos:

- Compostagem
- Secagem térmica
- Tratamento térmico II
- Pasteurização
- Digestão aeróbia termofílica
- Irradiação por raios beta ou gama

7.2.3.1. Compostagem

Para que a operação de compostagem seja considerada um *PMRP*, deve atingir as condições operatórias apresentadas na Tabela 53:

Tabela 53 - Condições mínimas de operação para que a compostagem possa ser considerada um *PMRP*.

Sistema de compostagem	Temperatura mínima a atingir	Tempo de residência
Sistema em Reactor	55 °C	3 dias consecutivos
Pilhas estáticas arejadas	55 °C	3 dias consecutivos
Pilhas revolvidas	55 °C	15 dias consecutivos e um mínimo de 5 viragens à pilha

Considerando que os requisitos de temperatura e tempo de contacto se aplicam a toda a pilha, as medições de temperatura para o sistema em reactor e de pilhas estáticas arejadas devem ser realizadas em diferentes pontos e profundidades da pilha, uma vez que o centro da pilha atingirá temperaturas superiores em relação às extremidades.

7.2.3.2. Secagem térmica

As lamas são secas por contacto directo ou indirecto com gases quentes para reduzir o teor de humidade para valores inferiores a 10%. A temperatura das partículas da lama excede 80 °C ou a temperatura do gás à saída do equipamento de secagem excede 80 °C.

7.2.3.3. Tratamento térmico II

O processo envolve o aquecimento das lamas líquidas sob pressão até uma temperatura mínima de 180 °C e um período de tempo curto, de cerca de 30 minutos. Destaca-se o processo Porteous e o processo Zimpro.

7.2.3.4. Digestão Aeróbia termofílica

As lamas líquidas são previamente espessadas, sendo necessário aumentar a eficiência de arejamento, podendo ainda utilizar-se oxigénio molecular em vez de ar. Existindo menor volume de lamas e menor caudal de ar, o que diminuiria as perdas de calor, o calor libertado pela oxidação biológica da matéria orgânica eleva a temperatura até 60 °C, podendo ainda ser complementado equipamento de aquecimento auxiliar. O processo deve funcionar em modo *batch*, de forma a minimizar possíveis contaminações das lamas já tratadas. A lama é assim eficazmente digerida por acção das altas temperaturas, exigindo-se um tempo de residência superior a 10 dias.

7.2.3.5. Pasteurização

Processo de aquecimento e manutenção da temperatura das lamas num limite mínimo de 70 °C e 30 minutos. O aquecimento pode ser realizado por permutação de calor ou injeção de vapor, sendo este último preferível na manutenção de uma temperatura constante.

Em teoria, a cal viva poderia ser utilizada para alcançar as condições exigidas para a pasteurização. A água das lamas e a cal formam hidróxido de cálcio gerando calor. A limitação desta utilização relaciona-se com a dificuldade em garantir que todo o volume de lamas atinja e mantenha a temperatura e o tempo de contacto requerido, quer por *deficit* de humidade ou perdas de calor. Para evitar problemas de re-inoculação o processo deve ser desenvolvido em modo batch.

7.2.3.6. Irradiação por raios beta ou gama

Os raios beta e gama são duas fontes potenciais de energia a utilizar na desinfecção de lamas de esgoto. Os raios gama são protões de grande energia produzidos por elementos radioactivos, como Cobalt 60 e Cesium 137. Os raios beta são electrões acelerados por potenciais eléctricos próximos de 1 milhão de volts.

A dosagem mínima para eliminar eficazmente os microrganismos é de 1 megarad, sendo que, apesar de eliminar os microrganismos, não destrói a matéria orgânica.

A diferença entre os 2 tipos de radiação prende-se com a sua capacidade de penetração, substancialmente superior para a radiação gama, implicando a utilização de radiação beta a irradiação de uma camada bastante fina de lamas.

7.2.4. Digestão anaeróbia termofílica

O processo mais comum de digestão anaeróbia é o mesofílico, com temperaturas de funcionamento próximas dos 35 °C. Apesar de estabilizar os sólidos e produzir um gás combustível, não origina uma lama com qualidade microbiológica aceitável para uma correcta deposição. Estudos mais recentes,

(León, 2002) indicam que um processo termofílico, constituído por duas etapas - uma primeira fase ácida mesofílica (35 °C) seguida de uma segunda fase termofílica e metanogénica, operado a 52 °C ou a 62 °C - permitiria produzir uma lama com um NMP de coliformes fecais $\leq 1000/\text{g}$ de lama.

7.2.5. Comentário às opções de redução de microrganismos patogénicos

Na sua maioria, as opções apresentadas anteriormente têm uma componente tecnológica bastante avançada, implicando um aquecimento das lamas até temperaturas bastante elevadas, e um substancial gasto de energia de origem fóssil. Para além destes custos, há ainda que considerar a necessidade de centralizar os tratamentos, e o investimento na aquisição e manutenção dos equipamentos. Estes gastos aplicam-se igualmente à solução de irradiação da lama, que, ainda que eficiente, implica a construção de instalações robustas e resistentes, dada a natureza do tratamento. A estabilização com cal pode acarretar custos decorrentes da compra da cal, implica a utilização de equipamento com necessidades de manutenção frequente e dispendiosa, e origina um volume superior de lamas a transportar, além de não estabilizar a matéria orgânica, pelo que, quando a concentração de cal diminuir, será provável que as lamas se tornem num produto instável, com as respectivas consequências negativas para o solo e para o desenvolvimento das plantas.

A questão chave é entender que com os processos aplicados anteriormente, para além dos gastos avultados que implicariam, o resultado final não seria diferente daquele que é obtido na maioria das ETAR a operar em Portugal. Logo, ter-se-ia um investimento que não produziria um produto com valor acrescentado e que pudesse trazer benefícios à empresa, uma vez que actualmente a sua valorização não é remunerada pelos agricultores.

Por fim, e pelo contrário, a compostagem permitiria produzir um produto final de qualidade superior, a partir de lamas co-compostadas com resíduos produzidos em actividades económicas de zonas circundantes, possibilitando assim, ainda que com um investimento moderado, a obtenção de benefícios económicos.

8. Conclusões

A gestão das lamas produzidas nas ETAR é um assunto de crescente importância e de grande actualidade, registando-se desde 1998 e em Portugal, um aumento significativo na população servida com drenagem e tratamento de águas residuais. Este incremento traduz-se num maior volume de água residual a tratar e de produção lamas, sendo a valorização agrícola a principal opção de gestão deste resíduo, a nível europeu e nacional.

As preocupações de índole ambiental e de saúde pública, resultantes da potencial presença nas lamas de microrganismos patogénicos, metais pesados e micropoluentes orgânicos restringem progressivamente esta prática.

Na região de Trás-os-Montes, as lamas produzidas nas ETAR pertencentes à rede do Vale do Douro Norte, apresentam níveis de contaminação microbiológica significativos, os quais necessitam de ser controlados para assim possibilitar a sua valorização agrícola, implicando contudo um aumento dos custos de gestão actualmente praticados.

Identificaram-se 4 materiais com potencial para serem utilizados como meio de suporte/agente condicionante na co-compostagem das lamas: engaço de uva, folhas de oliveira, resíduos florestais e serrim. O serrim, dada a sua fina granulometria, foi considerado como inapto para a compostagem uma vez que não favorece o aumento de porosidade nas pilhas. As quantidades de engaço de uva e de folhas de oliveira, geradas na zona e que foram aferidas, são insuficientes para sustentarem o processo, daí a escolha dos resíduos florestais como meio de suporte a utilizar. Estes apresentam propriedades físicas e químicas que favorecem o processo de compostagem, tendo um potencial de produção significativo.

Dos 3 sistemas alternativos de compostagem estudados, sugere-se a implantação de um sistema formado por pilhas de material revolvido por um volteador autónomo, estando cobertas por uma tela geotêxtil. A opção implica um investimento de cerca 2.000.000 € e uma recuperação do investimento num prazo mínimo de 10 anos. Os custos derivados da obra de construção civil são aqueles que têm mais influência no investimento, enquanto que a compra dos resíduos florestais aumenta significativamente o custo de operação.

A implantação do sistema deve ser o mais próximo possível da ETAR de Vila Real, minimizando assim os custos de transporte. Este, quando realizado internamente pela empresa, representa uma fracção muito reduzida dos custos de operação pelo que deve ser devidamente considerado.

Com a instalação de uma unidade de compostagem obtém-se uma solução que permite realizar o aproveitamento no solo da matéria orgânica e dos nutrientes contidos nas lamas, ao mesmo tempo que a gestão desse resíduo deixa de ser um encargo financeiro, convertendo-se numa fonte de rendimentos a médio prazo.

Os processos para o controlo dos microrganismos que foram identificados, para além dos gastos avultados que implicam, dão origem a um produto idêntico ao que é obtido na maioria das ETAR a operar em Portugal. Logo, ter-se-ia um investimento que não produziria um produto com valor

acrescentado e que pudesse trazer benefícios à empresa, uma vez que actualmente a sua valorização não é remunerada pelos agricultores.

Recomenda-se um estudo prévio numa instalação piloto para que sejam recolhidos os dados fundamentais relativos ao desenvolvimento do processo e que neste estudo foram retirados de bibliografia.

Por fim, sugere-se o alargamento do estudo da quantificação dos resíduos agro-industriais às zonas circundantes da área em estudo, no sentido de se obter uma maior quantidade destes resíduos que permita a sua integração no processo de compostagem, reduzindo o custo de aquisição dos resíduos florestais e consequentemente os custos de operação.

Bibliografia

- ADJ. (2005).** *Planta de Compostaje de Lodos*. Obtido em Junho de 2009, de Aguas de Jerez: <http://www.aguasdejerez.com/index.php?id=621>
- Allan, G. (2001).** *Recommendations for large composting at the University of British Columbia*. Obtido de UBC WASTE MANAGEMENT : www.sustain.ubc.ca/pdfs/largescalecomposting.pdf
- ANRA. (2003).** *Neches Compost Facility*. Obtido em Junho de 2009, de Angelina & Neches River Authority: <http://www.anra.org/composting.htm>
- APVC. (2009).** *Associação de Produtores do Vale da Campeã*.
- Baca, M. T. (1996).** Thermophilic Pilot Scale Composting of Olive Cake. In E. C. Symposium, *The Science of Composting* (pp. 1057-1062). Blackie Academic & Professional.
- Baptista, M. G. (2005).** *Proposta de Norma Técnica Sobre Qualidade e Utilizações do Composto*. Portugal.
- Bicoe. (2009).** *Biocompostajes Espanöles*. Obtido de <http://www.biocompostajes.com/bicoe.htm>
- Carrington, E. G. (2001).** *Evaluation of Sludge Treatments for Pathogens Reduction*. Obtido em Março de 2009, de http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/sludge_eval.pdf
- CCA. (2009).** *Construções Casais Azevedo, Lda*.
- CD300M. (2009).** *CD300M Dri-Prime Pumps*. Obtido de Godwinpumps: <http://www.godwinpumps.com/images/pdfs/cd300m.pdf>
- CE. (2003).** *COM(2003) 250 final/3 - Relatório da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu sobre a aplicação da legislação comunitária relativa aos resíduos no período de [1998-2000]*.
- CE. (2008).** *Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa aos resíduos*.
- CE. (1986).** *Directiva nº 86/278/CEE do Conselho de 12 de Junho de 1986 relativa à protecção do ambiente, e em especial dos solos, na utilização agrícola de lamas de depuração*. Obtido de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31986L0278:PT:HTML>
- CE. (2004).** *Relatório da Comissão das Comunidades Europeias Relativa ao Tratamento de Águas Residuais Urbanas na UE*. Obtido de http://ec.europa.eu/prelex/detail_dossier_real.cfm?CL=pt&DosId=190654
- Chandler, J. e. (1980).** Predicting Methane Fermentation Biodegradability. In *Biotechnology and Bioengineering Symposium No. 10*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- DGRF. (2006B).** *Estratégia Nacional para as Florestas*. Obtido em Maio de 2009, de <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/gestao-florestal/ppf/estrategia-nacional-para-as-florestas>
- DGRF. (2006).** *Inventário Florestal Nacional 2005-2006*. Obtido em Maio de 2009, de Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas: <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/ifn>
- Directorate-General, U. E. (2001).** *Working Document - Biological Treatment of Biowaste*. Obtido em Abril de 2009, de http://www.compost.it/www/publicazioni_on_line/biod.pdf
- Directorate-General, U. E. (2000).** *Working Document on Sludge - 3rd Draft*. Obtido de http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/sludge_en.pdf
- DL_236/98.** *Decreto-Lei nº 236/98. 01-08-1998: Diário da República, I Série-A*.
- ECN. (2009).** *European Compost Network*. Obtido de <http://www.compostnetwork.info/>

Ecopoda. (2006). *Equipos y maquinaria para el compostaje de alpeorujos*. Obtido em Abril de 2009, de Junta de Andalucía:
http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/www/portal/com/bin/portal/DGAEcológica/estudios/totales/equipos_y_maquinaria.pdf

EEA. (2001). *Sewage sludge - a future waste problem?*. Obtido de Indicator Fact Sheet Signals 2001– Chapter Waste: <http://www.mapa.es/app/Condiciona/Documentos/2%C2%BA.pdf>

Eltiempo.com. (2008). *Cantera Soratama tendrá nueva cara tras 40 años de explotación*. Obtido em Junho de 2009, de Eltiempo.com - Noticias de Colombia:
http://www.eltiempo.com/colombia/bogota/2008-08-02/cantera-soratama-tendra-nueva-cara-a-partir-del-6-de-agosto-tras-40-anos-de-explotacion_4421952-1

EPA. (2005). *National Waste Report - Compost facilities*. Obtido em Maio de 2009, de Ireland Environmental Protection Agency:
http://www.epa.ie/downloads/pubs/waste/stats/EPA_composting_2005.pdf

Epstein, E. (1997). *The Science of Composting*. Technomic.

ESRI. (2009). Obtido em Maio de 2009, de www.esri.com

Fernandes, F., & Silva, S. (UEL). *Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos*. Obtido de <http://www.finep.gov.br/Prosab/livros/Livro%20Compostagem.pdf>

Figueiredo, J. (2009). *Sounete - Movimentação e transporte de resíduos*. Obtido de http://www.sounete.pt/ambiente/index.php?option=com_content&task=view&id=38&Itemid=65

Foster, P. (2006). *The Production of Vermicompost from Dairy Sludge and its Value as a Plant Growth*. Obtido de Secure Archive For Environmental Research Data - Environmental Protection Agency Ireland: <http://erc.epa.ie/safer/iso19115/display?isoID=95>

Gonçalves, M. (2005). *Gestão de Resíduos Orgânicos*. Porto: Sociedade Portuguesa de Inovação.

Graves R., e. a. (2000). Chapter 2 - Composting. In *Environmental Engineering - National Engineering Handbook* (pp. 2-1, 2-61). United States Department of Agriculture.

Gray, N. (2004). *Biology of wastewater treatment*. Imperial College Press.

Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Torrance: Lewis Publishers.

Holland, N. (2009). *New Holland TDD Tractors*. Obtido de New Holland Agriculture:
<http://www.nhsa.co.za/assets/pdf/products/tractors/TDD.pdf>

IFAP. (2009). *Lista dos Lagares Reconhecidos para a campanha de 2008/2009*. Obtido em Maio de 2009, de Instituto de Financiamento de Agricultura e Pescas: http://www.ifap.min-agricultura.pt/portal/page/portal/ifap_publico/GC_informacoes/GC_lagares/GC_lagaresNRT

INAG. (2005). *Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Águas e de Águas Residuais*. Obtido em Março de 2009, de Relatórios - INSAAR 2005: http://insaar.inag.pt/index2_noflash.htm

INAG. (2002-2007). *Tabelas de dados - Instalação de tratamento de águas residuais (ETAR/FS)*. Obtido em Março de 2009, de Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Águas e de Águas Residuais: http://insaar.inag.pt/index2_noflash.htm

INR. (2003). *Estratégia Nacional Para a Redução dos Resíduos Urbanos Biodegradáveis Destinados a Aterro*. Obtido em Abril de 2009, de http://www.mne.gov.pt/Portal/PT/Governos/Governos_Constitucionais/GC15/Ministerios/MCOTA/Comunicacao/Programas_e_Dossiers/20030708_MCOTA_Doc_RUB.htm

IRAR. (2008). *Relatório Anual do Sector de Águas e Resíduos em Portugal - 2007*. Obtido em Abril de 2009, de http://www.irar.pt/presentationlayer/artigo_00.aspx?artigoid=274&idioma=1

ISQ. (2008). *Waste Water Treatment - Improvement and efficiency in small communities*. Obtido de Life Environment DG - Demonstration Project - LIFE04 ENV/PT/000687 : http://www.wwtreat.info/ww_cms/news_documents/wwtreat_laymans_report_pt.pdf

ISR. (2008). *Un modelo de gestión integrada. El parque de tecnologías ambientales de Mallorca*. Obtido em Junho de 2009, de Instituto para la sostenibilidad de los recursos: <http://www.isrcer.org/newweb/upload/publicaciones/docproyesp20080512151204.pdf>

ISWA. (2001). *Sludge Treatment and Disposal - Management Approaches and Experiences*. Obtido em Março de 2009, de European Environment Agency: <http://www.eea.europa.eu/publications/GH-10-97-106-EN-C>

IVDP. (2009). *Instituto dos Vinhos do Douro e Porto*. Obtido em Junho de 2009, de <http://www.ivp.pt/pagina.asp?codPag=31&codSeccao=6&idioma=0>

IVV. (2008). *Instituto da Vinha e do Vinho*. Obtido em Maio de 2009, de Ministério da Agricultura: <http://www.ivv.min-agricultura.pt/estatistica/index.html>

Khan, Y. (1997). *Biotreatability of Liquors from wet oxidation of sludges and industrial wastewaters*. Obtido de University of Newcastle: <https://theses.ncl.ac.uk/dspace/bitstream/10443/144/1/khan97.pdf>

Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental - Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid: McGRAW-HILL.

Komptech. (2009). *Terminator stationary 3400*. Obtido de Komptech stationary machines: <http://www.komptech.com/en/products/terminator-stationary/specifications.htm>

León, C. J. (2002). Removal of fecal coliforms by thermophilic anaerobic digestion process. In *Water Science and Technology - Sludge Management: Regulation, Treatment, Utilisation and disposal* (pp. Vol 46,Nº10, 147-152). IWA.

MADRP. (2006). *Estatísticas do Lagares de Azeite - campanha 2006*. Obtido em Abril de 2009, de Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas: <http://www.inga.min-agricultura.pt/estatis/lagares/2006/DRA2.html>

MAOTDR. (2007). *Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais II (2007-2013)*.

METEC. (2009). *CMR ventilador centrífugo de média pressão*. Obtido de Metec - Mecano Técnica, Lda: http://www.metec.pt/pdf_metec_semi/centrifugos/cmr_pt.pdf

Ministry of agriculture, f. a. (1996A). Blending Materials for the Composting Process. In *Composting Factsheet*. 382.500-4 : British Columbia - Ministry of Agriculture, Food and Fisheries.

Ministry of agriculture, f. a. (1996B). Composting Methods. In *Composting Factsheet*. 382.500-5: British Columbia - Ministry of Agriculture, Food and Fisheries.

Ministry of agriculture, f. a. (1996C). Managing Agricultural Composting Systems. In *Composting factsheet*. 382.500-7: British Columbia - Ministry Ministry of agriculture, food and fisheries.

Miranda, S. (2009). *MAN Veículos Industriais Portugal*. Obtido de http://www.man-mn.pt/pt/Lkw/_Lkw_.jsp

NEO. (2009). *Hawk Ridge Compost Facility*. Obtido em Junho de 2009, de New England Organics: <http://www.newenglandorganics.com/our-qualifications/page-title-test-page/hawk-ridge-compost-facility/>

Nerantzis, E. (e-JST). *Integrated Enology- Utilization of Winery By-products Into High Added Value Products* . Obtido em Março de 2009, de e-Journal of Science & Technology (e-JST) : http://e-jst.teiath.gr/issue_3_2006/Nerantzis_3.pdf

Oliveira, C. (2007). *Ventiladores e filtros industriais, sistemas de exaustão de poeiras e gases, construções mecânicas*. Obtido de METEC: <http://www.metec.pt/metec.php#semi>

Parma, C. A. (2009). *CONSORZIO AGRARIO Parma*. Obtido em Junho de 2009, de Europe Machinery: <http://www.europe-machinery.pt/usado/tractor-agricola/902711/new-holland-tdd-95-dt.html>

Paul, J. (2009). *Transform Compost Systems*. Obtido de <http://www.transformcompost.com/>

PEC. (2009). *L110 F Fuel Costs Comparison*. Obtido de Power equipment company: <http://www.power-equip.com/images/fuelsavings/L110F%20FUEL%20SAVINGS.pdf>

Pereira, A. (UA). *Compostagem: Fundamentos, Tecnologias, Impactos e Aplicações*. Universidade de Aveiro.

Polprasert, C. (2007). *Organic Waste Recycling*. IWA Publishing.

Power, S. (2009). *Generator SP 30*. Obtido de Stateline Power: http://www.statelinepower.com/pdfs/technical_specs_for_perkins.pdf

PRLine. (2003). *No a la incineracion*. Obtido em Junho de 2009, de <http://noalaincineracion.org/2003/11/25/espana-murcia-pone-en-funcionamiento-la-mayor-planta-de-compostaje-de-europa/>

Queda, C. (2008). *Caracterização de Compostos com vista à formulação de Substratos*. Obtido de Développement Forestier - La recherche au service du développement durable et la compétitivité du secteur forestier Sud Ouest Européen: Instituto Superior de Agronomia (ISA)

RCIR. (2009). *Planta de Compostaje de Villanueva de la Cañada*. Obtido de Red de centros de información de residuos de la comunidade de Madrid: http://www.rcir.es/4_villanueva/4_2_Villanueva_proceso.html

Robles, F. (2006). *Científicos de la UGR emplean los lodos de las depuradoras en la recuperación de los taludes de las carreteras*. Obtido em Março de 2009, de Noticias ciencia - Universidad de Granada: <http://prensa.ugr.es/prensa/investigacion/verNota/prensa.php?nota=3293>

Rodrigues, M. G. (1996). *História do Homem 8*. Areal Editores.

Rosas, C. (2005). *"Aplicações e Fertilizantes"*. Obtido em Abril de 2009, de CONFAGRI: <http://www.confagri.pt/Ambiente/AreasTematicas/Solo/Documentos/doc104.htm>

Rvolta. (2009). *Funcionário da RVolta - Valorização de Resíduos, SA*. Obtido de <http://www.rvolta.com/main.html>

Siemens. (2006). *IPS Composting System: Ardmore, Oklahoma*. Obtido em Junho de 2009, de Siemens water Technologies: http://www.water.siemens.com/SiteCollectionDocuments/Product_Lines/Microfloc_Products/Brochures/Ardmore_Oklahoma.pdf

Siemens. (1992). *IPS Composting System: Bennington, Vermont*. Obtido em Junho de 2009, de Siemens water Technologies: http://www.water.siemens.com/SiteCollectionDocuments/Product_Lines/Microfloc_Products/Brochures/Bennington_Vermont.pdf

Siemens. (2004). *IPS Composting System: Mont De Marsan, France*. Obtido em Junho de 2009, de Siemens water Technologies: http://www.water.siemens.com/SiteCollectionDocuments/Product_Lines/Microfloc_Products/Brochures/Mont_de_Marsan_France.pdf

Silva, L. (ESAV). *Caracterização dos Subprodutos da Vinificação*. Obtido em Maio de 2009, de <http://www.ipv.pt/millennium/Millennium28/10.pdf>

Silva, M. E. (2003). *Co-compostagem de Resíduos Avícolas e de Resíduos Florestais*. FEUP.

Sounete. (2009). *Sounete - Movimentação e transporte de resíduos*. Obtido de http://www.sounete.pt/ambiente/index.php?option=com_content&task=view&id=38&Itemid=65

Tardy, R. (1996). Composting Technology in the United States: Research and Practice. In E. C. Symposium, *The Science of Composting* (pp. 939-947). Blackie Academic & Professional.

Tuecherer, P. (2009). *Europe Machinery*. Obtido de Zeppelin Baumaschinen GmbH Branch Ulm: <http://www.europe-machinery.pt/usado/carregadora-pneus/900302/doosan-dl300.html>

US.EPA. (2003). Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge. In *Environmental Regulations and Technology* (pp. 8-57). EPA/625/R-92/013: Cincinnati.

Varejão, H. (2009). *Representação portuguesa da Komptech - Masias*. Obtido de http://recycling.masias.com/portal.asp?ACCIO=CANVIAR_IDIOMA&IDIOMA=2

Wallnöfer, K. (2009). *TenCate Customer Service*. Obtido de www.tencate.com/geosynthetics

Werf, P. (2005). *Made in Canada - Canadian Composting Technologies in Action*. Obtido em Junho de 2009, de Solid Waste & Recycling: www.solidwastemag.com

9. Anexos

9.1. Anexo A

Tabela 54 - Valores limite de concentração de metais pesados, compostos orgânicos e dioxinas, e dos parâmetros microbiológicos contidos nas lamas.

Elemento	Unidades	Legislação		
		Directiva 86/278/CE	DL 118/2006	3º Draft
	(em base seca)			
Cádmio	mg/Kg	20-40	20	10
Cobre	mg/Kg	1000-1750	1000	750
Níquel	mg/Kg	300-400	300	300
Chumbo	mg/Kg	750-1200	750	750
Zinco	mg/Kg	2500-4000	2500	2500
Mercúrio	mg/Kg	16-25	16	10
Crómio	mg/Kg	-	1000	1000
AOX	mg/L	-	500	500
LAS	mg/Kg	-	2600	2600
DEHP	mg/Kg	-	100	100
NPE	mg/Kg	-	50	50
Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos		-	6	6
PCB	mg/Kg	-	0,8	0,8
PCDD/F	ng TE/kg	-	100	100
E.coli	NMP /g	-	1000*	
Salmonelas	/25g	-	Ausência*	

- não definido

* O DL nº 118/2006 não especifica limites para os microrganismos patogénicos, delegando essa responsabilidade na CCDD e na DRA.

9.2. Anexo B

Tabela 55 - Produção e destino final das lamas produzidas na UE-15 entre 1999-2001.

		Reutilização	Deposição	Incineração	Não	Águas	Total	Reutilização	Deposição	Incineração	Não	Águas
			em aterro		especificado	de superfície			em aterro		especificado	superficiais
Unidades		Mil toneladas de massa seca						% de massa seca				
A	Áustria	37	41	151	86	0	315	12	13	48	27	0
B	Bélgica	15	32	25	19	0	91	16	35	27	21	0
D	Alemanha	920	230	460	690	0	2300	40	10	20	30	0
DK	Dinamarca	84	36	10	25	0	155	54	23	6	16	0
E	Espanha	578	360	74	0	57	1069	54	34	7	0	5
EL	Grécia	6	90	0	0	0	96	6	94	0	0	0
F	França	507	0	0	398	0	905	56	0	0	44	0
FIN	Finlândia	90	60	0	0	0	150	60	40	0	0	0
I	Itália	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
IRL	Irlanda	9	17	0	0	12	38	24	45	0	0	32
L	Luxemburgo	6	1	0	0	0	7	86	14	0	0	0
NL	Países Baixos	77	64	195	1	0	337	23	19	58	0	0
P	Portugal	106	71	0	0	0	177	60	40	0	0	0
S	Suécia	116	76	0	30	0	222	52	34	0	14	0
UK	Reino Unido	588	192	237	113	0	1130	52	17	21	10	0
TOTAL		3139	1270	1152	1362	69	6992					
(%)		45	18	16	19	1						

nd – não definido

9.3. Anexo C

Tabela 56 - Adeias de Vinho e Lagares de Azeite na Região em estudo (IVDP, 2009) (IFAP, 2009).

Adeias	Localização
Adeia cooperativa de Alijó	Alijó
Adeia cooperativa de Sanfins do Douro	Alijó
Adeia cooperativa de Favaio	Alijó
Adeia cooperativa de Mesão Frio	Mesão Frio
Adeia cooperativa de Murça	Murça
Adeia cooperativa de Sabrosa	Sabrosa
Adeia Cooperativa de Santa Marta	Santa Marta de Penaguião
Adeia cooperativa de Vila Real – Caves do Corgo	Vila Real
Caves Vale Rodo	Peso da Régua
Quinta do Vallado	Vilarinho dos Freires (Peso da Régua)
Quinta do Bucheiro	Sabrosa
Quinta Seara D'Ordens	Poiars (Peso da Régua)
Lagares de Azeite	Localização
Coop. Agr. dos Olivicultores de Murça	Murça
Casa do Eiró - Lagar de Azeite, Lda	Vilar de Maçada (Alijó)
João Gomes Alves - Comercialização de Azeite, Lda.	Sabrosa
Moagri Sociedade Agrícola, SA	Fontes (Santa Marta de Penaguião)
Quinta da Aveleira - Soc.Agr.de Grupo, Lda.	Lobrigos (Santa Marta de Penaguião)
Soc. Agrícola - Quinta de Stª Eugénia, Lda.	Santa Eugénia (Alijó)

9.4. Anexo D

Tabela 57 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (1.8).

Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)	Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)
0	Peso da Régua	57	1388	1	79708	3	Peso da Régua	62	1388	1	85858
0	Sanfins do Douro	30	134	1	4070	3	Sanfins do Douro	24	134	1	3160
0	Alijó	25	160	1	3963	3	Alijó	17	160	1	2747
0	Murça	3	159	1	454	3	Murça	21	159	1	3327
0	Vila Real	36	4805	1	174668	3	Vila Real	41	4805	1	196236
0	Sabrosa	31	369	1	11588	3	Sabrosa	30	369	1	11170
$\Sigma (\alpha)$					274452	$\Sigma (\alpha)$					302498
1	Peso da Régua	65	1388	1	90101	4	Peso da Régua	54	1388	1	75624
1	Sanfins do Douro	34	134	1	4537	4	Sanfins do Douro	14	134	1	1879
1	Alijó	27	160	1	4392	4	Alijó	5	160	1	769
1	Murça	10	159	1	1662	4	Murça	27	159	1	4325
1	Vila Real	44	4805	1	210647	4	Vila Real	41	4805	1	195214
1	Sabrosa	39	369	1	14351	4	Sabrosa	21	369	1	7641
$\Sigma (\alpha)$					325690	$\Sigma (\alpha)$					285452
2	Peso da Régua	58	1388	1	80168	5	Peso da Régua	52	1388	1	72612
2	Sanfins do Douro	19	134	1	2611	5	Sanfins do Douro	12	134	1	1588
2	Alijó	13	160	1	2092	5	Alijó	5	160	1	870
2	Murça	13	159	1	2126	5	Murça	17	159	1	2696
2	Vila Real	37	4805	1	176538	5	Vila Real	36	4805	1	170607
2	Sabrosa	26	369	1	9657	5	Sabrosa	19	369	1	6841
$\Sigma (\alpha)$					273191	$\Sigma (\alpha)$					255214

Tabela 58 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de α (2.8).

Facility	Incident	Lenght	m _{lama}	c	α	Facility	Incident	Lenght	m _{lama}	c	α
ID	ID	(km)	(ton/ano)	(um./km.ton)	(um.)	ID	ID	(km)	(ton/ano)	(um./km.ton)	(um.)
6	Peso da Régua	50	1388	1	68884	9	Peso da Régua	47	1388	1	65019
6	Sanfins do Douro	13	134	1	1692	9	Sanfins do Douro	2	134	1	252
6	Alijó	12	160	1	1974	9	Alijó	11	160	1	1775
6	Murça	17	159	1	2638	9	Murça	27	159	1	4341
6	Vila Real	29	4805	1	137474	9	Vila Real	33	4805	1	158399
6	Sabrosa	21	369	1	7718	9	Sabrosa	13	369	1	4822
$\Sigma (\alpha)$					220381	$\Sigma (\alpha)$					234606
7	Peso da Régua	49	1388	1	68674	10	Peso da Régua	38	1388	1	53198
7	Sanfins do Douro	22	134	1	2976	10	Sanfins do Douro	23	134	1	3101
7	Alijó	19	160	1	3066	10	Alijó	30	160	1	4860
7	Murça	9	159	1	1398	10	Murça	21	159	1	3324
7	Vila Real	28	4805	1	136470	10	Vila Real	15	4805	1	71062
7	Sabrosa	23	369	1	8655	10	Sabrosa	18	369	1	6536
$\Sigma (\alpha)$					221240	$\Sigma (\alpha)$					142081
8	Peso da Régua	44	1388	1	60904	11	Peso da Régua	35	1388	1	48954
8	Sanfins do Douro	19	134	1	2587	11	Sanfins do Douro	23	134	1	3052
8	Alijó	22	160	1	3545	11	Alijó	30	160	1	4802
8	Murça	12	159	1	1873	11	Murça	23	159	1	3672
8	Vila Real	23	4805	1	109573	11	Vila Real	12	4805	1	56370
8	Sabrosa	18	369	1	6589	11	Sabrosa	15	369	1	5714
$\Sigma (\alpha)$					185072	$\Sigma (\alpha)$					122564

Tabela 59 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de α (3.8).

Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)	Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)
12	Peso da Régua	37	1388	1	51207	15	Peso da Régua	55	1388	1	76244
12	Sanfins do Douro	19	134	1	2598	15	Sanfins do Douro	14	134	1	1939
12	Alijó	26	160	1	4124	15	Alijó	14	160	1	2176
12	Murça	22	159	1	3527	15	Murça	33	159	1	5278
12	Vila Real	16	4805	1	76280	15	Vila Real	41	4805	1	197360
12	Sabrosa	11	369	1	3890	15	Sabrosa	21	369	1	7806
$\Sigma (\alpha)$					141626	$\Sigma (\alpha)$					290802
13	Peso da Régua	38	1388	1	52908	16	Peso da Régua	37	1388	1	51514
13	Sanfins do Douro	17	134	1	2263	16	Sanfins do Douro	21	134	1	2752
13	Alijó	22	160	1	3456	16	Alijó	25	160	1	4040
13	Murça	23	159	1	3611	16	Murça	38	159	1	6111
13	Vila Real	20	4805	1	96347	16	Vila Real	24	4805	1	116921
13	Sabrosa	6	369	1	2349	16	Sabrosa	9	369	1	3451
$\Sigma (\alpha)$					160934	$\Sigma (\alpha)$					184789
14	Peso da Régua	48	1388	1	66136	17	Peso da Régua	27	1388	1	37872
14	Sanfins do Douro	7	134	1	963	17	Sanfins do Douro	18	134	1	2369
14	Alijó	7	160	1	1134	17	Alijó	22	160	1	3582
14	Murça	27	159	1	4242	17	Murça	32	159	1	5089
14	Vila Real	34	4805	1	162367	17	Vila Real	15	4805	1	69697
14	Sabrosa	14	369	1	5119	17	Sabrosa	6	369	1	2395
$\Sigma (\alpha)$					239959	$\Sigma (\alpha)$					121005

Tabela 60 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (4.8).

Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)	Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)
18	Peso da Régua	28	1388	1	39470	21	Peso da Régua	45	1388	1	62391
18	Sanfins do Douro	21	134	1	2875	21	Sanfins do Douro	25	134	1	3364
18	Alijó	26	160	1	4187	21	Alijó	25	160	1	4001
18	Murça	32	159	1	5080	21	Murça	45	159	1	7091
18	Vila Real	10	4805	1	46368	21	Vila Real	35	4805	1	166741
18	Sabrosa	10	369	1	3789	21	Sabrosa	22	369	1	8103
$\Sigma (\alpha)$					101770	$\Sigma (\alpha)$					251690
19	Peso da Régua	31	1388	1	42488	22	Peso da Régua	20	1388	1	28147
19	Sanfins do Douro	25	134	1	3357	22	Sanfins do Douro	25	134	1	3308
19	Alijó	32	160	1	5165	22	Alijó	29	160	1	4703
19	Murça	25	159	1	4042	22	Murça	39	159	1	6202
19	Vila Real	12	4805	1	56816	22	Vila Real	15	4805	1	71239
19	Sabrosa	18	369	1	6542	22	Sabrosa	13	369	1	4980
$\Sigma (\alpha)$					118411	$\Sigma (\alpha)$					118580
20	Peso da Régua	35	1388	1	48968	23	Peso da Régua	26	1388	1	36600
20	Sanfins do Douro	39	134	1	5274	23	Sanfins do Douro	26	134	1	3480
20	Alijó	45	160	1	7172	23	Alijó	31	160	1	4909
20	Murça	40	159	1	6308	23	Murça	31	159	1	4958
20	Vila Real	12	4805	1	57016	23	Vila Real	5	4805	1	25939
20	Sabrosa	29	369	1	10672	23	Sabrosa	15	369	1	5456
$\Sigma (\alpha)$					135410	$\Sigma (\alpha)$					81341

Tabela 61 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de α (5.8).

Facility	Incident	Lenght	m _{lama}	c	α	Facility	Incident	Lenght	m _{lama}	c	α
ID	ID	(km)	(ton/ano)	(um./km.ton)	(um.)	ID	ID	(km)	(ton/ano)	(um./km.ton)	(um.)
24	Peso da Régua	29	1388	1	39854	27	Peso da Régua	21	1388	1	29263
24	Sanfins do Douro	36	134	1	4763	27	Sanfins do Douro	32	134	1	4311
24	Alijó	41	160	1	6518	27	Alijó	37	160	1	5902
24	Murça	36	159	1	5702	27	Murça	46	159	1	7393
24	Vila Real	6	4805	1	27142	27	Vila Real	22	4805	1	107226
24	Sabrosa	25	369	1	9165	27	Sabrosa	21	369	1	7744
$\Sigma (\alpha)$					93143	$\Sigma (\alpha)$					161839
25	Peso da Régua	29	1388	1	39854	28	Peso da Régua	14	1388	1	19337
25	Sanfins do Douro	36	134	1	4763	28	Sanfins do Douro	46	134	1	6202
25	Alijó	41	160	1	6518	28	Alijó	51	160	1	8160
25	Murça	36	159	1	5702	28	Murça	56	159	1	8972
25	Vila Real	6	4805	1	27142	28	Vila Real	31	4805	1	147239
25	Sabrosa	25	369	1	9165	28	Sabrosa	35	369	1	12952
$\Sigma (\alpha)$					93143	$\Sigma (\alpha)$					202861
26	Peso da Régua	21	1388	1	29306	29	Peso da Régua	14	1388	1	19522
26	Sanfins do Douro	27	134	1	3661	29	Sanfins do Douro	32	134	1	4222
26	Alijó	32	160	1	5126	29	Alijó	36	160	1	5795
26	Murça	34	159	1	5404	29	Murça	41	159	1	6525
26	Vila Real	9	4805	1	40905	29	Vila Real	16	4805	1	74774
26	Sabrosa	16	369	1	5954	29	Sabrosa	20	369	1	7499
$\Sigma (\alpha)$					90356	$\Sigma (\alpha)$					118337

Tabela 62 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de α (6.8).

Facility	Incident	Lenght	m _{lama}	c	α	Facility	Incident	Lenght	m _{lama}	c	α
ID	ID	(km)	(ton/ano)	(um./km.ton)	(um.)	ID	ID	(km)	(ton/ano)	(um./km.ton)	(um.)
30	Peso da Régua	14	1388	1	19522	33	Peso da Régua	9	1388	1	12730
30	Sanfins do Douro	32	134	1	4222	33	Sanfins do Douro	46	134	1	6219
30	Alijó	36	160	1	5795	33	Alijó	51	160	1	8179
30	Murça	41	159	1	6525	33	Murça	49	159	1	7811
30	Vila Real	16	4805	1	74774	33	Vila Real	15	4805	1	73524
30	Sabrosa	20	369	1	7499	33	Sabrosa	35	369	1	12996
$\Sigma (\alpha)$					118337	$\Sigma (\alpha)$					121459
31	Peso da Régua	21	1388	1	28875	34	Peso da Régua	4	1388	1	5997
31	Sanfins do Douro	34	134	1	4562	34	Sanfins do Douro	44	134	1	5891
31	Alijó	39	160	1	6201	34	Alijó	49	160	1	7789
31	Murça	37	159	1	5845	34	Murça	53	159	1	8466
31	Vila Real	3	4805	1	14124	34	Vila Real	19	4805	1	93321
31	Sabrosa	23	369	1	8435	34	Sabrosa	33	369	1	12095
$\Sigma (\alpha)$					68043	$\Sigma (\alpha)$					133560
32	Peso da Régua	15	1388	1	21326	35	Peso da Régua	27	1388	1	36959
32	Sanfins do Douro	41	134	1	5500	35	Sanfins do Douro	41	134	1	5443
32	Alijó	46	160	1	7321	35	Alijó	45	160	1	7253
32	Murça	44	159	1	6958	35	Murça	43	159	1	6890
32	Vila Real	10	4805	1	47754	35	Vila Real	10	4805	1	45707
32	Sabrosa	30	369	1	11017	35	Sabrosa	29	369	1	10860
$\Sigma (\alpha)$					99876	$\Sigma (\alpha)$					113113

Tabela 63 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de (α) (7.8).

Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)	Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)
36	Peso da Régua	19	1388	1	26839	39	Peso da Régua	30	1388	1	42156
36	Sanfins do Douro	49	134	1	6549	39	Sanfins do Douro	31	134	1	4094
36	Alijó	54	160	1	8574	39	Alijó	38	160	1	6045
36	Murça	52	159	1	8203	39	Murça	30	159	1	4759
36	Vila Real	18	4805	1	85375	39	Vila Real	7	4805	1	32908
36	Sabrosa	38	369	1	13907	39	Sabrosa	22	369	1	8121
$\Sigma (\alpha)$					149446	$\Sigma (\alpha)$					98083
37	Peso da Régua	14	1388	1	19204	40	Peso da Régua	37	1388	1	52039
37	Sanfins do Douro	59	134	1	7879	40	Sanfins do Douro	14	134	1	1907
37	Alijó	64	160	1	10162	40	Alijó	19	160	1	3031
37	Murça	62	159	1	9783	40	Murça	25	159	1	4033
37	Vila Real	28	4805	1	133139	40	Vila Real	23	4805	1	109086
37	Sabrosa	48	369	1	17569	40	Sabrosa	4	369	1	1371
$\Sigma (\alpha)$					197735	$\Sigma (\alpha)$					171468
38	Peso da Régua	9	1388	1	12528	41	Peso da Régua	57	1388	1	78902
38	Sanfins do Douro	54	134	1	7235	41	Sanfins do Douro	20	134	1	2709
38	Alijó	59	160	1	9392	41	Alijó	14	160	1	2209
38	Murça	64	159	1	10196	41	Murça	9	159	1	1365
38	Vila Real	33	4805	1	157453	41	Vila Real	36	4805	1	171878
38	Sabrosa	43	369	1	15794	41	Sabrosa	27	369	1	9928
$\Sigma (\alpha)$					212598	$\Sigma (\alpha)$					266992

Tabela 64 - Distâncias entre as ETAR e os pontos possíveis para a implantação da unidade de compostagem; Cálculo de α (8.8).

Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)	Facility ID	Incident ID	Lenght (km)	m _{lama} (ton/ano)	c (um./km.ton)	α (um.)
42	Peso da Régua	31	1388	1	42656	43	Peso da Régua	25	1388	1	34589
42	Sanfins do Douro	38	134	1	5098	43	Sanfins do Douro	32	134	1	4333
42	Alijó	43	160	1	6841	43	Alijó	37	160	1	5928
42	Murça	40	159	1	6285	43	Murça	34	159	1	5474
42	Vila Real	8	4805	1	36842	43	Vila Real	2	4805	1	8928
42	Sabrosa	27	369	1	9910	43	Sabrosa	21	369	1	7804
$\Sigma (\alpha)$					107631	$\Sigma (\alpha)$					67056

