

ESTRATÉGIAS DE GESTÃO DE LAMAS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS (ETAR). EXTRUSÃO DE LAMAS PARA APLICAÇÃO NA AGRICULTURA

Ricardo José Vieira de Sousa

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Ambiente (Ramo de Gestão e Tratamento de Resíduos Industriais)

Dissertação realizada sob a orientação dos:

Prof. Doutor Manuel A. M. Fonseca Almeida
Professor Associado com Agregação

do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

e

Prof. Doutor Paulo T. dos Santos Monteiro
Professor Auxiliar

do Departamento de Engenharia Civil
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Dezembro 2005

ESTRATÉGIAS DE GESTÃO DE LAMAS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS (ETAR). EXTRUSÃO DE LAMAS PARA APLICAÇÃO NA AGRICULTURA

Resumo

A reciclagem das lamas de ETAR, através da sua valorização agrícola, apresenta-se como uma via de escoamento privilegiada na UE, face ao destino final em aterro ou à incineração. No caso de Portugal, onde os solos são maioritariamente pobres em matéria orgânica e nos principais nutrientes das plantas, sobretudo azoto e fósforo, a aplicação das lamas como importante fonte destes elementos fertilizantes, pode permitir corrigir essas deficiências, tornando-os mais férteis e produtivos. Por conseguinte, a opção pela valorização agrícola revela-se a opção *à priori* mais acertada e mais sustentável. Contudo, o seu difícil manuseio, o risco de contaminação, a libertação de odores e as dificuldades de armazenamento, tornam-na pouco atractiva para o seu utilizador que mais facilmente opta pela utilização de fertilizantes químicos nos seus planos de fertilização.

Com a perspectiva de contribuir para a solução deste problema, idealizou-se um esquema de tratamento que consiste numa operação de conformação das lamas, através de um processo de extrusão, antecedida por uma mistura com cal e precedida por um período de cura. Através desta operação, é possível obter as lamas sob a forma de grânulos – peletes – com as dimensões dos fertilizantes comerciais, tornando-as mais atractivas para os agricultores ao assegurar-lhes facilidade, rapidez, uniformidade e economia na sua dispersão nos solos. Por sua vez, torna possível que os peletes estejam disponíveis em qualquer altura do ano, adequando a sua utilização ao ciclo rotativo das culturas. O objectivo deste trabalho é, pois, avaliar se o esquema idealizado conduz a ganhos significativos ao nível das propriedades físicas dos peletes e se não reduz as características fertilizantes iniciais das lamas. Para o averiguar foram realizados diversos ensaios: (i) de compressão para aferir da consistência dos peletes; (ii) análises químicas para avaliar as principais alterações químicas sofridas durante o processo; (iii) ensaios bacteriológicos para verificar o grau de higienização; e, (iv) ensaios biológicos com recurso as culturas de cevada e alface para avaliar a possível perda das características fertilizantes.

Complementarmente, procedeu-se à revisão bibliográfica sobre os principais processos de tratamento, armazenamento, transporte e destino final a dar às lamas de ETAR, assim como as principais vantagens, cuidados e restrições da sua aplicação na agricultura.

SEWAGE SLUDGE: MANAGEMENT STRATEGIES SLUDGE EXTRUSION FOR ITS USE IN AGRICULTURE

Abstract

Sewage sludge recycling through its use in agriculture is a privileged way at EU, comparing it with landfill or incineration. In Portugal, where many soils are poor in organic matter and in the main crop nutrients, especially nitrogen and phosphorus, the use of sludge as an important source of these fertilizing elements, could amend these deficiencies, making the soils more fertile and productive. Therefore, sludge recycling is the best option to be made, meeting the requirements of a sustainable development. However, its difficulty to handle, risk of contamination, smell and storing problems, become its use complicated and less attractive to the farmers who opt to use artificial fertilizers in their fertilizing plans.

With the aim of solving this problem, a new technique was idealized by extruding sludge, previously mixed with quicklime and preceded by a curing period. With this new technique, the sludge acquires a granular shape – pellet -, with the same dimensions as artificial fertilizers, becoming more attractive for the farmers as they are easy and cheap, to handle, store and spread. The pellets are, therefore, always available at the most suitable time for spreading. It is the aim of this essay to evaluate if the idealized technique improve the physical properties of the sludge and don't reduce its agronomic value. To value it, different tests had been carried through: i) compressive strength tests to evaluate the pellets hardness; ii) chemical analyses to evaluate the main chemical alterations during the process; iii) bacteriological essays to evaluate the inactivation of bacterial pathogens by the process and iv) biological pot essays to assess the possible loss of agronomic value.

Complementarily, it was made a bibliographical review of the main sludge treatments, storage, transport and disposal options, as well as the principal advantages, cares and restrictions of its use in agriculture.

AGRADECIMENTOS

À Eng.^a Manuela Costa da Direcção Regional da Agricultura de Entre Douro e Minho (DRAEDM), pela contribuição excepcional para a realização deste trabalho, pelos inúmeros conhecimentos transmitidos, pela disponibilidade total e pela simpatia e amizade

Às Técnicas Guiomar Alemão e Conceição Adrião da DRAEDM pela disponibilidade infundável na realização das análises dos solos e dos resíduos orgânicos, pela motivação e amizade

À Eng.^a Maria Helena da DRAEDM, pelo seu apoio e disponibilidade na realização dos ensaios foliares.

À Eng.^a Sílvia Pinho, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), pela disponibilidade na determinação dos metais pesados.

Ao Doutor Fonseca Almeida e ao Doutor Paulo Monteiro, um agradecimento especial, pela orientação científica e precioso apoio, para além da valorosa ajuda na revisão do texto.

Aos meus pais e irmão pelo apoio constante.

Aos meus amigos, em particular ao Mestre Joaquim Beleza, pela disponibilidade.

À Carla, pelo excepcional apoio e motivação.

“Uma longa viagem começa com um único passo”

Provérbio chinês

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento histórico	5
1.2	Legislação sobre gestão de lamas de ETAR	10
2	Lamas de ETAR.....	13
2.1	Definição de lamas.....	13
2.2	Generalidades	13
2.3	Tipos de lamas produzidas.....	13
2.4	Quantidades de lamas produzidas	14
3	Principais processos de tratamento, armazenamento, transporte e destino final de lamas de ETAR.....	18
3.1	Tratamento de lamas	18
3.1.1	Operações preliminares	20
3.1.2	Espessamento	20
3.1.3	Estabilização	21
3.1.4	Condicionamento	24
3.1.5	Desinfecção	25
3.1.6	Desidratação.....	26
3.1.7	Secagem térmica	30
3.1.8	Redução térmica.....	31
3.2	Armazenamento de lamas de ETAR.....	33
3.2.1	Armazenamento de biossólidos em explorações agrícolas.....	34
3.3	Transporte de lamas de ETAR.....	35
3.4	Destino final das lamas de ETAR	35
3.4.1	Evolução do destino final das lamas	36
4	Valorização agrícola dos biossólidos	38
4.1	Valor fertilizante dos biossólidos.....	38
4.1.1	Importância dos biossólidos como correctivos orgânicos	39
4.1.2	Importância dos biossólidos como fonte de nutrientes.....	39
4.2	Principais contaminantes presentes nas lamas	42
4.2.1	Metais pesados	43
4.2.2	Contaminantes químicos orgânicos.....	45
4.2.3	Microorganismos Patogénicos	46
4.3	Ação da aplicação dos biossólidos sobre os solos	47
4.3.1	Reacção do solo (pH).....	47
4.3.2	Qualidade dos solos.....	48
4.4	Restrições e cuidados a adoptar na aplicação dos biossólidos	49
4.4.1	Quantidades de biossólidos a aplicar	49
4.4.2	Métodos de aplicação dos biossólidos.....	49
4.4.3	Épocas e oportunidades de aplicação dos biossólidos.....	50
4.4.4	Restrições e limitações legais à aplicação dos biossólidos na agricultura.....	52
4.4.5	Análises a realizar. Parâmetros obrigatórios e parâmetros complementares	52
4.4.6	Registos de Utilização.....	54
4.5	Importância da aplicação dos biossólidos nos solos portugueses	54
5	Descrição do esquema de tratamento idealizado.....	56
5.1	Estabilização química com cal	57
5.1.1	Reacções químicas	59
5.1.2	Aumento da temperatura e do teor de matéria seca.....	60
5.1.3	Aumento e manutenção do pH.....	61
5.1.4	Higienização da lama	62
5.1.5	Outros aspectos	64
5.2	Extrusão	67

5.2.1 Principais fenómenos	69
5.2.2 Exemplo de aplicação a lamas de ETAR	69
6 Metodologia experimental adoptada	71
6.1 Processo de obtenção dos peletes	71
6.1.1 Efeito da adição de cal no pH e no teor de matéria seca da lama tratada	72
6.1.2 Efeito das diferentes doses de cal ensaiadas sobre a resistência à compressão dos peletes	72
6.1.3 Ensaio de secagem	73
6.1.4 Preparação dos peletes para a avaliação do seu valor fertilizante	73
6.2 Avaliação do valor fertilizante dos peletes	73
6.2.1 Teste de fitotoxicidade	74
6.2.2 Teste de vegetação em vaso	76
6.3 Caracterização analítica dos resíduos orgânicos (lama e peletes), do material foliar e avaliação do estado de fertilidade do solo.	79
6.4 Avaliação do grau de higienização dos peletes e da lama.....	80
6.5 Tratamento estatístico	80
7 Resultados e discussão	81
7.1 Efeito da adição da cal viva (CaO) no pH e no teor de matéria seca da lama tratada	81
7.2 Efeito das diferentes doses de cal ensaiadas sobre a resistência à compressão dos peletes	82
7.3 Ensaio de secagem	84
7.4 Caracterização analítica da lama e dos peletes	85
7.5 Avaliação do grau de higienização	88
7.6 Teste de Fitotoxicidade.....	89
7.6.1 Análise sintomatológica (visual) das folhas da cevada	91
7.7 Teste de Vegetação em vaso – Cultura da alface	92
7.7.1 Efeito da dose sobre a produção.....	92
7.7.2 Efeito do tratamento efectuado sobre a produção	95
7.7.3 Efeito da dose no ritmo de crescimento da alface	96
7.7.4 Efeito do tratamento no ritmo de crescimento da alface	98
7.7.5 Aspectos fitossanitários a referir	99
7.7.6 Efeito das doses e do tratamento na fertilidade do solo e no estado nutritivo da alface.....	100
8 Conclusões	108
9 Perspectivas futuras.....	111
10 Referências bibliográficas	112
Anexo I – Acerca <i>Working Document on Sludge 3rd Draft</i>.....	122
Anexo II – Simulação de um plano de fertilização	125
Anexo III – Resultados obtidos para o ensaio P6/4 (outlier).....	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 - Proporção de lamas utilizadas na agricultura por total de lamas produzidas durante o período 1995-1997, nos diversos Estados-Membros ⁹	7
Figura 1.2 - Percentagem de população servida por estações de tratamento de águas residuais em 1990 nos vários Estados-Membros ¹⁶	9

Capítulo 2

Figura 2.1 - Esquema típico de funcionamento de uma ETAR ¹⁵	14
Figura 2.2 - Quantidades totais de lamas produzidas em diversos Estados-Membros, incluindo projecções para o ano 2000 e 2005 (expressas em matéria seca) ⁵⁶	15
Figura 2.3 - Estimativa da produção de lamas (em matéria seca) em Portugal Continental, nos anos de 1994, 1999 e 2006 por sistema plurimunicipal ⁵⁸	16
Figura 2.4 - Estimativa da produção de lamas em 2006, em Portugal Continental, por sistema plurimunicipal ⁵⁸	17

Capítulo 3

Figura 3.1 - Fluxograma das diversas etapas do processo de tratamento das lamas de ETAR.....	19
Figura 3.2 - Exemplo de um desarenador ciclónico.	20
Figura 3.3 - Tratamento de lamas em digestores anaeróbios.....	22
Figura 3.4 - Esquema de pilha estática arejada ⁶²	23
Figura 3.5 - Diagrama do processo de tratamento “ <i>Envessel Pasteurization</i> ” ⁶⁸	26
Figura 3.6 - Exemplo de um leito de secagem.....	27
Figura 3.7 - Pormenores do leito de secagem com as condutas para aquecimento e com a estufa plástica sobre o mesmo ⁷⁰	27
Figura 3.8 - Exemplo de uma centrifuga ⁷¹	28
Figura 3.9 - Filtro prensa de esteira BPF WR “ <i>Greenland</i> ” ⁷³	29
Figura 3.10 - Filtro prensa de banda ⁷⁴	29
Figura 3.11 - Esquema de incinerador de leito fluidizado ⁷⁷	32
Figura 3.12 - Evolução do destino final das lamas de ETAR nos países da União Europeia ⁵⁵	36
Figura 3.13 - Principais destinos finais dados às lamas de ETAR em Portugal ⁷⁸	37

Capítulo 4

Figura 4.1 - Representação esquemática das reacções que controlam o teor de metais pesados na solução do solo (adaptado ⁸⁴).....	44
Figura 4.2 - Efeito do pH e do teor de Zn no solo sobre a concentração deste metal pesado na solução do solo ¹⁵	45
Figura 4.3 - Disponibilidade dos nutrientes e actividade dos microrganismos, segundo pH do solo (Quadro Truog) ⁸⁷	48
Figura 4.4 - Distribuição à superfície de biossólidos.....	50

Capítulo 5

Figura 5.1 - Esquema simplificado do esquema de tratamento desenvolvido	56
Figura 5.2 - Diferentes utilizações da cal no processo de tratamento das lamas de ETAR	58
Figura 5.3 - Acréscimo teórico da temperatura pela adição de CaO para diferentes teores de matéria seca na lama (adaptado ⁵⁴).....	60
Figura 5.4 - Contaminação de três lamas sujeitas a calagem ⁹⁶	63
Figura 5.5 - Principais variáveis que afectam o processo de mistura da lama+cal (adaptado ⁹⁸)	64
Figura 5.6 - Influência do pH na proporção de NH_4^+ e NH_3 em solução ⁹⁹	66

Figura 5.7 - Influência da adição de cal sobre o azoto total presente na mistura lama+cal após 24 horas (adaptado ¹⁰⁰).....	66
Figura 5.8 - Esquema simplificado de um extrusor utilizado no processamento de plásticos ¹⁰²	67
Figura 5.9 - Esquema de alimentadores horizontais (A) e verticais (B) ¹⁰³	68
Figura 5.10 - Zonas características do cilindro do extrusor ¹⁰⁴	68
Figura 5.11 - Fluxograma do processo CCBA de fabrico de agregado leve (adaptado ¹⁰⁵).....	70
Figura 5.12 - Blocos de concreto usando agregado leve do processo CCBA ¹⁰⁵	70

Capítulo 6

Figura 6.1 - Equipamento utilizado para a preparação das provetes (A) e para a realização dos ensaios de compressão uniaxial não confinada (B).....	72
Figura 6.2 - Aspecto do tambor (A) e extrusor (B) utilizado no processo de preparação dos peletes	73
Figura 6.3 - Aspecto dos filetes obtidos por extrusão (A), dos peletes obtidos após corte (B) e dos peletes após permanência à temperatura ambiente durante 15 dias (C)	73
Figura 6.4 - Passos efectuados para a preparação do ensaio de fitotoxicidade.....	75
Figura 6.5 - Rega a peso	78
Figura 6.6 - Aspecto geral do ensaio (7 dias após a plantação)	79

Capítulo 7

Figura 7.1 - Variação do pH em função da percentagem de cal adicionada às amostras de lama bruta.....	81
Figura 7.2 - Variação da resistência a compressão em função da dose aplicada e dos períodos de cura. As barras verticais indicam o desvio padrão.....	83
Figura 7.3 - Pesquisa de <i>Escherichia coli</i> (A) e <i>Salmonella sp</i> (B) na lama e nos peletes.....	88
Figura 7.4 - Ensaio de produção de biomassa com cevada para os produtos: Peletes (P) e Lama (L) e a modalidade testemunha	89
Figura 7.5 - Produção de biomassa de cevada para 12,5%, 25% e 50% de mistura peletes e lama com turfa corrigida	90
Figura 7.6 - Sintomas anómalos (A,B) observados na cultura da cevada.....	91
Figura 7.7 - Teste de vegetação em vaso com a alface para os diferentes tratamentos: Lama (L) e Peletes (P) e para diferentes doses: 6, 12 e 36 t/ha	92
Figura 7.8 - Efeito da dose (t/ha) no comprimento das folhas no final do ensaio, para os peletes e para a lama	93
Figura 7.9 - Efeito da dose (t/ha) na largura das folhas no final do ensaio, para os peletes e para a lama	93
Figura 7.10 - Efeito da dose (t/ha) no diâmetro do repolho no final do ensaio, para os peletes e para a lama	94
Figura 7.11 - Efeito da dose (t/ha) no peso aéreo seco no final do ensaio para os tratamentos: testemunha, peletes e lama	94
Figura 7.12 - Efeito do tratamento no peso aéreo seco no final do ensaio para as modalidades: testemunha, peletes e lama	95
Figura 7.13 - Efeito do tratamento na largura (Lfolhas), no comprimento (Cfolhas) das folhas e no diâmetro do repolho no final do ensaio para as modalidades: testemunha, peletes e lama	95
Figura 7.14 - Efeito da dose no número de folhas de alface (<i>Latuca sativa</i>) desenvolvidas, para o tratamento com a lama, aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP)	96
Figura 7.15 - Efeito da dose no número de folhas de alface (<i>Latuca sativa</i>) desenvolvidas, para o tratamento com os peletes, aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP)	96
Figura 7.16 - Efeito da dose no número de folhas de alface (<i>Latuca sativa</i>) em desenvolvimento, para os seguintes tratamentos: testemunha, peletes e lama aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP).....	97
Figura 7.17 - Efeito do tratamento no número de folhas de alface (<i>Latuca sativa</i>) desenvolvidas, para os seguintes tratamentos: testemunha, peletes e lama aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP).....	98
Figura 7.18 - Efeito do tratamento no número de folhas de alface (<i>Latuca sativa</i>) em desenvolvimento, para os seguintes tratamentos: testemunha, peletes e lama aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP)	98
Figura 7.19 - Aparecimento de necroses marginais para o tratamento com os peletes.....	99
Figura 7.20 - Aparecimento da Botrytis em algumas folhas de alface	99
Figura 7.21 - Assimilação dos principais nutrientes em função do pH do solo.....	101

ÍNDICE DE QUADROS

Capítulo 1

Quadro 1.1 - Valores-limite da concentração de metais pesados nos solos e nas lamas (expressos em mg/kg matéria seca) ^{8,11}	8
---	---

Capítulo 2

Quadro 2.1 - Estimativa da produção de lamas nos anos de 1994, 1999 e 2006 (em matéria seca) ⁵⁸	16
--	----

Capítulo 3

Quadro 3.1 - Principais processos de tratamento de lamas de ETAR (adaptado ⁵⁴)	18
Quadro 3.2 - Comparação entre os processos de desidratação manual e desidratação mecânica.....	30
Quadro 3.3 - Tipos de secadores ⁷⁶	31

Capítulo 4

Quadro 4.1 - Composição típica dos biossólidos.....	38
Quadro 4.2 - Comparação entre os teores dos macro-elementos N:P:K dos fertilizantes comerciais e dos biossólidos (adaptado ⁵⁴)	40
Quadro 4.3 - Efeito do processo de tratamento sobre as formas de azoto nos biossólidos (adaptado ⁸¹)	40
Quadro 4.4 - Efeito do processo de tratamento das lamas sobre a taxa de mineralização do azoto orgânico no 1º ano de aplicação dos biossólidos (adaptado ⁸¹)	41
Quadro 4.5 - Principais fontes domésticas de elementos metálicos tóxicos (adaptado ⁸²)	43
Quadro 4.6 - Principais fontes industriais dos metais pesados	44
Quadro 4.7 - Tempo de sobrevivência dos microorganismos patogénicos no solo e vegetais sob temperatura ambiente de 20-30°C ⁸⁶	46
Quadro 4.8 - Classificação do pH (H ₂ O) do solo ⁸⁷	47
Quadro 4.9 - Efeito sobre o pH da camada superficial (0-30 cm) de um solo franco-limo após 7 anos de aplicação de biossólidos e de sulfato de amónio (adaptado ⁸¹).....	48
Quadro 4.10 - Características dos solos incluídos na superfície agrícola portuguesa de Portugal Continental ⁹³	55

Capítulo 5

Quadro 5.1 - Quantidades típicas da cal adicionada para diferentes tipos de lamas líquidas (adaptado ⁵⁴).59	
Quadro 5.2 - Influência da adição de CaO sobre diversos parâmetros bacteriológicos, 4 horas após mistura, 20°C (adaptado ⁹⁴)	62
Quadro 5.3 - Influência da adição de CaO e do período de armazenamento sobre diversos parâmetros bacteriológicos, 4 horas após mistura, 20°C (adaptado ⁹⁴)	62
Quadro 5.4 - Efeito de longos períodos de armazenamento sobre as características das lamas após tratamento com 10% de CaO (em relação à matéria seca) (adaptado ⁹⁴).....	65
Quadro 5.5 - Principais zonas características do corpo do extrusor ¹⁰³	68
Quadro 5.6 - Principais fenómenos físicos, físico-químicos, químicos e microbiológicos que ocorrem durante o processo de extrusão ¹⁰³	69

Capítulo 6

Quadro 6.1 - Relações volume de turfa e volume de peletes/lama para cada tratamento, expressas em ml por vaso	74
Quadro 6.2 - Valores de densidade a granel, expressas em g/ml.....	74
Quadro 6.3 - Quantidades de peletes e de lama aplicadas por vaso, expressas em g/vaso	75
Quadro 6.4 - Caracterização da adubação efectuada por vaso.....	75

Quadro 6.5 - Caracterização inicial do solo no início do ensaio	76
Quadro 6.6 - Quantidades de peletes e de lama aplicadas (g) em matéria fresca, por vaso de 6 kg de solo arenoso em doses equivalentes a 6, 12 e 36 t/ha m.s	76
Quadro 6.7 - Valores de referência no solo para a cultura da alface, expressos em mg/kg solo ¹¹⁴	77
Quadro 6.8 - Tipos de adubos e respectivas doses de aplicação, expressas em mg/vaso	77
Quadro 6.9 - Dotação de água de rega para as várias fases do ciclo, expressa em g/vaso.....	78
Quadro 6.10 - Dotação total de água para os vários tratamentos, expressa em g/vaso.....	78
Quadro 6.11 - Parâmetros analisados nos resíduos orgânicos, matéria foliar e solo	79

Capítulo 7

Quadro 7.1 - Teor de matéria seca e pH da lama e da lama tratada com cal após 24 horas à temperatura ambiente ([média+desvio padrão(DP)+coeficiente de variação de Pearson (CVP) (n=3)])	81
Quadro 7.2 - Resistência à compressão para diferentes períodos de cura (7, 14 e 28 dias) expressa em N/mm ² para a lama e para as diferentes misturas lama+ cal (valores [média+desvio padrão (n=6)])	82
Quadro 7.3 - Análise de correlação linear entre as variáveis: dose, tempo de cura e força de compressão.....	83
Quadro 7.4 - Caracterização analítica da lama e dos peletes (valores [média+desvio padrão (DP)+coeficiente de variação de Pearson (CVP) (n=3)] expressos em função da matéria seca a 105°C)	85
Quadro 7.5 - Valor neutralizante dos principais compostos presentes nos correctivos minerais alcalinizantes usados na correcção da acidez dos solos e quantidades que corrigem a mesma quantidade de ácidos que uma tonelada de CaCO ₃ ¹²⁸	85
Quadro 7.6 - Tolerância de algumas culturas à salinidade do solo ⁷⁹	86
Quadro 7.7 - Caracterização analítica (metais pesados) da lama e dos peletes (valores [média + desvio padrão (DP) + coeficiente de variação de Pearson (CVP) (n=3)], expressos em mg.kg ⁻¹ na matéria seca a 105°C) ^{11,28}	87
Quadro 7.8 - Principais aspectos fertilizantes de alguns correctivos orgânicos, em comparação com os valores obtidos para os peletes e para a lama analisada (valores expressos em % matéria seca)	87
Quadro 7.9 - Análises microbiológicas efectuadas sobre a lama e peletes (Pesquisa de <i>Salmonella</i> e <i>E.coli</i>)	88
Quadro 7.10 - Avaliação do Grau de maturação do peletes e da lama (valores [média + desvio padrão (DP) + coeficiente de variação de Pearson (CVP)]	90
Quadro 7.11 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] do pH, humidade, matéria orgânica, condutividade eléctrica (CE) e teor de nutrientes extraíveis no extracto aquoso 1:5 em volume, para os tratamentos: testemunha, lama e peletes após a extracção pela cultura	100
Quadro 7.12 - Quantidades de azoto total [(expresso em kg/ha e em g/vaso) em matéria seca] aplicados no ensaio de vegetação	101
Quadro 7.13 - Quantidades estimadas de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (expressas em g/m ² e g/vaso, em matéria seca) aplicadas no ensaio de vegetação em vaso para o tratamento com a lama (L) e com os peletes (P).....	102
Quadro 7.14 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] dos metais extraíveis pelo método de Lakanen no extracto aquoso 1:10 em volume, para os tratamentos: testemunha, lama e peletes após a extracção pela cultura.....	103
Quadro 7.15 - Quantidades estimadas de metais (expressos em kg m.s/ha e mg m.s./vaso) aplicadas no ensaio de vegetação em vaso	103
Quadro 7.16 - Valores-limite das quantidades de metais pesados que anualmente será permitido aplicar ao solo numa base de uma média de dez anos (kg m.s./ha/ano) ^{11,28}	104
Quadro 7.17 - Teores foliares encontrados no repolho pela adição de doses crescentes de lama e de peletes [média+desvio padrão (n=4)]	104
Quadro 7.18 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] do azoto total presente por repolho m.s., para os diferentes tratamentos: testemunha, lama e peletes	105
Quadro 7.19 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] do fósforo e potássio totais presentes expressos em mg/repolho m.s., para os diferentes tratamentos: testemunha, lama e peletes	106
Quadro 7.20 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] dos metais pesados presentes nas amostras de alface, para os diferentes tratamentos: testemunha, lama e peletes após a extracção pela cultura.....	107

ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

Abreviatura	Simbologia
AEA	Agência Europeia do Ambiente
CBPA	Código das Boas Práticas Agrícolas
CCE	Comissão da Comunidade Europeia
CE	Comunidade Europeia
CEE	Comunidade Económica Europeia
CEN	Comité Europeu Normalização
CTC	Capacidade de Troca Catiónica
DGA	Direcção Geral do Ambiente
DRAEDM	Direcção Regional da Agricultura de Entre Douro e Minho
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
INAG	Instituto Nacional da Água
INSAAR	Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento e Águas Residuais
IST	Instituto Superior Técnico
LER	Lista Europeia dos Resíduos
LQARS	Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva
MADRP	Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas
N: P: K	Azoto: Fósforo: Potássio
NP	Norma Portuguesa
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
UE	União Europeia

1 Introdução

A intervenção humana sobre a Natureza tem crescido ao longo dos tempos, devido ao constante desenvolvimento tecnológico e crescimento populacional. Ultimamente, conceitos como preservação ambiental e desenvolvimento sustentável tornaram-se usuais e a sua inclusão nas políticas e estratégias regionais e nacionais é uma exigência incontornável.

Há inúmeras definições para o conceito de desenvolvimento sustentável, mas todas elas pressupõem a coexistência de três processos: o desenvolvimento tecnológico, a manutenção das condições ambientais adequadas para a existência das diferentes formas de vida no planeta e a garantia da sua continuidade no futuro.

Infelizmente, o terceiro componente remete-se ao futuro, e, por vezes, o espírito imediatista do Homem tende a adiar atitudes proactivas e sustentáveis em prol de outras que tragam resultados imediatos e a curto prazo.

Contudo, é inegável que para a sobrevivência no planeta, a concretização do desenvolvimento sustentável é a única alternativa.

Neste contexto, a relação vital do Homem com a água tem sido objecto de importantes discussões e tomadas de posição, preocupadas com a notória redução da sua disponibilidade e da qualidade deste recurso natural.

A necessidade de melhorar os actuais processos de tratamento, para que seja garantida uma água de qualidade, comprova a perda de qualidade que esta tem sofrido ao longo dos tempos. Por sua vez, o aumento do seu consumo pelo crescimento demográfico e pelo desenvolvimento tecnológico, tem levado ao agravamento do equilíbrio procura/oferta. Segundo a Comissão da Comunidade Europeia (CCE), desde 1970 a quantidade de água disponível por pessoa baixou 40% e 2 em cada 5 pessoas têm problemas de falta de água a nível mundial.¹

Esse maior consumo de água tem como consequência a geração de maior quantidade de águas usadas, acrescidas de substâncias poluentes provenientes do metabolismo humano e de actividades domésticas, constituindo as chamadas águas residuais domésticas (o vulgar esgoto).

A essas águas residuais, normalmente crescem as águas residuais industriais e as águas pluviais igualmente contaminadas, formando o que se designa por águas residuais urbanas.

Estas águas residuais urbanas antes de retornarem aos corpos de água necessitam de ser devidamente tratadas em estações adequadas (estações de tratamento de águas residuais – ETAR), de forma a garantir/manter a qualidade dos corpos receptores e a qualidade da vida aí existente.

O normal funcionamento destas unidades origina, como subproduto, volumosas quantidades de resíduos, as lamas, às quais importa dar um destino adequado. Mas, qual é o destino mais adequado? Incinerá-las? Depositá-las em aterro? Ou valorizá-las, utilizando-as na agricultura?

Este é um problema que diz respeito não só às entidades gestoras das ETAR, mas também a toda a comunidade, dado o contributo de todos os seus membros para o problema e a respectiva solução. Assim, deverá partir de todos, dentro das suas possibilidades, a iniciativa para definir a solução mais adequada.

Esta passará obrigatoriamente pela avaliação dos diversos factores envolvidos de ordem social, económica e ambiental. A solução ideal deverá ter baixo custo, reduzidos impactos ambientais e ser aceite maioritariamente pelas populações locais.

A aplicação das lamas na agricultura é a opção privilegiada na UE, comparativamente com a incineração ou deposição em aterro, permitindo tirar partido do seu valor fertilizante na melhoria da fertilidade física e química dos solos e do estado nutritivo das culturas. Inúmeros estudos comprovam que a aplicação das lamas na agricultura aumenta a produção das culturas e melhora a qualidade dos solos, ao veicular nutrientes e matéria orgânica.²⁻⁵ Por sua vez, a sua utilização na agricultura permite economizar nas necessidades de adubação química para atender às exigências nutritivas das culturas. Deste modo, a aplicação na agricultura coaduna-se bem com o conceito de desenvolvimento sustentável, ao fechar um ciclo que se iniciou com a retirada dos nutrientes na produção dos bens alimentares.

A incineração não tira partido do importante valor fertilizante das lamas, é comparativamente cara e goza de má imagem pública. Deve ser-lhe dada preferência nas lamas fortemente contaminadas por substâncias tóxicas prejudiciais que inviabilizam a sua aplicação na agricultura. Por sua vez, a incineração sem aproveitamento de energia contraria o conceito de desenvolvimento sustentável, pois há queima de um combustível fóssil – recurso natural não renovável – para produzir nada. Além de que não se poderá considerar propriamente como um processo de destino final, ao resultar um resíduo, as cinzas, a que importa dar o destino adequado. O máximo que se pode esperar é o aproveitamento dessas cinzas resultantes da queima em algum sector produtivo, possivelmente incorporadas nalgum material, não necessitando por isso de ser depositadas.

A deposição em aterro, à semelhança da incineração, não permite tirar partido do valor fertilizante das lamas. Além disso é uma solução condenada, tanto em Portugal como na maioria dos países europeus, pois a tendência que se desenha é de limitar cada vez mais a deposição em aterro de materiais eventualmente recicláveis ou valorizáveis por outras vias, nomeadamente os resíduos orgânicos, e, em particular, as lamas de ETAR. Como tal, a tendência é de que os custos da sua deposição cresçam exponencialmente, quer pelo referido anteriormente, quer pela escassez de áreas disponíveis para deposição. Por sua vez, a oposição pública (síndrome *NIMBY* – “not in my backyard”) torna a aplicação da deposição complicada. Tal como a incineração também contraria o conceito de desenvolvimento sustentável: o balanço ambiental jamais é nivelado, ao tornar o solo improdutivo, e, por sua vez, proporcionar a libertação de gases com efeito de estufa, tais como o metano e o dióxido de carbono, para não falar dos maus odores e do lixiviado que pode contaminar as águas subterrâneas.

Além das substâncias valiosas que as lamas veiculam, estas podem também conter substâncias prejudiciais, em maior ou menor quantidade, as quais as poderão desvalorizar e inviabilizar a sua aplicação nos solos. Entre elas citam-se os chamados metais pesados e certos compostos orgânicos genericamente designados por micropoluentes orgânicos. As lamas podem ainda veicular organismos patogénicos, potenciais causadores de doenças.

Como tal, nem todas as lamas poderão ser aplicadas na agricultura. Apenas podem ser aplicadas aquelas que apresentem concentrações inferiores aos valores-limite estabelecidos pela legislação em vigor, designadamente para os metais pesados, micropoluentes orgânicos e organismos patogénicos. Além de cumprir esses valores, as lamas aplicadas devem cumprir outras normas para evitar ou reduzir potenciais riscos de poluição ambiental.

As lamas que cumpram esses padrões constituem fertilizantes valiosos, cuja correcta aplicação nos solos se faz sem qualquer risco para a saúde e para o ambiente. São produtos biogénicos, isto é, geradores de vida, e, merecem, por isso, a designação de bio sólidos.

O uso agrícola dos bio sólidos tem sido exaustivamente estudado em todo o mundo, não existindo registo de nenhum efeito adverso sobre o ambiente ou sobre a cadeia dos alimentos, quando aplicados dentro das regulamentações existentes para o efeito.⁶

Contudo, a garantia desta validade é apenas possível se as lamas sofrerem tratamentos complementares que garantam a sua estabilização física, química e biológica, permitindo tirar partido das substâncias fertilizantes que contêm, e, ao mesmo tempo, minimizar o efeito negativo das substâncias perniciosas que nelas estejam presentes.

À maior exigência de qualidade corresponde, naturalmente, uma ganho de confiança por parte dos seus utilizadores, assim como uma maior aceitabilidade por parte dos consumidores dos produtos agrícolas obtidos em solos onde se aplicam os biossólidos.

Contudo, para que esse ganho seja ainda maior, importa melhorar outros aspectos frequentemente negligenciados, que têm, de alguma forma, travado a adesão dos agricultores na sua utilização, como é o caso das propriedades físicas das lamas.

A grande maioria dos agricultores considera o manuseamento das lamas complicado, inconveniente, pestilento e perigoso. Por outro lado, colocam-se-lhes inúmeros problemas no seu armazenamento, ao haver o risco de lixiviação de substâncias tóxicas, contaminando e poluindo os lençóis freáticos, assim como a geração de odores incomodativos para a vizinhança.

Ora, remetendo-nos ao aspecto social referido anteriormente, sob o qual incube a cada um de nós dar o seu contributo para encontrar a melhor solução para esta problemática, idealizou-se um esquema de tratamento passível de melhorar as características físicas das lamas, tornando-as mais atractivas para o agricultor.

Este tratamento baseia-se numa operação de conformação das lamas, previamente desidratadas, num processo de extrusão antecedido de mistura com cal, de forma a garantir a sua estabilização química e bacteriológica, seguido dum período de cura à temperatura ambiente.

Com este esquema de tratamento pretende-se transformar as lamas pastosas em grânulos – peletes – com dimensões idênticas às dos fertilizantes usualmente utilizados pelos agricultores. Sob esta forma granular o seu uso na agricultura torna-se mais apelativo para os agricultores, pois é-lhes assegurada facilidade, rapidez, uniformidade e economia na sua aplicação no solo.

Deste modo, o principal objectivo deste trabalho foi avaliar se o esquema de tratamento idealizado conduz a um ganho significativo nas propriedades físicas das lamas e se não reduz o valor inicial das lamas como fertilizantes. Para este efeito foram definidos 4 tipos de ensaios que se descrevem sucintamente, em seguida:

- **1.º Ensaio físicos**

Para, mediante ensaios de compressão uniaxial não confinada, avaliar as propriedades físicas dos peletes com diferentes doses de cal e diferentes períodos de cura pós-extrusão. Testaram-se igualmente diferentes cenários de secagem pós-extrusão e o seu efeito sobre a resistência à compressão dos provetes.

- **2.º Ensaio químicos**

No sentido de definir as principais alterações químicas sofridas pela lama ao ser processada sob a forma de peletes.

- **3.º Ensaio bacteriológicos**

Para verificar o grau de higienização da lama durante o processo em que houve adição de cal.

- **4.º Ensaaios biológicos**

De modo a avaliar o valor fertilizante dos peletes comparativamente às lamas, aplicando diferentes doses de ambos os resíduos orgânicos sobre duas culturas distintas de alface e de cevada.

Os ensaios físicos e a determinação de metais pesados foram realizados nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Os restantes ensaios realizaram-se nos laboratórios da Direcção Regional da Agricultura de Entre Douro e Minho (DRAEDM), tendo-se para tal estabelecido um protocolo de cooperação e apoio técnico entre as duas instituições referidas.

O presente trabalho pretendeu também reunir os aspectos mais importantes na gestão das lamas de ETAR, começando por um breve enquadramento histórico no sub capítulo 1.1. A este segue-se uma referência à principal legislação aplicável no sub capítulo 1.2, uma breve descrição das lamas no capítulo 2 e uma outra sobre os principais processos de tratamento, armazenamento, transporte e destino final das lamas no capítulo 3.

Sendo a utilização na agricultura a opção privilegiada, apresentam-se no capítulo 4, de uma forma clara e acessível, as principais razões que a justificam e os principais cuidados e limitações que importa conhecer.

Nos restantes capítulos, como no capítulo 5, é feita a descrição do esquema de tratamento idealizado e a revisão bibliográfica sobre os principais processos envolvidos. O capítulo 6 descreve a metodologia aplicada terminando com a discussão dos resultados no capítulo 7 e no capítulo 8 apresentam-se as conclusões com as principais propostas de investigação futura neste domínio e perspectivas de melhoria do esquema idealizado no capítulo 9. No capítulo 10 apresentam-se as referências bibliográficas consultadas.

Este trabalho pretende também ser um pequeno contributo para a promoção da utilização das lamas na agricultura, quando devidamente tratadas. Visa, portanto, contribuir para a resolução dum problema ambiental que está a ganhar uma dimensão significativa, bem como para a melhoria da qualidade dos solos portugueses, através do fornecimento de matéria orgânica e nutrientes.

1.1 Enquadramento histórico

Historicamente, a problemática da recolha das águas residuais e do seu encaminhamento teve o seu início quando as primeiras comunidades se constituíram. Nessa altura, a baixa densidade populacional permitia que a sua dispersão em terrenos adjacentes ou canais fluviais fosse uma opção viável, pois não eram ultrapassadas as capacidades de depuração desses meios. Em 3750 a.C. foram construídas galerias de esgoto em Nipur (Índia) e na Babilónia. Em 3100 a.C. há indícios históricos do emprego de manilhas cerâmicas.⁷ Na Roma imperial eram feitas ligações directas das casas até aos canais. Contudo, tratando-se de uma iniciativa particular, poucas casas apresentavam essas ligações.

Durante a Idade Média não há registo de grandes avanços em matéria de recolha de águas e/ou descarga das águas residuais. Esta despreocupação, aliada ao desconhecimento prático da microbiologia que se manteve até meados do século XIX, levaram ao surgimento de inúmeras epidemias que assolaram a Europa e se mantiveram até ao século XIX. Esta época coincidiu com o crescimento das populações e consequente incapacidade em gerir o aumento das águas residuais produzidas, dada a inexistência de infra-estruturas adequadas, ou, quando existiam, devido ao seu funcionamento deficitário. As primeiras redes colectoras surgiram em Londres somente em 1815, seguindo-se Hamburgo, em 1842, e Paris, em 1880.⁷

Os tratamentos dos esgotos eram praticamente inexistentes, limitando-se à sua descarga nos corpos receptores, que se tornavam cada vez mais poluídos. A Inglaterra, devido à pouca extensão dos seus rios, ao crescimento acelerado de algumas cidades e episódios graves de epidemias de cólera (1831 e 1848, onde há registo de 50 mil e 25 mil vítimas fatais, respectivamente) foi um dos países mais fortemente afectados pelas consequências da poluição hídrica, decorrente do lançamento (sem tratamento) dos seus esgotos nos corpos de água. Como tal, foi um dos primeiros países a preocupar-se com esta problemática, sendo pioneiro na promulgação das primeiras leis de saneamento e saúde pública. Foi igualmente Londres a sede dum marco importante na evolução do saneamento, pois foi onde John Snow provou cientificamente a relação entre a cólera e a qualidade deficitária das águas.

Em 1860 surgiu o dispositivo de Mouras para tratar as lamas de depuração por um processo anaeróbio; em 1865, fizeram-se as primeiras experiências sobre degradação microbiológica das lamas. Os fundamentos biológicos que acabariam por dar origem ao processo de tratamento de esgotos, através de lamas activadas, começaram a ser investigados na Inglaterra em 1882, tendo culminado com o desenvolvimento do processo das lamas activadas em 1914, por Arden e Lockett.⁷

Com o grande crescimento das cidades, ocorrido a partir, sobretudo, do século XIX e início do século XX, outros países seguiram o exemplo inglês e começaram a preocupar-se com o tratamento dos seus esgotos, criando as primeiras estações de tratamento de águas residuais. Disso são exemplo os EUA onde se construiu, em 1887, a Estação Experimental Lawrence, em Massachusetts.⁷

Pode afirmar-se que a partir daí, os países desenvolvidos, em especial a Inglaterra, a maioria dos outros países europeus, os EUA, o Canadá, a extinta União Soviética e o Japão, todos começaram a tratar os esgotos das suas cidades.

O aumento do número de ETAR a nível mundial, com tratamentos cada vez mais exigentes, conduziu ao agravamento do problema da geração das lamas e do destino adequado a dar-lhes.

A inexistência de estudos apropriados e dum controlo ambiental eficaz, assim como o desconhecimento geral da presença de eventuais produtos indesejáveis para o ambiente, solo ou água, conduziu a que nem sempre fosse dado às lamas o destino ambientalmente mais correcto.

Em consequência, começou-se a regulamentar os destinos a dar às lamas, através de convenções ou acordos internacionais. Destas há 3 convenções que fixaram acordos de controlo de deposição dos resíduos no mar, com o objectivo de preservar a sua qualidade e da vida aí existente.

- **Convenção de Oslo (1972)**

O principal objectivo desta Convenção foi prevenir a poluição marinha originada pela descarga sistemática das águas residuais sem tratamento e pelos efluentes de navios e aeronaves. A Convenção emitiu uma declaração assinada e ratificada pelos 13 países banhados pelo Mar do Norte e Atlântico Nordeste: Grã-Bretanha, Bélgica, Dinamarca, França, Alemanha, Irlanda, Holanda, Finlândia, Noruega, Espanha e Suécia. Segundo esta declaração, a descarga das lamas no mar era permitida desde que as percentagens de substâncias tóxicas fossem inferiores aos padrões estabelecidos e que se obtivesse a necessária licença dos órgãos competentes de cada país.

- **Convenção de Londres (1972)**

Esta Convenção é similar à de Oslo, porém aplicável a todos os oceanos e mares, tendo sido assinada por 60 países.

- **Convenção de Paris (1974)**

Esta Convenção foi assinada pela Comunidade Económica Europeia e mais 14 países europeus banhados pelo Atlântico Nordeste (à altura ainda não pertencentes à Comunidade Europeia). Foi ratificada por todos os países, à excepção da Bélgica, Irlanda e Luxemburgo. O formato da Convenção de Paris foi idêntico às de Oslo e de Londres, mas aplicável a poluição proveniente de fontes terrestres, particularmente através de canalizações submarinas e outras.

Nesta década uma das práticas mais utilizadas para o destino final das lamas era a sua aplicação nos solos agrícolas para melhoria da fertilidade física e química. Contudo, com o aparecimento de estudos adequados, descobriu-se que nem todas as lamas poderiam ser utilizadas na agricultura, visto poderem veicular elementos poluentes, nomeadamente organismos patogénicos e metais pesados. Estes estudos começaram a preocupar a comunidade científica, que ao saber dos eventuais riscos que a presença destes poluentes poderia ter sobre os seres humanos e animais, demonstrou a necessidade de desenvolver pesquisas mais conclusivas. Nesse intuito foi criada uma Comissão pela Comunidade Europeia encarregue de estudar o problema e regulamentar o uso das lamas na agricultura. Em 1986, o Conselho das Comunidades Europeias tendo em conta a proposta dessa Comissão, o parecer do Parlamento Europeu e do Comité Económico e Social, adoptou a Directiva Comunitária n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de Junho, que tem por principal objectivo regulamentar a utilização das lamas de depuração na agricultura, sem prejuízo para os solos, vegetação, animais e homem, encorajando ao mesmo tempo a sua correcta utilização.⁸

Em especial, as principais disposições da Directiva 86/278/CEE são as seguintes:

- definição de “lamas” (lamas de depuração, lamas residuais de fossas sépticas e outras lamas), “tratamento” (tratamento biológico, químico ou térmico, armazenagem a longo prazo ou qualquer outro método adequado, de modo a reduzir, significativamente, o seu poder de fermentação e os inconvenientes sanitários da sua utilização) e “utilização” (disseminação das lamas sobre o solo ou qualquer outra aplicação das lamas sobre e no solo) (artigo 2º);

- valores relativos às concentrações de metais pesados nos solos receptores de lamas, às concentrações de metais pesados nas lamas e às quantidades máximas anuais destes metais pesados que podem ser introduzidas nos solos de utilização agrícola (artigo 4º);
- proibição da utilização de lamas sempre que a concentração de um ou vários metais pesados nos solos ultrapasse os valores-limite (artigo 5º);
- obrigatoriedade do tratamento das lamas (artigo 6º);
- proibição da aplicação das lamas em determinadas culturas e antes de expirar um certo prazo (artigo 7º);
- a utilização das lamas deve ter em conta as necessidades nutricionais das plantas (artigo 8º);
- métodos de referência de amostragem e de análise dos solos e das lamas (artigo 9º);
- obrigação de os Estados-Membros manterem registos actualizados sobre as quantidades de lamas produzidas e as entregas à agricultura, os locais de utilização das lamas e outras informações (artigo 10º);
- requisitos respeitantes à apresentação de relatórios (artigo 17º).

O artigo 17º da Directiva estipula que os Estados-Membros devem elaborar de 4 em 4 anos, e pela primeira vez 5 anos após a aplicação da Directiva, um relatório de síntese sobre a utilização das lamas na agricultura.

Os Estados-Membros transpuseram a Directiva supra-mencionada para o seu Direito interno, sendo o mesmo mais exigente (mas não menos exigente) que a Directiva em termos de valores-limite a cumprir. A grande maioria dos Estados-Membros optaram por limites mais restritos que os propostos pela Directiva e/ou detalharam especificamente os requisitos a cumprir; diversos países adicionaram parâmetros suplementares. Importa, contudo, referir que valores-limite mais restritos não implicam obrigatoriamente menor aplicação de lamas na agricultura, como se demonstra na figura 1.1, visto a Dinamarca ter alguns dos valores mais restritivos e o Reino Unido alguns dos menos restritivos.

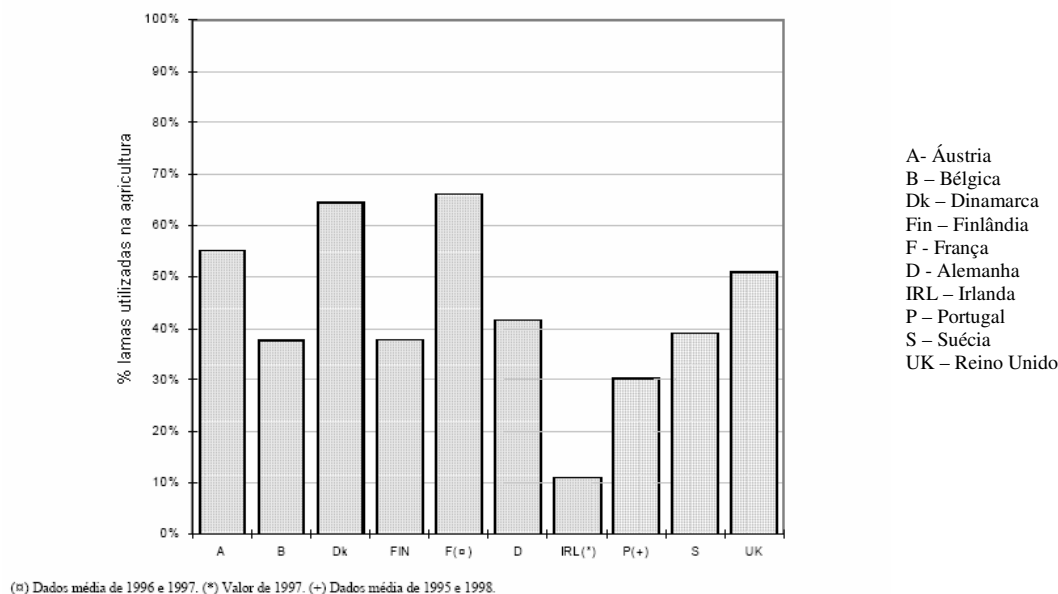


Figura 1.1 - Proporção de lamas utilizadas na agricultura por total de lamas produzidas durante o período 1995-1997, nos diversos Estados-Membros⁹

No caso português a transposição foi feita através do Decreto-Lei n.º 446/91 de 22 de Novembro e Portarias n.º 176/96 (2ª Série) e n.º 177/96 (2ª Série), tendo-se optado pela prevenção ao nível da fixação dos valores-limite das concentrações de metais pesados nos solos receptores

das lamas, assim como das concentrações destes elementos nas lamas.^{10,11,12} No quadro 1.1 apresentam-se os valores-limite adoptados por Portugal, comparativamente com os definidos pela Directiva 86/278/CEE.

Quadro 1.1 - Valores-limite da concentração de metais pesados nos solos e nas lamas (expressos em mg/kg matéria seca)^{8,11}

Parâmetro	Valores-limite de concentração de metais pesados					
	Solo				Lama	
	Directiva 86/278/CEE	Portaria n.º 176/96 (2ª série)			Directiva 86/278/CEE	Portaria n.º 176/96 (2ª série)
	Anexo 1A	Anexo I			Anexo 1B	Anexo II
	6<pH>7	pH≤5,5	5,5<pH≤7	pH>7*		
Cádmio (Cd)	1-3	1	3	4	20-40	20
Crómio (Cr)	-	50	200	300	-	1000
Cobre (Cu)	50-140	50	100	200	1000-1750	1000
Mercúrio (Hg)	1-1,5	1	1,5	2	16-25	16
Níquel (Ni)	30-75	30	75	110	300-400	300
Chumbo (Pb)	50-300	50	300	450	750-1200	750
Zinco (Zn)	150-300	150	300	450	2500-4000	2500

* Portugal adoptou valores menos severos para solos com pH superior a 7 e onde se efectuem culturas com fins comerciais e destinados unicamente ao consumo animal. As Direcções Regionais da Agricultura indicarão o número e a natureza dos locais em causa.

Relativamente às quantidades máximas de lamas (matéria seca) aplicáveis (número 2, alínea a) do artigo 5º da Directiva), em Portugal, 6 toneladas por hectare e por ano é, em princípio, a quantidade máxima permitida de lamas que pode ser utilizada na agricultura, embora uma menor concentração de metais pesados permita aumentar esta quantidade.⁹

A Comissão da Comunidade Europeia refere repetidamente que a Directiva de Conselho nº 86/278/CEE de 12 de Junho tem sido um sucesso, na medida que não tem originado relatórios de efeitos adversos da sua aplicação. Refere igualmente que os estudos realizados nos passados trinta anos e os que dão a sua continuidade, demonstram que um uso responsável e uma eficiente monitorização das lamas na agricultura, de acordo com a Directiva supra-mencionada, não provoca nem danos ambientais nem põe em perigo a cadeia alimentar.⁶

Entretanto, em Maio de 1991, o Conselho das Comunidades Europeias adoptou a Directiva 91/271/CEE que define metas temporais e níveis de tratamento com vista à melhoria dos níveis de atendimento e qualidade de sistemas de drenagem e tratamento de águas residuais.¹³ A sua transposição fez-se através do Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de Junho.¹⁴

Em 1995, apenas 77% da população portuguesa estava ligada a uma rede pública de água, quando no conjunto dos países da União Europeia esse valor ascendia a 95%. Adicionalmente, apenas 55% da população era servida por rede pública de esgotos e apenas 21% estava ligada a uma estação de tratamento desses efluentes. No espaço da União Europeia estes números eram de 85% e 75%, respectivamente.¹⁵ Na figura 1.2 apresentam-se as percentagens de população servida por estações de tratamento de águas residuais nos vários Estados-Membros em 1990.

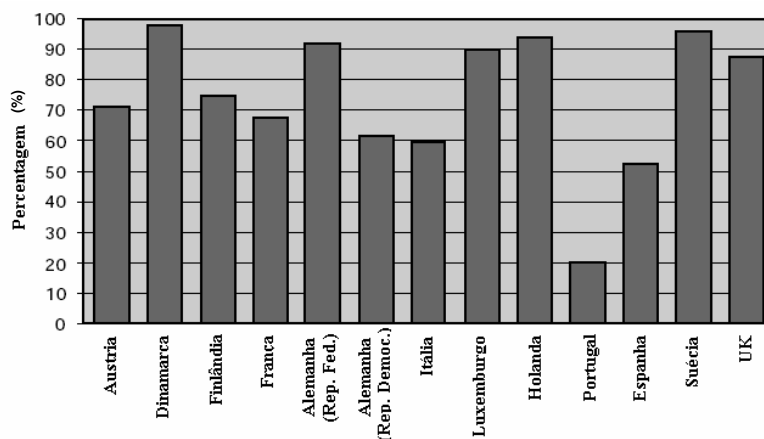


Figura 1.2 - Percentagem de população servida por estações de tratamento de águas residuais em 1990 nos vários Estados-Membros¹⁶

Como tal, a prossecução das metas impostas pela Comunidade Europeia (CE) obrigava a profundas alterações a nível nacional, através da criação de inúmeras infra-estruturas capazes de assegurar um aumento no nível de atendimento, assim como o cumprimento das exigências de tratamento.

Segundo o estabelecido pelo último Plano de Desenvolvimento Regional (2000-2006), prevê-se que até 2006 o País atinja um nível médio de atendimento de 90% em drenagem e tratamento de águas residuais.¹⁷

Por sua vez, a criação de numerosas estações de tratamento de águas residuais aliada aos acréscimos das exigências ao nível do tratamento, tem como consequência inevitável um aumento significativo da produção dos resíduos – as lamas – para o qual é necessário encontrar soluções ambientalmente adequadas e sustentáveis.

Segundo a abordagem da CE em matéria de política de gestão de resíduos, baseada no princípio orientador da hierarquia, deve-se privilegiar em primeiro lugar a sua prevenção (que no caso se afigura impraticável), posteriormente a sua recuperação (o que inclui a reutilização, a reciclagem e a recuperação energética, privilegiando-se a recuperação material, através da sua valorização agrícola) e, por último, a sua eliminação (que compreende a incineração sem recuperação energética e a deposição em aterro).¹⁸

Assim sendo, a reciclagem agrícola deverá ser encarada com uma alternativa sustentável para solucionar este problema, desde que se garanta que o processo de tratamento e aplicação seja acompanhado com rigor e clareza e que obedeça à legislação, cada vez mais exigente, em matéria de protecção dos solos, das culturas e da saúde pública.

O sucesso da sua viabilidade apenas será possível se se promover a sua credibilidade, através da sua qualidade, transparência e monitorização de todo o processo.

É importante que os utilizadores sintam segurança na sua utilização e que a opinião pública passe a encarar as lamas devidamente tratadas como produtos valiosos, nomeadamente para os nossos solos carentes em matéria orgânica e nutrientes, como produtos não perigosos e amigos do ambiente, quando correctamente usados.

1.2 Legislação sobre gestão de lamas de ETAR

Neste capítulo pretende-se fazer uma abordagem sumária da legislação comunitária e nacional vigente, com implicações directas e indirectas na produção de lamas, processos de tratamento e destino final.

A Directiva Comunitária com especiais implicações sobre a produção de lamas, impondo exigências cada vez mais rigorosas em termos de tratamento de efluentes urbanos, é a Directiva n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio, transposta pelos diversos estados membros para Direito interno, o que no caso de Portugal foi feito através do Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de Junho.^{13,14} A Directiva referida proíbe a deposição de lamas em águas superficiais, a partir de 31 de Dezembro de 1998. O Decreto-Lei define os requisitos relativos aos sistemas de drenagem e tratamento das águas residuais. Em função da dimensão do aglomerado e da caracterização da zona de descarga, são definidos prazos para a criação de infra-estruturas que tornem o tratamento das águas residuais mais exigente. No referido Decreto é aprovada uma lista das zonas menos sensíveis e zonas mais sensíveis, assim como os respectivos mapas. Este Decreto-Lei foi, entretanto, alterado pelo Decreto-Lei n.º 348/98, em transposição para a ordem jurídica nacional da Directiva Comunitária n.º 98/15/CEE, da Comissão, de 21 de Fevereiro, que altera a mencionada Directiva n.º 91/271/CEE, no que respeita a determinados requisitos para a descarga das estações de tratamento de águas residuais urbanas em zonas sensíveis sujeitas a eutrofização.^{19,20} Além desta alteração, e por imposição do Decreto-Lei n.º 152/97, que obriga à revisão da identificação das zonas sensíveis e das zonas menos sensíveis pelo menos de 4 em 4 anos, houve a alteração do Decreto-Lei n.º 261/99 de 7 de Julho (zonas menos sensíveis) e do Decreto-Lei n.º 172/2001 de 26 de Maio (zonas sensíveis), entretanto revogados pelo Decreto-Lei n.º 149/2004, de 22 de Junho, que define ambos os tipos de zonas e mapa respectivo.^{21,22,23}

As lamas resultantes dos diversos processos de tratamento da fase líquida caracterizam-se por apresentarem um teor de sólidos muito baixo, assim como percentagens consideráveis de matéria orgânica, com consequentes riscos da sua decomposição, criando condições de putrefacção e de desenvolvimento de septicidade e libertação de odores desagradáveis. Como tal, importa sujeitá-las a processos de estabilização e tratamento, de forma a facilitar o seu manuseio e transporte, assim como adequá-las à deposição final.

Importa, contudo, reter, que os processos de tratamento a que sejam sujeitas devem ser adequados aos destinos finais perspectivados.

Embora exista uma enorme variedade de técnicas de gestão de lamas, a sua maioria poderá inserir-se em três categorias principais: utilização na agricultura; deposição em aterro sanitário e emprego de tecnologias térmicas. Estas categorias são, como seria expectável, as que estão sujeitas a um enquadramento legislativo mais completo.

Relativamente à utilização das lamas de depuração na agricultura, elas estão sujeitas ao disposto na Directiva Comunitária n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de Junho, transposta para Direito interno pelo Decreto-Lei n.º 446/91 de 22 de Novembro que regulamentam a utilização das lamas de depuração na agricultura, de forma a evitar efeitos nocivos no homem, na água, nos solos, na vegetação e nos animais, promovendo a sua correcta utilização.^{8,10} Neste decreto são fixadas as exigências referentes às condições de aplicação das lamas nos solos cultivados, nomeadamente o cumprimento dos valores-limite de metais pesados presentes nas lamas e nos solos onde se pretende a sua aplicação e as quantidades máximas de metais pesados que, através de lamas, poderão aplicar-se anualmente ao solo com base numa média de 10 anos, definidas pela Portaria n.º 176/96 (2ª Série), de 3 de Outubro.¹¹ A Portaria n.º 177/96 (2ª Série), de 3 de Outubro, criada na sequência do Decreto-Lei referido, define as regras relativas à análise das lamas e dos solos, respectivamente.¹²

Entretanto, mais recentemente foi publicado o Despacho Conjunto n.º 309 – G/2005, de 19 de Abril, dos Ministérios das Cidades, Administração Local, Habitação e Desenvolvimento Regional da Agricultura, Pescas e Florestas e do Ambiente e do Ordenamento do Território, que estabelece o procedimento do processo de licenciamento das operações de valorização agrícola de lamas.²⁴

Ainda, relativamente à utilização das lamas na agricultura, importa referir o Decreto-Lei n.º 235/97 de 3 de Setembro, por transposição para Direito interno da Directiva Comunitária n.º 91/676/CEE, do Conselho, de 12 de Dezembro, relativo à protecção das águas contra a poluição causada por nitratos de origem agrícola.^{25,26} Este Decreto-Lei tem como principais objectivos a redução da poluição da água causada ou induzida por nitratos de origem agrícola, assim como impedir a propagação desta poluição. Neste Decreto-Lei é feita referência ao Código de Boas Práticas Agrícolas (CBPA), que enumera regras e normas a tomar a fim de assegurar um nível geral de protecção da água contra a poluição causada ou induzida por nitratos de origem agrícola. No Código de Boas Práticas Agrícolas é feita referência à utilização das lamas de depuração como correctivo orgânico, dada a sua importância como veiculadores de azoto.²⁷

Convém referir que, presentemente, a Directiva comunitária n.º 86/278/CEE, de 12 de Janeiro, encontra-se em processo de revisão, no sentido de prever novos padrões de qualidade e tornar mais exigentes os que respeitam aos metais pesados.

Nesse seguimento foi elaborado o documento “*Working Document on Sludge 3rd Draft*” tendo em vista o estabelecimento de orientações e principais alterações a incluir numa futura revisão da Directiva actual.²⁸ No Anexo I apresenta-se uma breve análise deste documento de trabalho, privilegiando as principais alterações relativamente à Directiva vigente.

Na impossibilidade da sua aplicação na agricultura, por condicionalismos de ordem ambiental, geográfica ou de política de gestão, as lamas devem ser encarados na categoria de resíduos, e, como tal, sujeitos à legislação que rege o seu manuseamento. De acordo com a Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março, que aprova a lista harmonizada que abrange todos os resíduos, designada por Lista Europeia dos Resíduos (LER), em conformidade com a Decisão n.º 2000/532/CE, da Comissão, de 3 de Maio, alterada pelas Decisões n.º 2001/112/CE, da Comissão, de 16 de Janeiro, 2001/119/CE, da Comissão, de 22 de Janeiro e 2001/573/CE, do Conselho de 23 de Julho, são um resíduo a que corresponde o código 19 08 05 – lamas do tratamento de águas residuais.²⁹⁻³³

O quadro jurídico da gestão dos resíduos foi pela primeira vez definido em Portugal pelo Decreto-Lei n.º 488/85, de 25 de Novembro, que seria revogado 10 anos depois pelo Decreto-Lei n.º 310/95, de 20 de Novembro, por transposição das Directivas Comunitárias n.º 91/156/CEE, do Conselho, de 18 de Março e 91/689/CEE, do Conselho, de 12 de Dezembro.³⁴⁻³⁷ Este Decreto-Lei foi, entretanto, revogado pelo Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 Setembro, que é o actual documento legislativo vigente que rege as regras a que fica sujeita a gestão dos resíduos, classificando as diversas operações de gestão e sujeitando o seu exercício a autorização prévia após cumprimento dos requisitos definidos pela Portaria n.º 961/98 de 10 de Novembro.^{38,39}

Relativamente ao transporte de resíduos em território nacional, as regras a que este fica sujeito são definidas na Portaria n.º 335/97, de 16 de Maio.⁴⁰ O Despacho n.º 8943/97, do Instituto dos Resíduos, de 9 de Outubro (II Série), identifica os guias a utilizar para o transporte de resíduos, em conformidade com o artigo 7º da referida Portaria.⁴¹

Dadas as suas características, as lamas poderão ser consideradas resíduos perigosos, e, como tal, ser regulamentadas pela legislação vigente relativa a este tipo de resíduos, nomeadamente a Directiva n.º 91/689/CEE, do Conselho, de 12 de Dezembro, alterada pela Directiva n.º 94/31/CEE, do Conselho, de 27 de Junho.^{37,42}

A opção pela deposição das lamas em aterro, à semelhança de outros resíduos, é regulamentada pela Directiva Comunitária n.º 1999/31/CEE, do Conselho, de 26 de Abril, que prevê as medidas, processos e orientações sobre a deposição de resíduos em aterro, transposta para Direito interno pelo Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio.^{43,44}

A incineração constitui igualmente uma das possíveis técnicas de eliminação de resíduos, embora não integralmente, na medida em que se produzem cinzas resultantes do processo, às quais importa dar um destino adequado. Em resultado dos riscos ambientais associados às emissões atmosféricas, é alvo de regulamentação comunitária através das Directivas Comunitárias n.º 89/369/CEE, do Conselho de 8 de Junho e n.º 89/429/CEE, do Conselho de 21 de Junho, relativas respectivamente à prevenção da poluição atmosférica proveniente de novas instalações de incineração de resíduos urbanos e à redução nas instalações existentes.^{45,46} A transposição para direito interno da Directiva n.º 89/369/CEE foi realizada através do Decreto-Lei n.º 352/90, de 9 de Novembro, regulamentado pela Portaria n.º 286/93, de 12 de Março, posteriormente alterada pela Portaria n.º 125/97, de 21 de Fevereiro.^{47,48,49} Os processos de incineração de resíduos perigosos e não perigosos, encontram-se regulamentados respectivamente pelas Directivas Comunitárias n.º 94/67/CE, do Conselho, de 16 de Dezembro e n.º 2000/76/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro, tendo por como principais linhas de orientação, a prevenção e a redução dos efeitos negativos no ambiente destas actividades, impondo rigorosas condições de funcionamento e requisitos técnicos às instalações de incineração e fixação de patamares ou valores limites para as emissões de substâncias poluentes para a atmosfera.^{50,51} A transposição para Direito interno da Directiva relativa à incineração de resíduos perigosos foi feita através do Decreto-Lei n.º 273/98, de 2 de Setembro, que entretanto foi revogado pelo Decreto-Lei n.º 85/2005 de 28 de Abril que unifica o quadro legal aplicável à incineração e co-incineração de resíduos perigosos e resíduos não perigosos, integrando o conteúdo e a estrutura do Decreto-Lei antecedente.^{52,53}

2 Lamas de ETAR

2.1 Definição de lamas

Segundo a definição sugerida pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), em sentido lato, pode definir-se lama como sendo a “mistura de água e de sólidos separada de diversos tipos de água como resultado de processos naturais ou artificiais”.²⁸

Esta definição permite englobar as lamas resultantes do tratamento de águas residuais urbanas^a, de águas para abastecimento público, de efluentes líquidos das explorações pecuárias, de efluentes das indústrias agro-alimentares, de efluentes de outras indústrias, etc.

Para efeitos da presente dissertação, adoptou-se a designação “lamas” unicamente para as lamas provenientes do tratamento de águas residuais urbanas e a designação “biossólidos” para as lamas devidamente tratadas por via biológica, química, térmica ou outra e que satisfaçam os padrões de qualidade fixados pelo Decreto-Lei nº 446/91, de 22 de Novembro, podendo por isso ser utilizadas como fertilizantes na agricultura.

2.2 Generalidades

As águas residuais são constituídas basicamente por uma mistura de água e sólidos orgânicos e minerais, sendo 99,9% de água e 0,1% de sólidos. Do total de sólidos, aproximadamente 70% são materiais orgânicos como: proteínas, carboidratos e gorduras: os restantes 30% são constituídos por materiais inorgânicos como: areias, sais e metais.

O tratamento das águas residuais que afluem às ETAR, visa sobretudo separar os materiais sólidos e reduzir a carga de matéria orgânica presente, através de processos físicos, químicos e/ou biológicos para que possam ser descarregadas no meio receptor sem riscos para o meio ambiente. Este tratamento pode ser dividido em duas fases: a líquida, na qual a matéria orgânica e mineral suspensa e dissolvida no meio líquido vai sendo progressivamente removida; e a sólida, onde estes materiais vão sendo progressivamente estabilizados e condicionados.

Como resultado desses tratamentos, obtêm-se fundamentalmente dois tipos de produtos: um efluente líquido, com concentrações reduzidas de poluentes, que tornam o impacto da sua descarga no meio ambiente aceitável; e um produto semi-sólido, as lamas, que ainda precisa de ser tratado para envio para destino final.

Em função das características das lamas, estas poderão ser submetidas a diferentes tipos de tratamentos, nomeadamente espessamento, estabilização, condicionamento e desidratação, o que irá influenciar as características físicas e químicas da lama final. Serão essas características finais que irão aferir qual o destino final mais adequado.

2.3 Tipos de lamas produzidas

Na figura 2.1 apresenta-se um esquema típico de funcionamento de uma ETAR onde se observam os diferentes tratamentos a que as águas residuais são sujeitas, assim como os diferentes tipos de lamas gerados.

^a Segundo a Directiva 91/271/EEC, “água residual urbana será a água residual doméstica ou a mistura desta com água residual e/ou água pluvial”. Ainda de acordo com a mesma Directiva, “água residual doméstica” é a água residual proveniente de núcleos residenciais e de serviços que resulta predominante do metabolismo humano e das actividades domésticas”



Figura 2.1 - Esquema típico de funcionamento de uma ETAR¹⁵

Sumariamente, é possível incluir os diversos processos de tratamento das águas residuais em três grandes grupos que se enunciam em seguida:

a) Processos primários:

As lamas produzidas são compostas na sua maioria por sólidos sedimentáveis. Caracterizam-se por conterem um teor relativamente elevado de matéria orgânica, grande parte da qual é facilmente biodegradável (lamas primárias). Estas lamas podem exalar um forte odor, principalmente se ficarem retidas por um tempo elevado nos decantadores, em condições de elevada temperatura.⁵⁴

b) Processos secundários

Nestes processos predominam os tratamentos biológicos, os quais têm como base o potencial de transformação da matéria orgânica pelo metabolismo microbiano. Resultante dessa actividade microbiana há produção de biomassa constituída por fracções orgânicas e inorgânicas. Estas lamas são vulgarmente designadas por lamas secundárias. As características e as quantidades deste tipo de lamas variam com as taxas de crescimento e as taxas metabólicas dos vários microorganismos intervenientes e o processo biológico envolvido.

c) Processos terciários:

As lamas geradas são resultantes de processos físico-químicos e/ou biológicos conducentes à remoção de nutrientes (azoto e fósforo), e, ou sólidos suspensos totais (para afinamento da água residual tratada, de modo a ser sujeita ao processo de desinfecção). No caso de serem resultantes de processos físico-químicos, embora a quantidade de lamas dependa do tipo de reagentes usados e das taxas a que são adicionados, não existe uma relação teórica claramente definida entre a massa de químicos adicionada e a massa de lamas produzida.⁵⁵ São exemplos de precipitados químicos produzidos: os fosfatos, os carbonatos e os hidróxidos, entre outros.

2.4 Quantidades de lamas produzidas

Na figura 2.2 apresentam-se as lamas produzidas nos diversos estados membros nos anos de 1992, 1995 e 1998 e as projecções para os anos de 2000 e 2005 segundo a Agência Europeia do Ambiente (AEA).

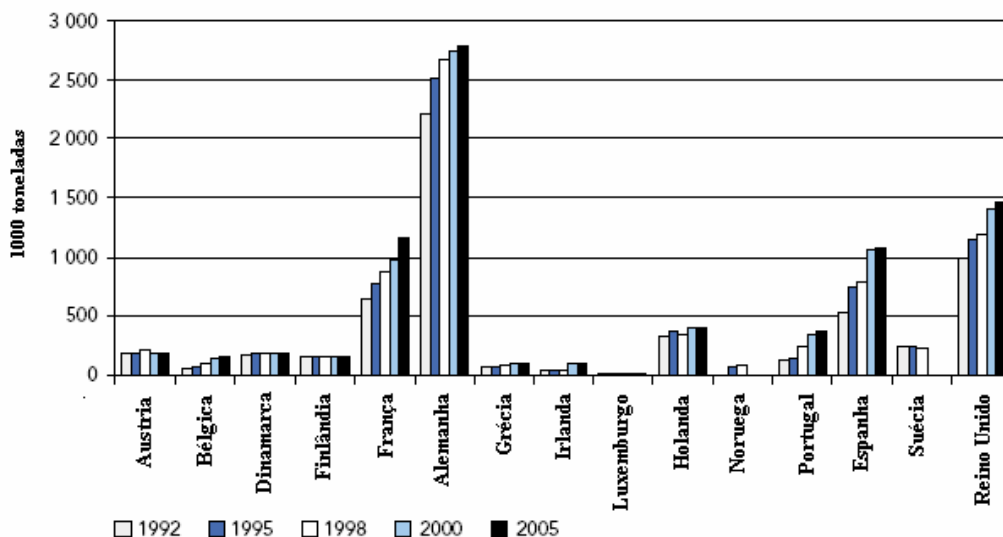


Figura 2.2 - Quantidades totais de lamas produzidas em diversos Estados-Membros, incluindo projecções para o ano 2000 e 2005 (expressas em matéria seca)⁵⁶

Facilmente se depreende pela figura 2.2 que houve um aumento significativo das quantidades de lamas produzidas em todos os Estados-Membros durante a década de 90, resultante da transposição para direito interno da Directiva comunitária 91/271/CEE que define melhores níveis de atendimento e maiores exigências ao nível de tratamento. Prevê-se que esse aumento continue nos próximos anos, como demonstram as projecções realizadas pela Agência Europeia do Ambiente.

Segundo este organismo, no caso de Portugal, a previsão aponta para que sejam produzidas no ano de 2005 cerca de 350000 t/ano em matéria seca, cerca de 1,4 vezes superior à quantidade de lamas produzidas em 1998 (250000 t/ano).⁵⁶

Actualmente, é extremamente complicado saber concretamente, as quantidades de lamas que são produzidas em Portugal e destinos finais dados às mesmas.

Esta é uma conclusão preocupante obtida de um inquérito efectuado à totalidade dos concelhos de Portugal Continental, às Industrias Gestoras de Tratamentos de Águas Residuais, às Direcções Regionais de Agricultura e às Direcções Regionais do Ambiente e do Ordenamento do Território.⁵⁷

Com a intenção de preencher essa lacuna, foi feito um estudo em que se avaliaram as quantidades de lamas produzidas actualmente, assim como estimativas da sua produção, usando dados com origem nas seguintes fontes:⁵⁸

- Inventário Nacional de Saneamento Básico de 1990;
- Situação de Saneamento Básico em Portugal Continental;
- Aglomerações, sistemas de drenagem e estações de tratamento em Portugal Continental;
- Plano estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (2000-2006).

A figura 2.3 e o quadro 2.1 apresentam uma estimativa da evolução da produção de lamas em Portugal Continental, nos anos de 1994, 1999 e 2006, de acordo com os dados de população servida apresentados na Situação de Saneamento Básico em Portugal Continental (ano de 1994) e no Plano de Desenvolvimento Regional 2000-2006 (anos de 1999 e 2006).

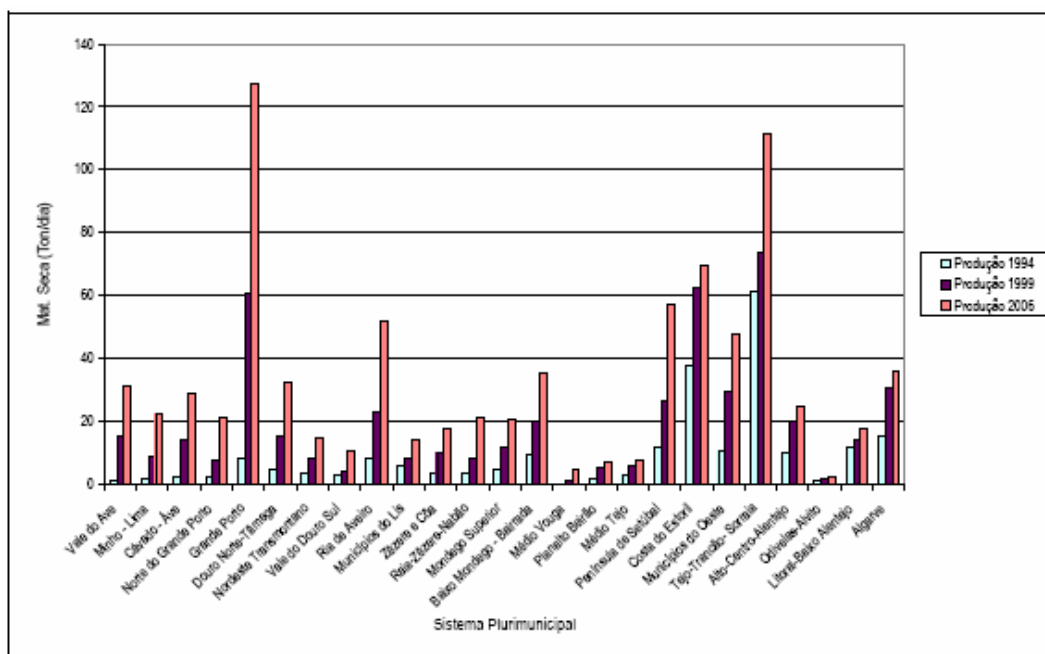


Figura 2.3 - Estimativa da produção de lamas (em matéria seca) em Portugal Continental, nos anos de 1994, 1999 e 2006 por sistema plurimunicipal⁵⁸

Quadro 2.1 - Estimativa da produção de lamas nos anos de 1994, 1999 e 2006 (em matéria seca)⁵⁸

Ano	1994	1999	2006
Produção de lamas (ton/dia)	232	492	839

A verificarem-se os níveis estabelecidos pelo III Quadro Comunitário de Apoio, a produção de lamas em 2006 atingirá cerca de 840 t/dia em matéria seca, correspondentes a cerca 1,7 vezes a produção de 1999 e cerca de 3,6 vezes a produção de 1994.⁵⁸

A figura 2.4 apresenta uma estimativa da produção de lamas em Portugal Continental no ano de 2006, por sistema plurimunicipal.

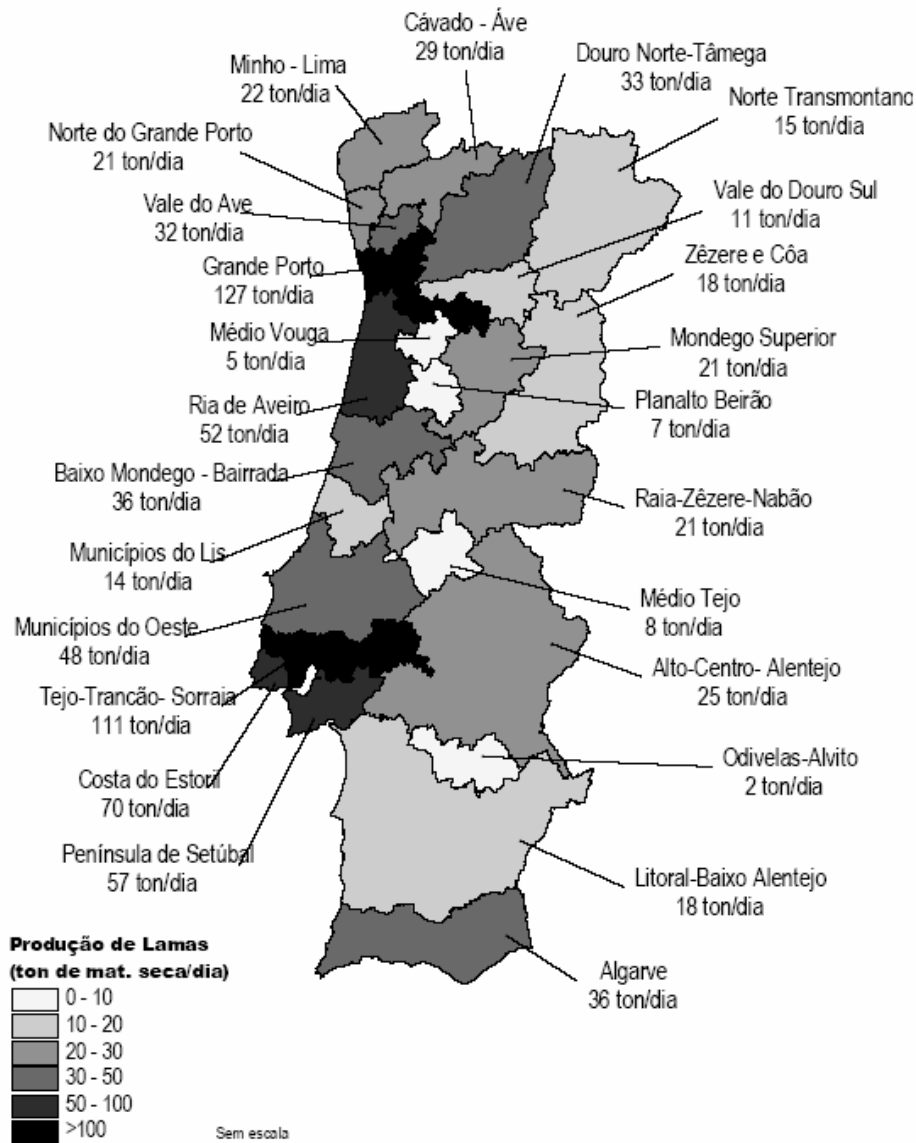


Figura 2.4 - Estimativa da produção de lamas em 2006, em Portugal Continental, por sistema plurimunicipal⁵⁸

Mais recentemente, em 2004, o Instituto Nacional da Água (INAG) levou a cabo o Projecto Insaar – Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais – projecto de âmbito nacional que pretende armazenar dados alfanuméricos e geográficos relativos ao ciclo urbano da água, disponíveis e actualizáveis on-line, que permitam produzir informação facilmente acessível.

O âmbito técnico centra-se nos sistemas de abastecimento de água e respectivas origens, assim como nos sistemas de drenagem e tratamento de águas residuais e respectivos pontos de rejeição. O projecto contemplou a inventariação de dados que permitam avaliar o consumo de água e a rejeição de efluentes no meio, as condições de dimensionamento e funcionamento das infra-estruturas, as áreas e populações servidas, a qualidade dos serviços prestados, e, ainda, os custos e receitas associados.

À data da redacção da dissertação, ainda só estavam acessíveis os dados preliminares, (<http://insaar.inag.pt/> acedido em Julho de 2005), tendo-se optado por não os incluir, visto carecerem de confirmação.⁵⁹

3 Principais processos de tratamento, armazenamento, transporte e destino final de lamas de ETAR

Neste capítulo pretende-se abordar, resumidamente, os principais processos de tratamento, armazenamento, transporte e destino final existentes. O capítulo está dividido nas seguintes secções:

- 3.1 - Tratamento de lamas
- 3.2 - Armazenamento de lamas
- 3.3 - Transporte de lamas
- 3.4 - Destinos finais para as lamas de ETAR

Para mais informações, aconselha-se a consulta da referência⁶⁰ onde é feita a revisão bibliográfica dos principais trabalhos realizados ao nível das operações referidas; e a referência⁵⁴ onde são pormenorizados os diferentes processos a seguir descritos.

3.1 Tratamento de lamas

As lamas para que possam ser enviadas para destino final, de uma forma que seja aceitável e económica, necessitam de ser previamente tratadas, através de um conjunto de etapas relativamente complexo e que acarreta um custo elevado no custo total das instalações e no processo de gestão da ETAR. Dependendo do grau de tratamento pretendido, pode representar 30 a 50% do custo da ETAR.⁶¹ No quadro 3.1 apresentam-se os principais processos de tratamento de lamas de ETAR.

Quadro 3.1 - Principais processos de tratamento de lamas de ETAR (adaptado⁵⁴)

Operação unitária, processo unitário ou método de tratamento	Função principal
Operações preliminares	
• Trituração	• Redução do tamanho
• Gradagem	• Eliminação de areias
• Mistura	• Mistura
• Armazenamento	• Armazenamento
Espessamento	
• Por gravidade	• Redução do volume
• Por flotação	• Redução do volume
• Por centrifugação	• Redução do volume
• Por gravidade em filtros banda	• Redução do volume
• Em tambor rotativo	• Redução do volume
Estabilização	
• Estabilização com cal	• Estabilização
• Tratamento Térmico	• Estabilização
• Digestão anaeróbia	• Estabilização, redução da massa
• Digestão aeróbia	• Estabilização, redução de massa
• Compostagem	• Estabilização, recuperação de produtos
Condicionamento	
• Condicionamento químico	• Condicionamento
• Tratamento térmico	• Condicionamento
Desinfecção	
• Pasteurização	• Desinfecção
• Armazenamento a longo prazo	• Desinfecção
Desidratação	
• Filtros de vácuo	• Redução de volume
• Centrifugas	• Redução de volume
• Filtros banda	• Redução de volume

Quadro 3.1 (cont.)

Operação unitária, processo unitário ou método de tratamento	Função principal
Desidratação (cont.)	
• Filtros prensa	• Redução de volume
• Leitões de secagem	• Redução de volume
• Lagunagem	• Armazenamento, redução de volume
Secagem	
• Instantâneo	• Redução de peso, redução de volume
• Por pulverização	• Redução de peso, redução de volume
• Em forno rotativo	• Redução de peso, redução de volume
• Em forno de câmaras múltiplas	• Redução de peso, redução de volume
• Evaporação de efeito múltiplo	• Redução de peso, redução de volume
Redução térmica	
• Forno de câmaras múltiplas	• Redução de volume, recuperação de energia
• Forno de leito fluidizado	• Redução de volume
• Incineração conjunto com resíduos sólidos urbanos	• Redução de volume
• Oxidação sob pressão convencional	• Estabilização, redução de volume
• Reactor vertical de poço profundo	• Estabilização, redução de volume

A figura 3.1 apresenta um fluxograma das diversas etapas do processo de tratamento das lamas de ETAR que utiliza o tratamento biológico por lamas activadas.

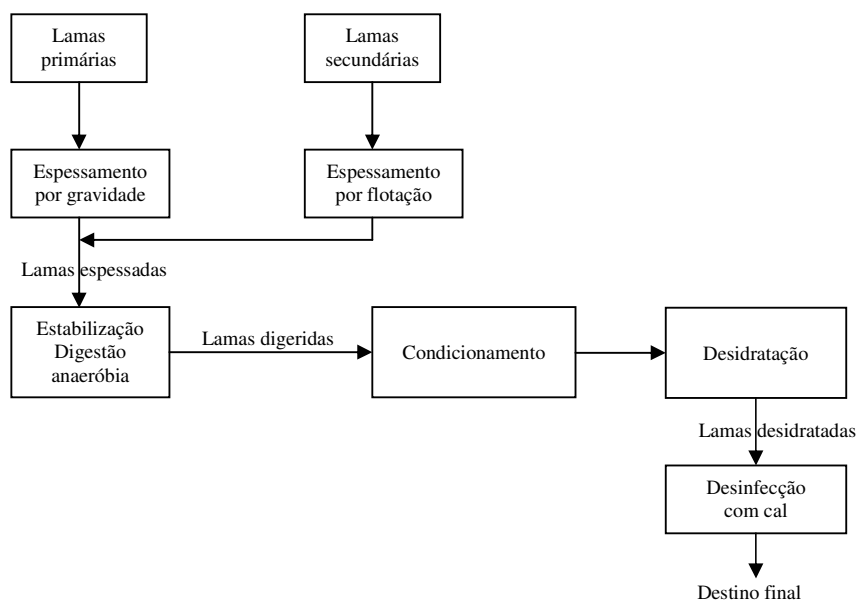


Figura 3.1 - Fluxograma das diversas etapas do processo de tratamento das lamas de ETAR

No fluxograma apresenta-se: espessamento por gravidade das lamas primárias originárias do processo de decantação primária; espessamento por flotação, para as lamas biológicas provenientes dos decantadores secundários; e, mistura dos dois tipos de lamas para proceder à sua estabilização conjunta. Entretanto, este processo poderá apresentar algumas variantes, nomeadamente: a mistura prévia de ambas as lamas, para em seguida sujeitar a mistura a um espessamento único, ou até mesmo não ocorrer o processo de digestão anaeróbia. A etapa da desinfecção com cal pode ser substituída pela: compostagem, secagem térmica, incineração ou pode, apenas, não ocorrer. Optou-se pela sua inclusão, dado ser objecto deste estudo. A adição de cal poderá ocorrer igualmente em substituição do processo de digestão anaeróbia, dada a sua função de estabilização.

3.1.1 Operações preliminares

Tal como o nome indica, são as operações a que as lamas são sujeitas previamente ao processo de tratamento propriamente dito. Estas operações visam sobretudo: facilitar os tratamentos posteriores; garantir um caudal constante e homogêneo; e diminuir os custos no tratamento das lamas. São consideradas operações preliminares: a trituração; a gradagem; a mistura; e o armazenamento.

Na trituração, o material filamentosos ou de grandes dimensões contido nas lamas é cortado em pequenas partículas, reduzindo os riscos de obstrução do equipamento rotativo.

Na gradagem promove-se a separação de duas fases das lamas: as areias e o seu conteúdo orgânico. O método de gradagem mais eficaz consiste na utilização das forças centrífugas através de desarenadores ciclónicos. Na figura 3.2 apresenta-se um exemplo de um desarenador ciclónico.



Figura 3.2 - Exemplo de um desarenador ciclónico

Neste tipo de desarenador, a lama é aplicada tangencialmente à secção cilíndrica, e é sujeita a acção de forças centrífugas. As areias são enviadas para fora dessa zona cilíndrica, sendo descarregadas através da secção cónica da centrífuga. O conteúdo orgânico é descarregado através de uma descarga lateral.

A mistura prévia das lamas visa garantir uma uniformização dos diferentes tipos de lamas que são geradas no processo de tratamento das águas residuais, permitindo obter um material homogêneo que irá facilitar o seu tratamento posterior. As misturas homogêneas são mais importantes nos processos de tratamento com baixos tempos de retenção como é o caso dos sistemas de desidratação, tratamento térmico e incineração, aumentando substancialmente as suas eficiências. A operação de mistura pode ocorrer de diversas formas: nos decantadores primários; nas condutas; nos processos de tratamento com altos tempos de retenção, como é o caso dos digestores anaeróbios e aeróbios; e nos tanques de mistura criados unicamente para essa função.

O armazenamento prévio das lamas visa corrigir as flutuações na produção das lamas e permitir que se acumulem em situações de inoperacionalidade dos processos de tratamento, garantindo uma constância no caudal das lamas a tratar.

3.1.2 Espessamento

O espessamento visa remover parte da fracção líquida das lamas de modo a ocorrer uma diminuição do seu volume. O material resultante ainda é um fluído, mas como uma concentração de sólidos mais elevada.

Esta redução de volume permite diminuir, substancialmente os custos nos tratamentos posteriores através da: redução da capacidade dos tanques e do equipamento requerido; redução

da dosagem de químicos necessária para o seu condicionamento; redução do calor necessário nos digestores e da quantidade de combustível necessária para a secagem ou incineração, ou de ambos; e minimização dos custos de bombagem e das dimensões das condutas necessárias. Por sua vez, ao ser reduzido o volume, reduzem-se os custos no seu transporte para o destino final. Deste modo, o processo de espessamento deve ser integrado em qualquer sistema de tratamento.

O espessamento é geralmente efectuado por meios físicos em tanques de sedimentação, em espessadores gravíticos, centrífugos ou de flotação. Além destes equipamentos, o espessamento poderá ocorrer em equipamentos de outra natureza, nomeadamente digestores anaeróbios e bacias de armazenamento de lamas.

3.1.3 Estabilização

A estabilização das lamas é feita com o objectivo de: reduzir a quantidade de organismos patogénicos presentes; eliminar odores ofensivos e inibir, reduzir ou eliminar o potencial para a putrefacção de lamas. A eficiência deste processo é função do efeito de estabilização conseguido ao nível da fracção de sólidos voláteis ou orgânicos das lamas.

Existem inúmeras formas de se proceder à estabilização das lamas. A mesma pode ser atingida através da: redução biológica do conteúdo volátil; oxidação química do material volátil; adição de produtos químicos às lamas para torná-las inadequadas para a sobrevivência de microorganismos; e aplicação de calor para desinfecção ou esterilização das lamas.

Se o destino das lamas passa pela utilização na agricultura, a redução de patogénicos por qualquer método de estabilização, deve ser um dos principais aspectos a considerar.

Por outro lado, quando o destino das lamas é a desidratação e posterior incineração, opta-se frequentemente por não proceder à sua estabilização.

Entre os métodos empregues para a estabilização das lamas, podem-se destacar os mais usuais: a estabilização química com cal, a digestão anaeróbia e aeróbia e a compostagem. A oxidação química com cloro e a estabilização por tratamento térmico são raramente usadas. Em seguida descreve-se os métodos mais usuais de estabilização, à excepção da estabilização química com cal, que sendo objecto de estudo, é descrita detalhadamente no capítulo 5.

A digestão anaeróbia das lamas é o método de estabilização mais antigo e o mais empregue nas estações de tratamento que usam o sistema de lamas activadas. As principais razões do seu sucesso são a possibilidade de conservação e reutilização da energia e a reutilização das lamas estabilizadas. Além da estabilização das lamas, este processo permite uma redução da massa, essencialmente da fracção volátil, diminuindo o poder de putrefacção das lamas e o volume para deposição final.

A digestão anaeróbia consiste na degradação da matéria orgânica e inorgânica, na ausência de oxigénio livre. Este processo envolve sucessivas fermentações, realizadas por culturas mistas de microrganismos que se traduzem em duas fases: formação do ácido e produção de metano. Numa primeira fase da digestão, as bactérias facultativas transformam o substrato orgânico complexo em ácidos orgânicos de cadeia curta. Estes ácidos orgânicos voláteis provocam uma diminuição de pH. Numa segunda fase, as bactérias estritamente anaeróbias (metanogénicas), convertem estes ácidos em metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e outros gases vestigiais, formando o biogás. A reduzida energia disponível e as baixas quantidades de carbono disponíveis para garantir a actividade biológica, tornam os restantes sólidos estáveis.

Na figura 3.3 apresenta-se um exemplo do tratamento de lamas por digestão anaeróbia.



Figura 3.3 - Tratamento de lamas em digestores anaeróbios

Os estudos efectuados ao longo dos anos permitiram o seu melhoramento e o desenvolvimento de quatro variantes na digestão anaeróbia de lamas: digestão em baixa carga; digestão em alta carga; contacto anaeróbio; e separação de fases. Estes melhoramentos resultaram numa diminuição do volume necessário (à conta da redução dos tempos de residência) e aumento da estabilidade do processo.

A principal vantagem da digestão anaeróbia comparativamente com os restantes processos de estabilização é a produção do biogás durante o processo, que poderá ser aproveitado para a produção de energia térmica e eléctrica através de unidades de cogeração, permitindo retirar benefícios económicos e ambientais, ao serem reduzidas as emissões de gases com efeito de estufa. Usualmente, o gás produzido é utilizado na bombagem das águas residuais e geração de electricidade e a água quente usada no aquecimento das lamas ou do edifício.

Como principais desvantagens aponta-se a sua extrema sensibilidade a variações de cargas poluentes; o seu custo elevado; o crescimento lento das bactérias responsáveis pela produção do metano; a produção de subprodutos (sobrenadante) de fraca qualidade; e, a sua limitação em termos de aplicabilidade (processo aconselhável a lamas com uma concentração baixa de toxinas e uma concentrações em sólidos voláteis superior a 50%).⁵⁵

Na digestão aeróbia de lamas ocorre a biodegradação dos componentes orgânicos pelos microorganismos aeróbios, produzindo-se um húmus estabilizado e fertilizante. Ao contrário do processo anterior, não há produção de metano, tornando os seus custos de operação mais elevados.

A digestão aeróbia pode ser realizada no tratamento de: lamas activadas; mistura de lamas activadas ou de lamas de leitos percoladores e lamas primárias; lamas de estações de arejamento prolongado; e lamas activadas provenientes de estações de tratamento sem decantação primária.

O processo passa pela oxidação directa da matéria orgânica biodegradável e consequente aumento da biomassa bacteriana, com posterior oxidação do material microbiano celular pelos próprios microorganismos. Esta fase final é caracterizada pela respiração endógena, que acontece quando o substrato disponível para a biodegradação é totalmente consumido e os microorganismos passam a consumir o próprio protoplasma microbiano para obter energia para as suas reacções celulares.

Com o decorrer do processo de digestão aeróbia, cerca de 75 a 80% do tecido celular é oxidado sob condições aeróbias a dióxido de carbono, água e amónia, sendo os restantes 20 a 25% correspondentes a componentes inertes e compostos orgânicos que não são biodegradáveis. A amónia proveniente desta oxidação é posteriormente oxidada a nitrato, com o decorrer do processo de digestão. Esta oxidação poderá provocar descida do pH, caso a alcalinidade da água residual não seja suficiente para a compensar. Quando tal sucede poderá ser necessária a adição de reagentes químicos para manter o pH desejado.

À semelhança do processo de digestão anaeróbia existem variantes do processo de digestão aeróbia. As mais usuais são: digestão aeróbia convencional; digestão aeróbia em “batch” ou em contínuo; e, digestão aeróbia com injeção de oxigénio puro.

Comparativamente com o processo de digestão anaeróbia, este processo apresenta algumas vantagens, nomeadamente: a redução igual ou superior à obtida através da digestão anaeróbia; as concentrações de CBO inferiores no líquido sobrenadante; a obtenção de um produto final inodoro e biologicamente estável; a obtenção de valores mais elevados de fertilizante básico nas lamas; a operação relativamente fácil; e, o custo de capital baixo.⁵⁴

Como principais desvantagens destaca-se: o elevado custo energético associado às necessidades de oxigénio; as lamas digeridas apresentam fracas características mecânicas de desidratação; o processo varia significativamente com a temperatura, localização e tipo de material com que é construído o tanque; e, não há recuperação de um subproduto com utilidade como o metano.⁵⁴

O processo de compostagem é um processo aeróbio controlado, desenvolvido por uma população de microrganismos, que se realiza em duas fases distintas: na primeira ocorrem reacções bioquímicas de degradação, predominantemente termófilas, e na segunda fase, ou de maturação, ocorre a humificação, dando origem a um produto final estável.⁶² As lamas devidamente sujeitas a um processo de compostagem eficientemente monitorizado constituem um material inofensivo que poderá ser aplicado como correctivo do solo, com algumas restrições causadas por eventuais constituintes das lamas.

Aproximadamente 20 a 30% dos sólidos voláteis são convertidos em dióxido de carbono e água. À medida que o material orgânico presente nas lamas se decompõe, o composto atinge temperaturas da ordem dos 50 a 70°C (fase termófila), destruindo os organismos patogénicos entéricos.

Os três tipos de compostagem mais utilizados são: pilha de arejamento estático; pilhas “windrow”; e reactor ou vaso. Na figura 3.4 apresenta-se o esquema de uma pilha estática arejada.

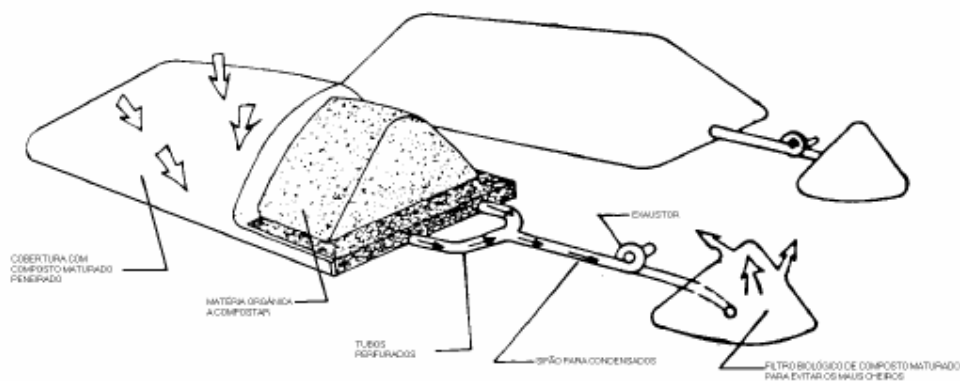


Figura 3.4 - Esquema de pilha estática arejada⁶²

A maioria dos processos de compostagem engloba os seguintes passos: mistura das lamas desidratadas com um agente estruturante; arejamento da pilha de compostagem por adição de ar ou por agitação mecânica; secagem adicional e armazenamento; e, deposição final.

Para que o processo de compostagem seja bem conduzido, importa controlar diversos factores durante o processo, como sejam: o oxigénio para suprir a demanda biológica; a temperatura que afecta a velocidade das reacções químicas; os nutrientes balanceados, expressos pela relação C/N; e, a água (expressa em termos de humidade), sem a qual não se processam as actividades

metabólicas. Outro factor que afecta o processo é de ordem operacional, o tamanho das partículas, ou seja, a granulometria que influencia o arejamento e a estabilidade geométrica das pilhas ou leiras.

A compostagem apresenta as seguintes vantagens: a rápida decomposição microbiana e oxidação da matéria orgânica, tornando-a estável com mínima produção de odores; a higienização do material devido às reacções exotérmicas de decomposição; a maior parte dos sistemas usam pouca quantidade de energia externa para funcionar, comparando com outros sistemas de tratamento; a produção de fertilizantes naturais não contaminantes; e, a grande flexibilidade em escala de operação.⁶²

A principal desvantagem deste processo reside na necessidade de maior área de terreno disponível, que outros processos de tratamento e a maior utilização de mão-de-obra (em certas circunstâncias poderá não ser uma desvantagem, mas exactamente o contrário, por absorver mão-de-obra, quase sempre não especializada).⁶²

Para mais informações aconselha-se a consulta da referência⁶².

3.1.4 Condicionamento

O condicionamento das lamas visa sobretudo melhorar as características de desidratação das lamas. Além desta função principal, o condicionamento permite também a desinfecção dos sólidos das águas residuais, o controlo dos odores, a alteração física dos sólidos e promove a sua recuperação.

O condicionamento das lamas é extremamente importante, devido ao seu efeito significativo na eficiência das operações de espessamento e desidratação a que as lamas são posteriormente sujeitas. Os métodos mais comuns envolvem a adição de químicos e o tratamento térmico.

O condicionamento pela adição de químicos visa neutralizar ou desestabilizar as ligações químicas ou físicas actuantes nas partículas coloidais e no material particulado em suspensão, imersos em meio líquido. Este processo de desestabilização permite que as partículas pequenas se juntem para formar agregados maiores, ou seja, sob a forma de flocos, com consequente libertação da água absorvida. Este aumento das partículas existentes vai facilitar a sua retenção nas operações de tratamento seguintes, nomeadamente as operações de espessamento e desidratação.

São exemplos de compostos químicos utilizados: o cloreto férrico, a cal, o sulfato de alumínio e polímeros orgânicos. A adição destes compostos conduz a um aumento significativo do teor de sólidos secos nas lamas, sendo mais significativo no caso dos sais de ferro e da cal que poderá aumentar os sólidos secos em cerca de 20 a 30%.⁵⁵

A escolha do tipo e da dosagem do composto químico deverá ser feita em função das características físicas e químicas das lamas; dos equipamentos de mistura; e, dos métodos de espessamento ou desidratação a que as lamas serão posteriormente sujeitas.

É extremamente complicado definir a dosagem óptima de condicionador a utilizar, não existindo presentemente um critério comum na sua aferição.⁶³

Para mais informações aconselha-se a consulta das referências^{64,65} centrados na influência do processo de mistura na eficiência do condicionamento químico; e as referências^{63,66} sobre a dosagem óptima de condicionador e a sua influência no processo de desidratação subsequente.

O tratamento térmico funciona simultaneamente como processo de condicionamento e estabilização, ao serem impostas temperaturas elevadas (177 a 240°C), sob pressão, durante curtos períodos de tempo (15 a 40 minutos).

Em comparação com a adição de químicos, o tratamento térmico apresenta algumas vantagens: obtêm-se concentrações de sólidos de 30 a 50% nas lamas desidratadas com o equipamento de desidratação mecânico; geralmente não é necessária a adição de químicos para uma perfeita desidratação em equipamento mecânico; torna as lamas estabilizadas e destrói grande parte dos microorganismos patogénicos; o processo é insensível à variação da composição das lamas; e, no caso de se considerar a incineração, a lama resultante deste processo apresenta um calor de combustão de 28 a 30 kJ/g de sólidos voláteis.⁵⁵

As principais desvantagens apontadas a este processo são; a necessidade de uma supervisão rigorosa e de um forte programa de manutenção preventiva; a produção de um subproduto gasoso que carece de tratamento antes de ser lançado na atmosfera; e, custo de capital elevado. Estas desvantagens têm conduzido ao abandono da sua utilização, optando-se pelo uso de condicionadores químicos, processos baratos e de fácil controlo.

3.1.5 Desinfecção

A desinfecção visa sobretudo destruir ou inactivar os organismos patogénicos que a lama possa conter, de modo a minimizar os problemas de saúde pública que possam surgir durante o seu manuseio ou utilização.

Consoante o destino final pretendido para as lamas, existem diversos processos de desinfecção. Deste modo, a selecção da operação deve ter em conta os objectivos necessários de redução dos patogénicos, sobretudo nos casos em que o destino final passa pela sua aplicação na agricultura.

Entre os principais processos de desinfecção destacam-se os seguintes: armazenamento de longa duração; desinfecção química; desinfecção por calor; e, desinfecção por radiação ultra violeta.

A desinfecção poderá ocorrer igualmente durante alguns processos de estabilização, nomeadamente: estabilização química com cal; tratamento térmico; compostagem; digestão anaeróbia; e, digestão aeróbia, sendo que nestes dois últimos casos, não há propriamente um processo de desinfecção, mas sim uma redução do número de organismos patogénicos, carecendo de desinfecção, através dos processos enunciados no parágrafo anterior.

O armazenamento de longa duração de lamas, sobretudo em bacias de armazenamento, tem dupla função ao permitir simultaneamente o armazenamento das lamas e a sua desinfecção. Armazenamentos durante 60 dias a 20°C ou 120 dias a 4°C, correspondem a tempos de retenção típicos que permitem obter uma desinfecção eficaz.⁵⁴

Devido aos riscos de poluição ambiental, devem ser tomados cuidados especiais na sua concepção de modo a reduzir os riscos de geração de odores e contaminação das águas superficiais e subterrâneas, por lixiviação.

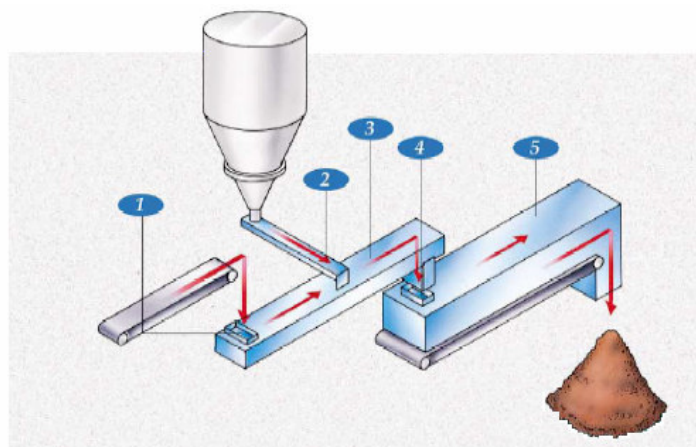
A desinfecção química é realizada recorrendo à adição de diversos reagentes químicos durante os processos de estabilização. Os reagentes químicos mais utilizados são o cloro e a cal. Outros compostos químicos fortemente oxidantes como o ozono, podem eventualmente ser utilizados para a desinfecção das lamas. Estudos recentes demonstram a aplicabilidade da utilização da amónia para a desinfecção das lamas.⁶⁷

A desinfecção por calor consiste na inactivação e destruição dos microorganismos pela aplicação de calor. A desinfecção através do calor pode ser atingida recorrendo a diversos processos. Entre os processos específicos de desinfecção destaca-se o processo de pasteurização, ao qual

será dada maior importância. Outros processos como a incineração, secagem térmica e condicionamento por tratamento térmico poderão contribuir igualmente para a desinfecção, não sendo contudo essa a sua principal função.

No processo de pasteurização, as lamas são sujeitas a uma determinada temperatura durante um certo período de tempo. Dependendo das espécies presentes nas lamas e respectivas sensibilidades a diferentes temperaturas e períodos de exposição, poderá variar a temperatura e/ou período de exposição adoptado. Normalmente são aplicadas temperaturas da ordem dos 70°C durante um período de 30 minutos. Contudo deve ter-se o cuidado não aplicar temperaturas ou tempos de exposição desapropriados, uma vez que podem provocar problemas de odores e uso desnecessário de energia.

Na figura 3.5 apresenta-se o diagrama de um processo de tratamento por pasteurização melhorado com a adição prévia de cal viva (CaO).



1. Entrada das lamas e pré-aquecimento (20°C)
2. Adição de cal viva a partir dos silos de armazenamento de cal a uma taxa pré-definida
3. Mistura da cal com a lama e elevação da temperatura até aos 70°C.
4. Descarga da mistura aquecida para o reactor de pasteurização.
5. A mistura permanece num ambiente fechado e isolado durante 30 minutos, de forma a manter a temperatura e a garantir a destruição dos patogénicos presentes na lama.

Figura 3.5 - Diagrama do processo de tratamento “*Envessel Pasteurization*”⁶⁸

A desinfecção por radiação ultra violeta provoca ionização secundária na lama, inactivando directamente os patogénicos e produzindo compostos oxidantes e redutores que os atacam. Para mais informações sobre a utilização da radiação na desinfecção das lamas, aconselha-se a consulta da referência⁶⁹ que reúne algumas das aplicações da tecnologia da radiação ultravioleta na protecção ambiental, citando exemplos de aplicação.

3.1.6 Desidratação

A desidratação das lamas consiste na remoção de parte da sua humidade com vista a uma redução de volume, superior à obtida através do espessamento. A razão principal é diminuir os custos de operação dos tratamentos posteriores.

Existem diversos processos para a desidratação das lamas. Alguns baseiam-se na evaporação e percolação natural e outros na utilização da energia externa através de dispositivos mecânicos para a desidratação mais rápida, entre eles a filtração, compressão, separação centrífuga e compactação.

A escolha do dispositivo de desidratação mais apropriado deve ser em função do tipo de lamas a ser desidratado, o espaço disponível e o destino final a dar-lhes.

Geralmente, em pequenas instalações, onde o espaço não constitui factor limitativo, opta-se pelo uso de sistemas naturais de desidratação, nomeadamente leitos e lagoas de secagem. Em instalações de grande porte e com áreas de espaço limitado, são usualmente empregues os dispositivos de desidratação mecânica.

Os leitos de secagem são geralmente utilizados para o tratamento de lamas digeridas. Após a desidratação, as lamas poderão ser depositadas em aterro ou aplicadas como correctivo no solo. As principais vantagens deste sistema são sobretudo o seu baixo custo; fácil manutenção; e, teor de sólidos final elevado. Consistem geralmente numa parede com 0,3 a 1,0 m de altura, que envolve um meio poroso de drenagem. O material poroso pode ser constituído por areia, areia misturada com cimento ou outros.

Na figura 3.6 apresenta-se um exemplo de um leito de secagem, em que o material poroso aplicado é a areia.



Figura 3.6 - Exemplo de um leito de secagem

Têm-se realizado diversos estudos na área dos leitos de secagem tendo em vista melhorar o seu desempenho. Desde a possibilidade de incluir geossintéticos na sua construção, de forma a facilitar o processo de espalhamento e recolha das lamas, assim como a possibilidade de incluir uma cobertura e aproveitamento do biogás, através de um sistema de condutas na sua base, para elevar a sua temperatura e acelerar o processo de evaporação. Na figura 3.7 apresentam-se exemplos desses melhoramentos.



Figura 3.7 - Pormenores do leito de secagem com as condutas para aquecimento e com a estufa plástica sobre o mesmo⁷⁰

As modificações operadas permitiram obter com apenas 15 dias de permanência no leito, teores de sólidos médios nas lamas, em torno de 65%, superiores aos 50% obtidos pelo sistema convencional. A manutenção de temperaturas próximas de 50 °C mostrou-se eficiente na secagem e higienização da lama, comparativamente com o processo convencional em leitos de secagem.⁷⁰

Este exemplo de melhoramento fica como sugestão para muitos dos leitos de secagem que equipam as ETAR em Portugal e que urge recuperação.

Os leitos de macrófitas funcionam, simultaneamente como sistemas de desidratação de lamas e sistemas estabilizadores. São formados por uma camada de solo e plantas onde é depositado o efluente a tratar. Permitem o tratamento simultâneo da fase líquida e da fase sólida. Não requer decantação prévia, sendo o tratamento do efluente totalmente efectuado no leito de macrófitas.

O leito de macrófitas funciona como receptor do efluente durante um ano, ficando no ano seguinte em repouso para secagem e estabilização das lamas. O produto final, além de estabilizado, é enriquecido com o solo e as raízes das plantas, aumentando o seu valor agronómico.

A principal desvantagem apontada a este processo de desidratação é a necessidade da existência de uma área grande e de um período de repouso.

As lagos de secagem consistem noutro método de desidratação de lamas usado quando existe área disponível. São idênticos aos leitos de secagem mas, neste caso, as lamas são colocadas a uma profundidade três a quatro vezes superior. Nas lagoas, a desidratação ocorre por três formas: drenagem, evaporação e transpiração, sendo contudo a evaporação o processo mais importante, pelo que as lagoas devem ser colocadas em locais com taxas de evaporação elevadas.

A remoção das lamas é efectuada quando estas atingem uma concentração de sólidos, na ordem dos 25 a 30%, o que pode durar entre vários meses a vários anos (1 a 3 anos). Após a retirada das lamas por meios mecânicos, a lagoa deve permanecer em repouso pelo menos durante 6 meses. Deste modo, devem ser construídas no mínimo duas células, de forma a atender aos períodos de limpeza, manutenção e situações de emergência. Para reduzir a geração de odores é aconselhável que as lamas sejam previamente estabilizadas.

Entre os sistemas não naturais de desidratação de lamas podem-se destacar os seguintes: desidratação centrífuga; desidratação por filtração; ciclones; peneiras; e, electro-osmose.

Sendo os dois primeiros, os mais usuais em ETAR, apresenta-se uma breve descrição destes mecanismos de desidratação mecânica.

A operação de centrifugação é usada para separar duas ou mais fases de densidades diferentes, em particular, para separar sólidos em suspensão de um meio líquido. Envolve a aplicação de uma força centrífuga à mistura, que acelera a separação das fracções com diferentes densidades. É um processo similar à decantação por gravidade, com a diferença de se usar, neste caso, uma força centrífuga muitas vezes superior à força da gravidade, que é promovida pela rotação em alta velocidade do conjunto rotativo da máquina. A figura 3.8 mostra um exemplo de uma centrífuga utilizada para desidratação das lamas.



Figura 3.8 - Exemplo de uma centrífuga⁷¹

A separação entre os sólidos e os líquidos é feita dentro de um tambor rotativo cilíndrico, em cujas paredes internas a fase sólida é concentrada e removida continuamente por um raspador na forma de rosca. A parte sólida é recolhida numa caixa e transferida para uma esteira transportadora. A parte líquida é recirculada no processo de tratamento de esgotos.

Para melhorar a eficiência da separação entre as fases, é usual adicionar-se um polímero que facilitará a agregação, e, conseqüentemente, a sedimentação das partículas sólidas. Este polímero deve ser devidamente seleccionado pelo seu tipo e características específicas.

A concentração de sólidos conseguida com a operação de centrifugação, poderá variar bastante. Esta concentração depende das características iniciais das lamas, do tipo e dosagem de polímero utilizado, e, também, das características do equipamento utilizado. Concentrações de sólidos da ordem de 30 a 35% têm sido atingidas com a utilização de centrífugas.⁷² Entretanto, na prática, têm-se registado concentrações da ordem de 20 a 25%.⁵⁵

A filtração das lamas baseia-se num processo vulgar de filtração ao fazer passar a solução a filtrar por um meio poroso onde ficam retidos os sólidos que se pretendem retirar. A eficiência da filtração será função das características das lamas a desidratar. O seu conteúdo em sólidos é, entre outros, um dos mais importantes. Normalmente são adicionados químicos a montante do processo, de forma a aumentar o conteúdo de sólidos, reduzir os sólidos filtrados e melhorar as características de desidratação. Uma concentração entre 6 a 8% é o ideal para a filtração.

Os principais equipamentos de desidratação mecânica por filtração utilizados são os filtros prensa de esteira, filtros prensa de banda e os filtros de vácuo. Nas figuras 3.9 e 3.10 apresentam-se exemplos dos dois primeiros.



Figura 3.9 - Filtro prensa de esteira BPF WR "Greenland"⁷³



Figura 3.10 - Filtro prensa de banda⁷⁴

No quadro 3.2 sintetizam-se as principais vantagens e desvantagens dos processos de desidratação mecânica comparativamente com os sistemas naturais de desidratação.

Quadro 3.2 - Comparação entre os processos de desidratação manual e desidratação mecânica

Processo	Vantagens	Desvantagens
Natural	Não há adição de reagentes químicos	Risco de libertação de odores
	Consumo energético reduzido	Risco de contaminação das águas subterrâneas e, eventualmente, as águas superficiais
	Produto final de melhor qualidade (sem adição de químicos)	Necessita de maiores áreas disponíveis
	Manutenção pouco exigente no controlo de operação	É sensível às variações climáticas
	Quando existe área disponível, é um processo extremamente económico	A lama deve ser previamente estabilizada
	Devido aos tempos de retenção mais elevados, é possível obter produtos finais com maiores teores sólidos secos*	
	Não é sensível à variação da composição das lamas	
Mecânico	Menor área disponível necessária	Consumo energético elevado
	Não requer período de repouso	Requer um controlo assíduo da operação
		Requer a adição de reagentes químicos
		Qualidade inferior do produto devido à adição de reagentes

* os tempos de retenção das lamas nos sistemas naturais poderão ser de dias ou meses, ao invés dos meios mecânicos, onde estes são de horas.

3.1.7 Secagem térmica

A secagem térmica de lamas é um processo de redução da humidade através da evaporação da água para um meio insaturado, e deste para a atmosfera, com a aplicação de energia térmica. Este aquecimento é conduzido até um ponto inferior ao de destruição da matéria orgânica. Desta forma, os sólidos totais presentes são mantidos praticamente inalterados, sendo apenas removida a água.⁷⁵

A secagem térmica aplica-se quando se pretende ir mais longe que os meios mecânicos, com a obtenção de teores de sólidos até 90 a 95%, permitindo reduções significativas dos volumes de lamas produzidas e consequente redução do custo associado às linhas de tratamento situadas a jusante, ao armazenamento e ao seu transporte para destino final. Outro objectivo muito importante da secagem térmica é a destruição dos organismos patogénicos presentes nas lamas a secar.

É um processo de operação relativamente cara, pois além de envolver a utilização de combustível para a geração do calor, necessita de mão-de-obra especializada para manuseio e controlo.

As tecnologias de secagem são numerosas e variadas. A escolha da tecnologia que melhor se adapta a cada caso em particular tem como base a escrupulosa consideração dos objectivos e limitações da natureza das lamas a tratar e do destino final do produto, bem como de diversos parâmetros associados às condições específicas de cada projecto (modo de funcionamento, energia disponível, recuperação de energia, grau de automacidade, espaço disponível, etc).⁷⁶

Distinguem-se duas famílias: os secadores directos e os secadores indirectos. Nos secadores directos o fluido térmico está em contacto directo com as lamas. Nos secadores indirectos, a lama está separada do fluido por uma superfície intermediária. No quadro 3.3 são apresentados os diferentes tipos de secadores directos e indirectos.

Quadro 3.3 - Tipos de secadores⁷⁶

Secadores directos	Secadores indirectos
De tambor rotativo	de camada fina
De leito fluidizado	de discos
de banda	de feixes tubulares
Flash	de banda (radiação)
Centridy ®	de pratos
	de pás

Este processo produz, para além das lamas secas, um gás que é libertado para a atmosfera, e, por vezes, um subproduto líquido. O gás pode ser uma fonte de maus odores e emissões visíveis (cinzas), sendo por vezes necessário proceder ao seu tratamento. O subproduto líquido é por vezes recirculado para o início do tratamento da fase líquida ou, quando necessário, tratado separadamente.

Este processo é pouco utilizado no tratamento de lamas de ETAR devido às necessidades de tratamento dos subprodutos e ao seu custo elevado.

3.1.8 Redução térmica

A redução térmica das lamas pode ser atingida de duas formas: por conversão total ou parcial dos sólidos orgânicos em produtos finais oxidados, essencialmente dióxido de carbono e água, através da incineração ou oxidação sob pressão; e, por oxidação e volatilização parciais dos sólidos orgânicos através da pirólise ou combustão com a obtenção de produtos finais com energia.

A incineração de lamas de ETAR é uma opção bastante utilizada nos países desenvolvidos. A incineração consiste numa combustão completa, sendo o processo de tratamento das lamas que oferece maior redução do volume para disposição final. O volume de cinzas é da ordem de 4% do volume da lama desidratada que entra no incinerador.

A incineração implica destruição das substâncias orgânicas presentes na lama através da combustão, na presença de excesso de oxigénio. Apesar de o elevado teor de matéria orgânica, o processo de combustão apenas atinge condições autogéneas quando o teor de sólidos é superior a 35%. O poder calorífico da lama é fundamental na redução do consumo de combustível. Os principais elementos combustíveis da lama são o carbono, enxofre e o hidrogénio, que se encontram sob a forma de gorduras, carboidratos e proteínas. Os produtos da combustão completa da lama são: vapor de água, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, azoto e cinza inerte.⁶²

Existem dois tipos de incineradores actualmente empregues no tratamento das lamas de ETAR: o incinerador de múltiplas câmaras e o incinerador de leito fluidizado, sendo o último o mais utilizado. Na figura 3.11 apresenta-se um esquema de um incinerador de leito fluidizado.

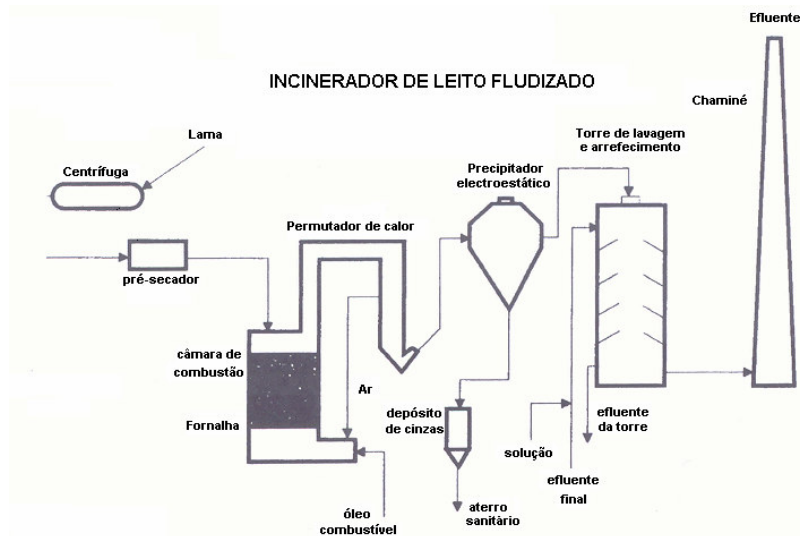


Figura 3.11 - Esquema de incinerador de leito fluidizado⁷⁷

O incinerador de leito fluidizado é um vaso cilíndrico com uma única câmara com paredes refractárias. O leito fluidizado de areia, em contacto com a lama, retém as partículas orgânicas até à sua completa destruição. A operação em condições autogéneas a uma temperatura superior a 815 °C garante a completa destruição dos compostos orgânicos voláteis a um custo competitivo.⁷⁷

A oxidação sob pressão é uma forma de combustão incompleta que ocorre sob elevadas temperatura e pressão, sendo recomendado quando a lama é diluída demais para ser incinerada e tóxica ou refratária para ser tratada biologicamente.

Baseia-se sumariamente na capacidade da matéria orgânica, dissolvida ou particulada, presente no líquido, oxidar a temperaturas entre 100 e 374 °C, o ponto crítico da água. O limite de 374 °C é dado pela incapacidade da água existir na forma líquida acima desta temperatura, mesmo a pressões elevadas.

O processo é extremamente eficiente na destruição da matéria orgânica presente em efluentes com teor de sólidos entre 1 e 20%. A quantidade de matéria orgânica é suficiente para gerar calor capaz de manter a temperatura necessária sem o auxílio de fontes auxiliares de energia.

A combustão consiste na rápida oxidação exotérmica dos elementos combustíveis. A pirólise consiste na destilação destrutiva, redução ou fissão térmica e condensação da matéria orgânica na ausência de oxigénio. O processo de pirólise de lamas recorre a uma combinação de processos de fissão térmica e de reacções de condensação, em condições de ausência de oxigénio. Contrariamente ao processo de combustão, muito exotérmico, o processo de pirólise é muito endotérmico. Produz uma corrente gasosa que contém H₂, CH₄, CO, CO₂, e outros gases, dependendo da natureza da lama, uma corrente de fuel-alcatrão e um resíduo de carbono quase puro.

Apesar das vantagens evidentes advindas da redução significativa do volume, destruição dos microrganismos patogénicos e compostos tóxicos e potencial recuperação de energia, os processos de redução térmica têm vindo a ser menos utilizados, devido ao surgimento de preocupações ambientais relacionadas com as emissões gasosas para a atmosfera.

Contudo, estudos recentes em processos de combustão, têm-nos tornado mais eficientes, devendo ser considerados quando existem limitações de espaço para deposição final, quando as

lamas apresentam teores elevados de constituintes tóxicos ou quando é viável a sua recuperação energética.

3.2 Armazenamento de lamas de ETAR

O armazenamento tem como principais funções garantir: a homogeneização do caudal de tratamento, tanto em termos de quantidades, como em termos de características das lamas; e, a equalização entre a entrada contínua do caudal de lamas e o caudal descontínuo de saída das mesmas, tornando possível que os diferentes processos de tratamento possam ocorrer em diferentes horários e/ou com diferentes caudais.

Poderá ocorrer ao longo do processo de tratamento da fase sólida ou ao longo do processo de tratamento da fase líquida. As lamas deverão apenas ser armazenadas no sistema de tratamento da massa líquida, em situações que onde ocorram vantagens relevantes, como é o caso de ETAR que funcionam 24 horas e que o processo de tratamento da fase sólida apenas opera num determinado período do dia (8 a 16 horas, em regra). Este tipo de armazenamento deverá ser evitado para períodos superiores a 24 horas, visto existir o risco potencial de as lamas deteriorarem o efluente, assim como a possibilidade de as lamas se tornarem sépticas.

No caso do armazenamento na fase sólida, o mesmo poderá ocorrer ao nível das operações de espessamento, digestão anaeróbia e aeróbia, compostagem e secagem natural. Embora acarrete menores riscos comparativamente com o armazenamento na fase líquida, não é aconselhável o seu armazenamento durante um longo período, devido aos riscos de geração de odores.

Em situações em que o armazenamento não se consegue fazer de uma forma satisfatória ao longo do processo de tratamento, é aconselhável que o mesmo seja feito em equipamentos criados unicamente para esse efeito. Estas estruturas, excepto para períodos de armazenamento curtos (inferior a 3 dias) poderão funcionar simultaneamente em termos de tratamento (estabilização).

Existem inúmeros equipamentos de armazenamento, devendo a sua escolha ser desenvolvida em função da quantidade de matéria sólida presente nas lamas e do conhecimento das suas características reológicas (consistência física). De uma forma geral, podemos dividir os equipamentos em equipamentos destinados a armazenar lamas líquidas e equipamentos apropriados para armazenar lamas desidratadas.

Os principais equipamentos de armazenamento de lamas líquidas são os tanques de armazenamento, as lagoas facultativas, lagoas anaeróbias e lagoas arejadas.

Os tanques de armazenamento poderão ser parte integrante de outras operações de tratamento, como condicionamento ou estabilização ou poderão encontrar-se no final do processo de tratamento. Nesta última situação importa que sejam tomadas as devidas medidas de precaução para minimizar a geração de odores. Na impossibilidade de os evitar importa tratá-los através de lavadores de gases, filtros de carvão activado e incineração.

O armazenamento das lamas líquidas em qualquer tipo de lagoas, apresenta um problema comum: a geração de odores desagradáveis. Devem por isso situar-se a uma distância suficiente das populações, de modo a evitar incómodos e serem dotadas de eficientes mecanismos de ventilação e tratamento dos odores libertados.

Em relação às lamas desidratadas e em função do teor em sólidos, podemos distinguir dois tipos de lamas: as lamas secas com uma quantidades de sólidos superior a 60%; e as lamas com composição de sólidos entre 15 e 60%. No primeiro caso, o seu armazenamento poderá ser feito através das técnicas usualmente utilizadas para os materiais sólidos.

Para as restantes, existem diversas estruturas de armazenamento: lagoas de lamas desidratadas, estruturas confinadas e pilhas. Cada uma das estruturas apresenta exigências específicas de planeamento, concepção e dimensionamento.

As lagoas de lamas desidratadas são, talvez, o método mais comum de armazenamento de lamas desidratadas. A semelhança das lagoas para lamas líquidas apresentam o problema da formação de odores, tornando-as incomodativas junto das populações onde se quer instalar ou onde ela já está implantada.

As estruturas confinadas apresentam alguns problemas quando se pretende armazenar lamas com alguma quantidade de água (teor de sólidos menor que 30%), devido à continuação da decomposição por redução da matéria orgânica e à liquefacção por redução das matérias putrescíveis.

O armazenamento em pilhas ou medas é sobretudo utilizado quando se pretende armazenar por um longo período de tempo. Contudo, para evitar problemas de lixiviação e perda da condição de “estabilização” pelas águas das chuvas, é aconselhável a sua cobertura ou fazer o seu armazenamento em espaços cobertos.

3.2.1 Armazenamento de bio-sólidos em explorações agrícolas

O armazenamento dos bio-sólidos em explorações agrícolas assume extrema importância, visto a aplicação dos mesmos estar sujeita a uma grande variabilidade no tempo, por inúmeros motivos: condições adversas de tempo; períodos em que haja restrições legais à sua aplicação; indisponibilidade temporária, a nível da região, de terrenos com condições de poderem receber as lamas por estarem ocupados com culturas, criando-se uma situação de excesso de oferta sobre a procura; avarias, a nível da exploração agrícola, dos equipamentos de aplicação ou falta temporária de operadores desses equipamentos.

O tipo de armazenamento mais usual é a sua disposição em medas ou pilhas, devendo o mesmo ser feito sobre pavimentos impermeáveis ou de permeabilidade muito reduzida, de forma a evitar que os lixiviados se infiltrem no solo e originem a poluição das águas antes de serem aplicadas. Por outro lado para evitar ou reduzir as perdas de elementos fertilizantes, sobretudo de azoto por volatilização (por acção do vento) ou por lixiviação (por acção das águas das chuvas), estas medas ou pilhas deverão ficar ao abrigo do vento e da chuva em espaços cobertos. Quando ao ar livre, a sua cobertura deverá ser realizada com telas impermeáveis.¹⁵

Além destas considerações, a selecção do local de armazenamento é extremamente importante para reduzir os riscos de poluição ambiental. Deverão ser rejeitados: os locais susceptíveis a inundações; os terrenos declivosos que possam originar, em períodos de elevada pluviosidade, o deslizamento das medas e o seu arrastamento para os terrenos e linhas de água situadas a jusante; os locais sobre condutas de drenagem para onde facilmente se possam infiltrar lixiviados, que assim rapidamente possam atingir e contaminar os cursos de água; e, os locais que fiquem a menos de 200 m de povoações, 100 m de casas isoladas, 100 m de captações de água para consumo, 50 m de poços e furos exclusivamente utilizados para rega e 10 m de caminhos, cursos de água ou de valas de drenagem.

Simultaneamente, as instalações de armazenamento deverão ser concebidas de modo a reter os lixiviados que possam ser originados durante o período de armazenamento, permitindo o seu envio adequado para tratamento.

Deste modo, a gestão do armazenamento dos bio-sólidos nas explorações agrícolas deverá operar-se de forma a minimizar as perdas do seu valor fertilizante e os riscos de poluição, em especial a emissão de cheiros indesejáveis e perceptíveis pela vizinhança e a poluição das águas por lixiviação.

3.3 Transporte de lamas de ETAR

O transporte das lamas é uma operação inevitável no processo de gestão de lamas de ETAR. Este poderá ser feito para pequenos percursos (dentro da própria instalação) ou para percursos mais longos (envio para destino final ou para serem tratadas noutra ETAR).

Os métodos mais utilizados para o transporte das lamas em longas distâncias são: a bombagem; o transporte por camião; e, o transporte por comboio. No caso de pequenos percursos, além da bombagem, existem outros tipos de transporte, como o transporte manual, os tapetes rolantes, os parafusos e o transporte pneumático.⁵⁵

O método de transporte escolhido e o seu custo está dependente de diversos factores, nomeadamente: a natureza, a consistência e a quantidade de lama a transportar; a distância do percurso entre a origem e o destino; a disponibilidade e proximidade de meios de transporte dentro desse percurso; o grau de flexibilidade pretendido; e, a vida útil estimada do local de destino final das lamas.⁵⁴

Contudo, em todos eles, devem ser tomados os necessários cuidados, em condições de segurança, de forma a evitar ou reduzir, tanto quanto possível, os riscos para a saúde das pessoas e para a qualidade do ambiente.

O transporte por bombagem revela-se mais adequado para o transporte de lamas com concentrações até 6% matéria sólida. Para concentrações superiores, o seu transporte torna-se economicamente inviável devido aos elevados custos energéticos. Por outro lado, durante a bombagem e sobretudo para caudais reduzidos, existe o risco de sedimentação e corrosão do material, tornando a sua manutenção e limpeza extremamente onerosa e complicada. Além disso, a pouca ou nenhuma flexibilidade para alterar o ponto de partida e chegada das lamas faz com que seja sobretudo utilizado para pequenos percursos, nomeadamente dentro da própria instalação.⁵⁴

O transporte por camião é o método mais adequado para o transporte das lamas produzidas na maioria das pequenas ETAR e para algumas de grandes dimensões. Este tipo de transporte possibilita que sejam transportadas lamas com pequenas ou grandes concentrações de matéria sólida e, além do mais, apresenta uma maior flexibilidade relativamente aos outros tipos de transporte considerados, ao permitir que possa ocorrer mudança do percurso e dos pontos de recolha e deposição, em pouco tempo. É o método vulgarmente utilizado para o envio dos biossólidos para as explorações agrícolas para a sua valorização como correctivo no solo.

O transporte ferroviário é um método pouco utilizado, embora apresente um baixo custo energético por unidade de lama transportada e permita o transporte de lamas com qualquer concentração de sólidos. Contudo, apresenta várias desvantagens nomeadamente o grande investimento inicial, ao necessitar que sejam criados locais para recolha e deposição fixos. Além do mais, a menor flexibilidade na definição das rotas a percorrer torna este método de transporte apenas equacionável quando existe uma linha entre a ETAR e o local de deposição ou tratamento, ou quando a proximidade entre eles permite a construção de um pequeno troço economicamente viável.⁵⁴

3.4 Destino final das lamas de ETAR

Apesar de todas as técnicas de tratamento expostas anteriormente, não se pode ter a ilusão que a questão da gestão das lamas esteja definitivamente resolvida, uma vez que a principal preocupação deverá ser encontrar o destino final adequado para as lamas tratadas. Qualquer estação de tratamento que não consiga alguma forma de deposição final das lamas está fatalmente condenada ao insucesso.

Neste trabalho considerou-se como hipóteses de destino final a deposição em aterro e a sua valorização agrícola através da sua aplicação no solo como correctivo e fonte de nutrientes. Outros destinos menos comuns consistem na recuperação de taludes, encerramento de pedreiras, reparação de fendas no solo e fabrico de agregados leves. Estes últimos não serão abordados no seguimento deste subcapítulo.

O processo de incineração embora apresentado por alguns autores como processo de destino final de lamas de ETAR, não o será na íntegra, visto no final do processo resultar um resíduo: as cinzas. Assim optou-se por considerar este processo como uma forma de tratamento das lamas, que além de provocar uma redução significativa do seu volume do material, permite a destruição dos organismos patogénicos e substâncias orgânicas perigosas, transformando a lama em cinzas. Estas cinzas deverão ser posteriormente sujeitas a qualquer uma das hipóteses de destino final consideradas, bem como utilizadas em parte integrante de alguns produtos úteis, nomeadamente materiais de construção, tijolos e materiais cerâmicos.

A deposição em aterro das lamas está condenada, tanto em Portugal como na maior parte dos países europeus. Com efeito, a tendência que se desenha é a de limitar cada vez mais o depósito em aterros de materiais eventualmente recicláveis ou valorizáveis por outras vias, nomeadamente os resíduos orgânicos e, em particular as lamas de ETAR.⁴⁴

A deposição em aterro das lamas deverá apenas ser feita quando a presença de metais pesados ou substâncias tóxicas inviabiliza a sua valorização. Os riscos de contaminação das águas subterrâneas, por lixiviação e a produção de odores desagradáveis, pela geração de condições anaeróbias e sépticas exigem uma correcta monitorização de todo o processo. Para reduzir estes riscos, importa que as lamas sejam previamente estabilizadas antes de serem depositadas em aterro.

A valorização agrícola das lamas visa tirar partido do valor fertilizante das lamas, nomeadamente a sua riqueza em matéria orgânica e nutrientes, tornando-as num produto útil no processo produtivo das culturas. Contudo essa aplicação está condicionada por diversos factores: características dos solos; características das lamas; topografia; tipo de solo; profundidade do nível freático; proximidade a áreas críticas e acessibilidade. Estes aspectos serão descritos detalhadamente no capítulo 4.

3.4.1 Evolução do destino final das lamas

Na figura 3.12 apresenta-se a evolução do destino final das lamas de ETAR nos países da União Europeia.

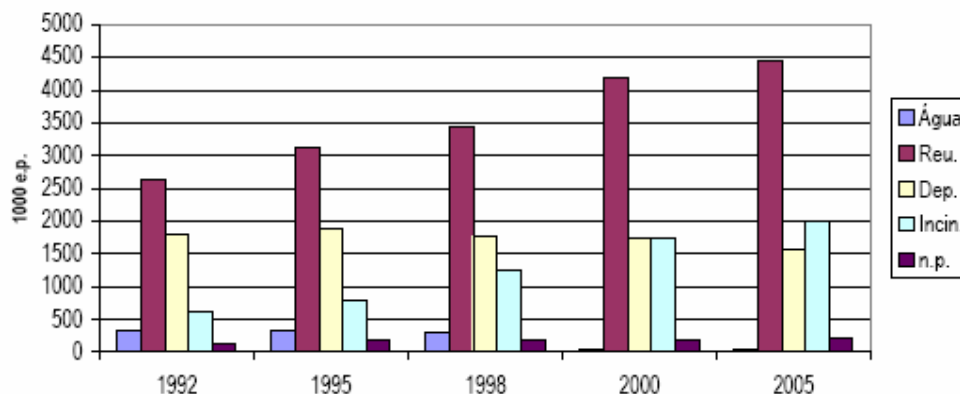


Figura 3.12 - Evolução do destino final das lamas de ETAR nos países da União Europeia⁵⁵

Claramente se observa no gráfico que a reutilização, através da sua valorização agrícola, é e será o principal destino dado às lamas.

A descarga das lamas na água, proibida em 1998, pela Comunidade Europeia (CE), deixou de ser praticada desde então, embora ainda sejam de prever alguns casos, com tendência a desaparecer.

A opção pela incineração das lamas tem evoluído ao longo dos anos, contudo esse aumento não se prevê idêntico ao da sua reutilização, pelos inúmeros problemas que a mesma acarreta, já enunciados.

Por fim, a deposição em aterro tem sido mais ou menos constante, prevendo-se que tenda a diminuir, ao ser limitada a sua utilização para as lamas que apresentem características que permitam a sua valorização.

Na figura 3.13 apresenta-se a evolução do destino final dado às lamas, para o mesmo período, em Portugal Continental.

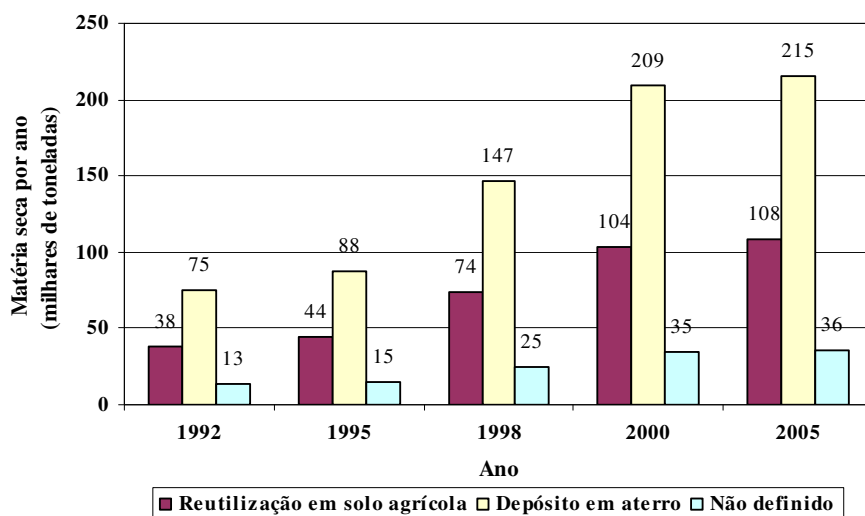


Figura 3.13 - Principais destinos finais dados às lamas de ETAR em Portugal⁷⁸

Contrariamente ao que sucede na maioria dos países da União Europeia, em Portugal tem-se verificado uma aposta ténue na reutilização das lamas, através da sua valorização agrícola, favorecendo-se a sua deposição em aterro. Cerca de 10% das lamas têm destino desconhecido.

O potencial fertilizante da lama não deve continuar a ser desprezado, devendo ser promovida a sua reutilização em solos agrícolas, à semelhança do que sucede em grande parte dos países da União Europeia.

Além do mais a pobreza mais ou menos generalizada nos nossos solos em matéria orgânica e nos dois principais nutrientes para as plantas - o azoto e o fósforo – justificam a utilização das lamas, como importantes veiculadores destes elementos, na correcção dessas deficiências, tornando-os mais férteis e produtivos.

4 Valorização agrícola dos biossólidos

A utilização de lamas tratadas (biossólidos) na agricultura tem sido praticada com sucesso há várias décadas. Contudo, tem-se denotado um interesse crescente na sua aplicação, em resultado da menor disponibilidade e viabilidade das outras opções de destino final, sobretudo o aterro e a incineração pelos factores já referidos.

A utilização dos biossólidos na agricultura assume-se como a forma de destino final mais adequada em termos técnicos, económicos e ambientais, desde que convenientemente aplicada. Qualquer outro destino além do seu uso na agricultura, não permitirá o aproveitamento daquilo que os biossólidos possuem de mais valioso, ou seja, os nutrientes e a matéria orgânica que veiculam. A sua valorização agrícola torna-os num produto útil dentro do processo produtivo, fechando o ciclo ao repor os nutrientes que se retiraram na produção dos bens alimentares. Por sua vez permite economizar na utilização dos fertilizantes químicos.

4.1 Valor fertilizante dos biossólidos

No quadro 4.1 apresenta-se a composição típica dos biossólidos. Os valores apresentados são meramente indicativos, uma vez que a sua composição varia bastante em função da composição das águas que afluem à ETAR e da tecnologia de tratamento a que elas são sujeitas.

Quadro 4.1 - Composição típica dos biossólidos

Característica	Biossólidos	
	Valor tipo	Referência
pH	7,0	54
Matéria orgânica (%)	48,0	27
Azoto total (N % matéria seca)	3,3	27
Razão C/N	8,4	27
Fósforo total (P ₂ O ₅ % matéria seca)	4,3	27
Potássio total (K ₂ O % matéria seca)	0,3	27
Cálcio total (Ca %)	6,5	27
Magnésio total (Mg % matéria seca)	0,7	27
Enxofre total (S % matéria seca)	2,6	27

Genericamente podemos caracterizar os biossólidos como sendo produtos ricos em matéria orgânica, contendo maiores ou menores quantidades dos principais macronutrientes azoto (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), essenciais ao crescimento e desenvolvimento das culturas. Quanto maiores forem as quantidades destes elementos nos biossólidos, maior será a importância da sua utilização na agricultura.

Além destes elementos, os biossólidos poderão igualmente veicular micronutrientes como o ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), boro (B), cloro (Cl), molibdénio (Mo) e níquel (Ni). Poderão conter ainda, muitos outros elementos químicos, alguns dos quais, como sódio (Na) e o cobalto (Co), úteis para certas culturas sensíveis a estes elementos, como é caso do sódio para a cultura da beterraba sacarina e o cobalto para as leguminosas, pois é indispensável à fixação do azoto atmosférico através da simbiose *Rhizobium-Leguminosa*.⁷⁹

Deste modo, podem ser utilizados como correctivos orgânicos pelos seus teores em matéria orgânica e tidos em conta em planos de fertilização do solo e das culturas pelos seus valores em nutrientes, em especial azoto e fósforo. Adicionalmente, no caso em que a sua estabilização tenha sido realizada com cal, os biossólidos poderão actuar como correctivos alcalinizantes sobre os solos, fazendo subir o seu pH.

4.1.1 Importância dos bio sólidos como correctivos orgânicos

Até há 150 anos pensava-se que a matéria orgânica entrava directamente na alimentação das plantas, tão visível era a resposta das culturas à aplicação dos dejectos animais e humanos e de outros resíduos orgânicos provenientes da actividade agrícola.

Hoje sabe-se que a matéria orgânica liberta, de uma forma gradual, por mineralização, nutrientes essenciais para as culturas (azoto, fósforo, enxofre, micronutrientes), mas que não é a sua principal função no solo.

A matéria orgânica apresenta inúmeros contributos para a fertilidade do solo que importa salientar:⁸⁰

- o papel das substâncias húmicas na formação e estabilidade dos agregados, funcionando como cimento, que mantém unidas as partículas minerais do solo;
- contribuição para a manutenção de um equilíbrio água/ar favorável ao desenvolvimento das raízes das plantas e à absorção de água e nutrientes;
- protecção do solo contra a erosão, favorecendo a drenagem e evitando o arrastamento das partículas finas para os cursos de água;
- acção reguladora da disponibilidade de nutrientes veiculados através dos adubos contribuindo para diminuir os riscos de poluição dos solos e das águas;
- constitui um veículo de microorganismos úteis e de antagonistas de agentes fito patogénicos, dando vida ao solo e contribuindo para proteger as culturas das pragas e doenças;
- funciona como fonte de alimento para diversos seres heterotróficos, viabilizando variados processos de mineralização e o ciclo dos nutrientes no solo;
- pela reactividade dos ácidos fúlvicos que a constituem, a matéria orgânica acelera o processo de meteorização das rochas, contribuindo desta forma para a reposição do solo que se vai perdendo por erosão, podendo mesmo ajudar à recuperação de solos degradados e erosionados;
- permite utilizar o solo como sumidouro de carbono e reduzir a emissão de gases com efeito de estufa..

Do exposto, ressalta a importância de ser garantido um teor adequado de matéria orgânica nos solos. Condições climáticas adversas, gestão incorrecta das mobilizações do solo e das rotações culturais e ausência de restituição de resíduos orgânicos, poderão favorecer a destruição da matéria orgânica nos solos.⁸⁰

A utilização dos bio sólidos, como fonte de matéria orgânica, permitirá aumentar, ou pelo menos, manter o teor de matéria orgânica dos solos, assegurando a manutenção da sua fertilidade, da sua produtividade e da sua conservação.

4.1.2 Importância dos bio sólidos como fonte de nutrientes

Os teores dos macro e micro nutrientes presentes nos bio sólidos variam muito, consoante o tipo de tratamento aplicado na fase líquida, e o processo de estabilização aplicado durante o tratamento das lamas.

Comparativamente com os fertilizantes comerciais, o valor dos bio sólidos, em termos de nutrientes, é relativamente reduzido, sobretudo em termos de azoto, fósforo e potássio como se demonstra no quadro 4.2 onde se apresenta a comparação entre os teores dos principais macronutrientes azoto, fósforo e potássio (N:P:K) veiculados pelos fertilizantes comerciais e bio sólidos.

Quadro 4.2 - Comparação entre os teores dos macro-elementos N:P:K dos fertilizantes comerciais e dos biossólidos (adaptado⁵⁴)

	Nutrientes (% matéria seca)		
	Azoto (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)	Potássio (K ₂ O)
Fertilizantes comerciais para uso na agricultura	5	10	10
Valores tipo nas lamas de ETAR estabilizadas	3.3	2.3	0.3

Contudo geralmente uma ou duas aplicações a baixa taxa no solo, são suficientes para suprimir todo o azoto e fósforo requerido pelas culturas (o seu teor de potássio é baixo) sem apresentar riscos potenciais de contaminação das águas do subsolo.⁷⁹

Por conseguinte, é extremamente importante ter em conta este *input* aquando da definição dos planos de fertilização das explorações agrárias onde os biossólidos venham a ser aplicados.

Apresenta-se, em seguida, algumas considerações sobre os principais macro e micronutrientes veiculados pelos biossólidos.

O azoto promove o crescimento das folhas e dos caules. É importante constituinte da clorofila e do protoplasma celular, sendo essencial para as transformações energéticas que ocorrem dentro do vegetal. O excesso do azoto dificulta a absorção de outros nutrientes, retardando a colheita e diminuindo a resistência da folhagem contra as doenças.⁷⁹

O azoto é normalmente o mais valioso constituinte dos biossólidos, sendo também o elemento para o qual as culturas apresentam maiores respostas. Ele também pode ser usado como factor limitante para a definição da dosagem máxima de biossólido a ser aplicado ao solo, pois, acima de um certo nível, o azoto poderá lixiviar sob a forma de nitratos e contaminar o lençol freático.

O azoto presente nos biossólidos provém dos dejectos existentes no esgoto e da biomassa microbiana, encontrando-se sob a forma orgânica e sob a forma mineral, esta constituída na sua quase totalidade por azoto amoniacal. A proporção entre as diferentes formas de azoto varia bastante com os processos de tratamento a que os biossólidos são sujeitos. No quadro 4.3 demonstra-se o efeito do processo de tratamento sobre as duas principais formas de azoto presentes nos biossólidos.

Quadro 4.3 - Efeito do processo de tratamento sobre as formas de azoto nos biossólidos (adaptado⁸¹)

Processo de tratamento	Estado físico dos biossólidos	Azoto amoniacal	Azoto orgânico
		Em % azoto total	
Digestão anaeróbia	Líquido	60	40
Digestão aeróbia	Líquido	25	75
Digestão anaeróbia /aeróbia e armazenamento em lagoa durante mais de 6 meses	Líquido	25	75
Digestão anaeróbia e desidratação	Semi-sólido (pastoso)	25	75
Leito de secagem	Sólido	25	75
Secagem térmica	Sólido	10	90
Compostagem	Sólido	10	90

O azoto orgânico não se encontra em condições de ser utilizado imediatamente pelas plantas, necessitando passar por uma mineralização microbiológica antes de ser absorvido. Este processo microbiológico envolve a transformação de azoto orgânico na forma amoniacal (NH₄⁺), nitrito (NO₃⁻) e nitrato (NO₂⁻).

A mineralização do azoto orgânico é um processo natural que depende de muitos factores, como sejam o teor de matéria orgânica e a relação carbono/azoto (C/N), a temperatura, o teor de humidade, o pH, a época do ano, a duração do ciclo cultural; o processo de tratamento a que a

lama foi sujeita; a intensidade da vida microbiana do solo, etc, o que torna, na prática, muito difícil a sua avaliação.

No quadro 4.4 demonstra-se o efeito do processo de tratamento das lamas sobre a taxa de mineralização do azoto orgânico dos bio sólidos no primeiro ano de aplicação.

Quadro 4.4 - Efeito do processo de tratamento das lamas sobre a taxa de mineralização do azoto orgânico no 1º ano de aplicação dos bio sólidos (adaptado⁸¹)

Processo de tratamento	Taxa de mineralização do azoto no 1º ano (%)
Digestão anaeróbia	20-40
Digestão aeróbia	30-45
Digestão aeróbia/anaeróbia e armazenamento em lagoa durante 6 meses	15-30
Digestão anaeróbia e desidratação	20-40
Leito de secagem	15-30
Secagem térmica	20-40
Compostagem	0-20

Por norma, as lamas digeridas apresentam uma proporção de azoto orgânico facilmente mineralizável superior às lamas submetidas a tratamentos mais intensos e duradouros de estabilização, como é o caso dos longos períodos de retenção em leitos de secagem e em estruturas de compostagem.

O azoto mineral presente nos bio sólidos poderá estar presente sob a forma amoniacal e sob a forma nítrica, embora com prevalência para a primeira, como já se referiu. O azoto nítrico, dada a sua grande solubilidade, pode perder-se arrastado pelas águas das chuvas ou das regas em excesso que se infiltram no solo ou escorrem à superfície, indo contaminar e poluir os lençóis freáticos ou os meios aquáticos superficiais. Pode ainda perder-se por desnitrificação para a atmosfera sob forma de azoto molecular (N_2). Essas perdas deverão ser reduzidas, quer do ponto de vista ambiental, quer do ponto de vista económico, adoptando técnicas culturais que optimizem a sua absorção pelas plantas.²⁷

O azoto amoniacal poderá também sofrer perdas por volatilização sob a forma de amoníaco, sobretudo quando incorporados à superfície em solos alcalinos e durante um tempo seco e ventoso. Estas perdas são mais significativas durante as primeiras horas que se seguem à distribuição dos bio sólidos, podendo levar à perda total do azoto amoniacal. Normalmente considera-se que apenas 50% do azoto amoniacal é retido no solo, perdendo-se o resto por volatilização.⁸¹ Para reduzir essas perdas deve-se proceder à sua aplicação com tempo pouco ventoso e incorporar no solo, logo após a sua distribuição.¹⁵

O fósforo estimula o crescimento das raízes, acelera a manutenção da planta e aumenta a sua resistência às doenças. A adubação fosfatada pesada não traz inconveniente às culturas, contrariamente ao que ocorre com o excesso eventual de azoto e/ou potássio. Isto deve-se ao baixo teor de aproveitamento do fósforo por parte das raízes e à pobreza de maioria dos solos em fósforo.

O fósforo contido nos bio sólidos provém dos dejectos e corpos microbianos presentes no efluente esgoto e dos detergentes e sabões que utilizam fosfatos como aditivos. A biodisponibilidade deste elemento nos bio sólidos é alta, variando de 40 a 80% do fosfato total. Algumas formas de tratamento, nomeadamente a estabilização química com cal, podem reduzir um pouco a disponibilidade do fósforo contido nos bio sólidos. Considera-se que em média 50% do fósforo encontra-se sob formas minerais (fosfatos de cálcio, alumínio e ferro) e estará disponível para as plantas no primeiro ano de aplicação das lamas.⁸¹

O fósforo presente sob a forma orgânica, indisponível para as plantas, vai gradualmente ficando disponível à medida que a mineralização dos bio sólidos no solo se vai processando, à

semelhança do que sucede com as fracções do azoto e de outros nutrientes, dependendo a sua rapidez, do tipo de bio sólido e dos factores já citados.

O potássio desenvolve a parte rija dos caules e a polpa das frutas, formando os tecido fibrosos e resistentes; é ainda necessário à formação da clorofila e aumenta a resistência da planta contra as doenças. Contudo, retarda a maturação do vegetal.⁷⁹

Por ser muito solúvel, apenas uma pequena parcela do potássio contido no efluente fica retido nos bio sólidos. Como tal, o teor de potássio nos bio sólidos é baixo, sendo um macronutriente a ser fornecido por suplementação da fertilização mineral. Embora apresentando baixos teores de potássio, 100% deste nutriente é considerado assimilável.¹⁵

O cálcio desempenha um papel fundamental na estabilidade das membranas celulares; no controlo da absorção de vários outros elementos (em especial do azoto, estando portanto associado ao metabolismo azotado); na translocação dos glúcidos dentro da planta, etc.⁷⁹

O magnésio, sendo o único constituinte mineral da clorofila ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$), é desde logo indispensável às plantas. Por outro lado actua como estabilizador das partículas dos ribossomas, mantendo-as numa configuração necessária para a síntese das proteínas; está envolvido em diversos fenómenos bioquímicos e fisiológicos; e, é cofactor em todas as enzimas que activam o processo de fosforilação através de uma ligação entre o fosfato (pirofosfato) do ATP ou ADP e a molécula das enzimas.⁷⁹

Estes dois elementos (cálcio e magnésio) encontram-se em concentrações muito variáveis nos bio sólidos, dependendo da dureza das águas de abastecimento público de que provêm os bio sólidos e do método de estabilização aplicado.

Os bio sólidos estabilizados com cal contêm bastante cálcio e uma calagem, em simultâneo com a distribuição dos bio sólidos, poderá contribuir para teores elevadíssimos deste elemento no solo podendo ter efeitos inibidores sobre a produção. Esta situação, poderá também contribuir, mas em muito menor extensão, para teores elevados de magnésio, sobretudo quando utilizados correctivos alcalinizantes com quantidades apreciáveis de carbonato de magnésio.

O enxofre é um elemento essencial às plantas, participando activamente na formação de diversos compostos fundamentais. Embora sem ser um constituinte da clorofila é exigido para a sua formação; forma compostos voláteis responsáveis pelos cheiros característicos de plantas como a mostarda e a cebola; favorece o aumento do teor de óleo na soja e no linho; influi benéficamente na actividade do *Rhizobium*, etc.⁷⁹

Este elemento está presente nos bio sólidos em reduzidas concentrações, extremamente variáveis, podendo-se disponibilizar para as plantas logo no ano da aplicação, em proporção tanto mais elevada quanto mais intensa for a sua mineralização. Mesmo para aplicações baixas de lamas são suprimidas as necessidades em enxofre da maioria dos vegetais.¹⁵

Os micronutrientes: ferro, cobre, zinco, manganês, níquel, boro, molibdénio e cloro poderão estar presentes em maiores ou menores quantidades nos bio sólidos. Geralmente, quando os bio sólidos são aplicados em taxas suficientes para suprimir as necessidades de azoto, as necessidades de micronutrientes são igualmente suprimidas.⁷⁹

4.2 Principais contaminantes presentes nas lamas

A par das substâncias valiosas, os bio sólidos poderão conter em maior ou menor quantidade, substâncias prejudiciais, susceptíveis de desvalorizá-los ou, mesmo, de inutilizá-los completamente para serem aproveitadas como fertilizantes na agricultura. É o caso dos chamados metais pesados, que acima de certas concentrações se tornam tóxicos para as plantas,

para os animais e para o próprio homem. Será o caso, também, de certos compostos orgânicos, genericamente definidos como micropoluentes orgânicos, potencialmente tóxicos para a vida animal. Além dos contaminantes referidos, os bio sólidos poderão ainda conter organismos patogênicos capazes de causar doenças.

4.2.1 Metais pesados

Entre os diferentes contaminantes dos bio sólidos, os metais pesados são o grupo com a mais extensa literatura existente. São classificados como metais pesados os elementos químicos, de carácter metálico, que apresentam densidade atômica maior que 5 g.cm^{-3} . Entre esses elementos, alguns são nutrientes de plantas, caso do cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdénio (Mo) e níquel (Ni). A estes somam-se outros elementos metálicos que apresentam uma toxicidade intrínseca associada ao seu nome tal como o cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e outros elementos de transição da tabela periódica considerados potencialmente tóxicos a seres vivos, e que também poderão estar presentes nos bio sólidos.

Nos bio sólidos provenientes de lamas domésticas, os excrementos humanos contribuem com cerca de 60-70% do teor em cádmio, zinco, cobre e níquel, derivando os restantes 30-40 % de outras fontes, tais como cremes de tratamento corporal, medicamentos, produtos de limpeza e/ou das canalizações. No quadro 4.5 apresentam-se as principais fontes domésticas de elementos metálicos tóxicos.

Quadro 4.5 - Principais fontes domésticas de elementos metálicos tóxicos (adaptado⁸²)

	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Termómetros							√				
Produtos de Limpeza					√	√					
Cosméticos, champô			√			√	√	√	√	√	√
Desinfetantes							√				
Extintores de incêndio					√						
Combustíveis						√	√		√		√
Tintas		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Óleos e lubrificantes						√	√		√		√
Medicamentos e pomadas		√		√		√	√				√
Suplementos de saúde				√	√	√				√	√
Produtos alimentares		√		√		√			√		√
Fotografia	√				√		√				
Produtos de polir	√					√					√
Pesticidas e produtos de jardinagem			√		√	√	√		√		
Limpa-pó			√						√		√
Conservadores de madeira		√				√			√		
Excrementos Humanos		√	√		√	√	√	√	√	√	√
Água da torneira			√		√	√			√		√
Sistemas de aquecimento			√			√		√	√		√

Concentrações mais significativas destes elementos são normalmente encontradas em bio sólidos provenientes de lamas de ETAR industriais e de ETAR domésticas com percentagens significativas de efluentes industriais à entrada da sua linha de tratamento.

No quadro 4.6 apresentam-se as principais fontes industriais dos principais metais pesados e o seu potencial nocivo sobre a vida vegetal.

Quadro 4.6 - Principais fontes industriais dos metais pesados

Metal	Origem	Micronutrientes necessários	Fitotóxico acima de certos limites ^{79,83}
Cádmio (Cd)	Indústrias de tratamento de superfícies metálicas, plásticos, fábricas de radiadores, borracha, pigmentos, etc.	Não ^{79,83}	Sim
Cobre (Cu)	Canalizações de água quente, fábricas de fios eléctricos, radiadores de automóveis e tratamento de superfícies metálicas	Sim ^{79,83}	Sim
Zinco (Zn)	Produtos farmacêuticos, fábrica de tintas, borracha, pilhas eléctricas, galvanização.	Sim ^{79,83}	Sim
Níquel (Ni)	Fábrica de ligas de aço especiais, recobrimento de superfícies metálicas por electrólise, hidrogenação de óleos e substâncias orgânicas, tintas, cosméticos.	Sim ⁷⁹	Sim
Mercúrio (Hg)	Produtos farmacêuticos, fungicidas, aparelhos eléctricos e electrónicos, tintas, pasta de papel, fabricação de cloretos de vinil.	Não ^{79,83}	Sim
Crómio (Cr)	Curtumes, fabricação de ligas especiais de aço, tratamento de superfícies metálicas.	Não ⁷⁹	Sim
Chumbo (Pb)	Fabrico de baterias, tintas, águas pluviais em vias públicas, canalizações.	Não ^{79,83}	Sim

A toxicidade dos metais pesados depende do teor e da especiação sob que eles se apresentam no biossólido, e, depois, no solo, sendo esta última dependente das diferentes interacções existentes no meio. A figura 4.1 resume as diversas reacções que controlam o teor de metais pesados na solução do solo.

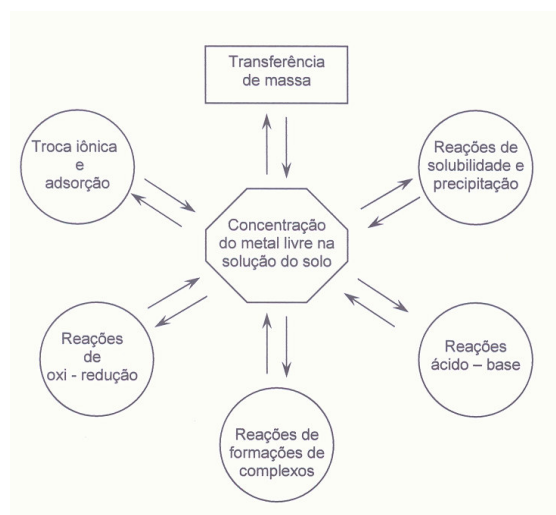


Figura 4.1 - Representação esquemática das reacções que controlam o teor de metais pesados na solução do solo (adaptado⁸⁴)

As possibilidades de inúmeros equilíbrios existentes levam a que os metais possam ocorrer na solução do solo sob variadas formas: sob a forma iónica ou complexada, genericamente designadas formas livres do metal; como iões trocáveis ligados ao material orgânico, inorgânico ou organomineral presentes no solo; como iões fortemente ligados aos complexos de troca; como parte integrante de complexos orgânicos, coprecipitados em sesquióxidos de ferro, alumínio e manganês; precipitados como sais solúveis; incorporados em microorganismos e nos seus resíduos biológicos; ou presos nas estruturas cristalinas dos minerais primários ou secundários.

Das diferentes formas possíveis de estar presentes na solução do solo, as espécies sob a forma iónica ou sob a forma de complexos solúveis são as mais importantes, dado serem as formas mais móveis no solo e mais facilmente absorvidas pelas culturas. Em geral, Cd, Zn, Ni e Mn apresentam maior mobilidade no solo que Cu, Cr e Pb, por serem menos retidos pelos minerais de argila, óxidos/hidróxidos do solo, e por formarem complexos solúveis com ligantes orgânicos e inorgânicos.⁸⁵

Acresce ainda o facto de a facilidade com que a maioria dos metais pesados se solubiliza no solo, aumentar com o nível de acidez do mesmo, isto é, será tanto maior quanto menor for o valor do pH desse solo.^{15,85} Na figura 4.2 demonstra-se o efeito do pH sobre a concentração do Zn na solução do solo.

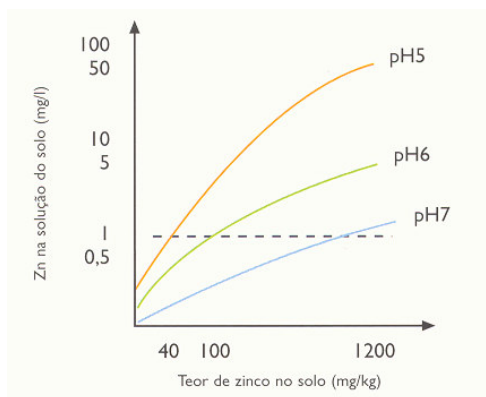


Figura 4.2 - Efeito do pH e do teor de Zn no solo sobre a concentração deste metal pesado na solução do solo¹⁵

A figura demonstra que a concentração de 1 mg/l de Zn na solução do solo, concentração esta que já prejudica o crescimento de algumas culturas mais sensíveis, pode obter-se quando o teor total de zinco no solo a pH 7 é de 1200 mg/kg. Quando o solo se torna mais ácido e o seu pH desce para 6 e 5, observa-se que bastarão 100 mg/kg e 40 mg/kg, respectivamente de zinco total no solo, para se manter o nível de 1 mg/l na solução do solo.

Como tal, é extremamente importante o factor pH na definição dos valores-limite para a concentração dos metais pesados no solo. Este facto é patente nos valores definidos pela Portaria nº 176/96, de 13 de Outubro, onde são estabelecidas três categorias em função do pH dos solos receptores ($\text{pH} \leq 5,5$; $5,5 < \text{pH} \leq 7$ e $\text{pH} > 7$) para os valores-limite de concentração dos metais pesados nos solos.¹¹

Por fim, convém referir que os metais pesados encontram-se naturalmente presentes em maiores ou menores quantidades nos solos, dependendo da natureza da rocha-mãe que lhes deu origem, bem como do grau de exposição a fenómenos de contaminação com esses ou outros metais a que tenham estado sujeitos no passado por acção antropogénica, isto é, do próprio homem.

Tal facto, por vezes é omissa ao se afirmar que o uso de bioossólidos contamina determinados solos, quando em muitas das situações os próprios solos já apresentam teores de metais pesados elevadíssimos e como tal desaconselháveis à utilização de bioossólidos.

4.2.2 Contaminantes químicos orgânicos

Outros contaminantes importantes que poderão estar presentes nos bioossólidos são os contaminantes químicos orgânicos. Existem centenas destas substâncias que podem estar presentes nos bioossólidos, variando desde simples componentes do resíduo doméstico até produtos farmacêuticos complexos. Os compostos orgânicos tóxicos normalmente encontrados nos bioossólidos são os policlorobifenilos (PCB), pesticidas organoclorados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) e fenóis, que resultam de descargas industriais, podendo ser controlados na origem. Os PCB têm recebido especial atenção devido à sua toxicidade, persistência e tendência para a bioacumulação.

Quando se utilizam bioossólidos na agricultura, a absorção destes compostos pelas raízes das plantas pode ocorrer, mas a principal via de entrada não é através das raízes, mas sim através das folhas, como resultado da volatilização destes contaminantes.

Poucos são os países que colocam restrições baseadas nos contaminantes químicos orgânicos para a utilização de biossólidos na agricultura, visto ainda permanecer muitas dúvidas sobre o que é um contaminante químico orgânico, quais as vias e limites para a contaminação do homem e quais as consequências para a saúde humana.

Este tópico fica como um alerta para a necessidade de se desenvolverem estudos nesta área para as condições portuguesas.

4.2.3 Microorganismos Patogénicos

Os biossólidos poderão conter os mais variados tipos de microorganismos patogénicos. Contudo, a simples presença do agente infeccioso nos biossólidos, não significa automaticamente a imediata transmissão de doenças, caracterizando-se apenas por um risco potencial.

O risco real de um indivíduo ser infectado reside na combinação de uma série de factores, entre os quais: a resistência dos organismos patogénicos ao processo de tratamento; as condições ambientais; dose infecciosa; patogenicidade; susceptibilidade e grau de imunidade do hospedeiro; e, grau de exposição humana aos focos de transmissão.⁸⁶

Assim sendo, para que um determinado microorganismo presente nos biossólidos chegue a provocar doença, o mesmo terá de resistir aos diversos processos de tratamento empregues, e às condições do meio ambiente, de forma a sobreviver em número suficiente para infectar um indivíduo susceptível.

No quadro 4.7 apresenta o tempo de sobrevivência dos principais organismos patogénicos no solo e vegetais à temperatura ambiente.

Quadro 4.7 - Tempo de sobrevivência dos microorganismos patogénicos no solo e vegetais sob temperatura ambiente de 20-30°C⁸⁶

Microorganismos	Sobrevivência	
	Solo	Vegetais
Vírus entéricos	<100 dias (<20)	<60 dias (<15)
Bactérias		
<i>Coliformes fecais</i>	<70 dias (<20)	<30 dias (<15)
<i>Salmonella sp</i>	<70 dias (<20)	<30 dias (<15)
<i>Vibrio cholerae</i>	<20 dias (<10)	<5 dias (<2)
Protozoários		
<i>Entamoeba. histolytica</i> cistos	<20 dias (<10)	<10 dias (<2)
Helmintos		
<i>Ascaris lumbricoides</i> ovos	Meses	<60 dias (<30)
<i>Necator americanus</i> larvas	<90 dias (<30)	<30 dias (<10)
<i>Ancylostoma duodenale</i>	<90 dias (<30)	<30 dias (<10)
<i>Taeni saginata</i> ovos	Meses	<60 dias (<30)
<i>Trichuris trichiura</i> ovos	Meses	<60 dias (<30)

Obs: Os valores fora dos parênteses referem-se aos valores máximos observados na literatura e os valores entre parênteses aos valores habitualmente encontrados.

Embora o conhecimento da tolerância dos microorganismos às condições ambientais por si só não permita a caracterização de um risco real de transmissão de doenças, a observação destes valores não deixa de ser uma valiosa ferramenta na avaliação dos potenciais riscos de infecção.

O tempo de sobrevivência dos patogénicos no solo aumenta para baixas temperaturas, pH neutro e barreiras físicas contra radiações ultravioleta. A sua capacidade de movimentação está ligada à movimentação da água interflocular dos biossólidos e de águas que atravessam estes flocos, condicionadas pela humidade da mesma e do solo, e à capacidade de retenção do solo.⁸⁶

Deste modo, a análise puramente microbiológica dos bio sólidos como critério de aceitação da sua aplicação na agricultura revela-se limitativa ao não serem considerados outros aspectos como o tipo de solo; a cultura; o clima; possíveis alterações que possam ocorrer aos microorganismos no ambiente (decaimento, multiplicação, latência, entre outros); os meios de transmissão; a presença de hospedeiros e/ou intermediários; as formas de infecção; as doses infecciosas; a exposição e a susceptibilidade dos hospedeiros.

Em relação a este aspecto, a actual legislação em vigor é omissa, restringindo unicamente a aplicação dos bio sólidos em culturas que apresentem maior risco de infecção para o homem, como é o caso das culturas hortícolas de consumo em cru (alíneas b) e c) do nº 3 do artº 5 do Decreto-lei nº 446/91, de 22 de Novembro).¹⁰

Contudo no *Draft* onde são sugeridas as principais alterações à Directiva 86/278/CEE que deu origem ao documento interno referido anteriormente, são definidos valores-limite para os agentes patogénicos e critérios de higienização a cumprir para que os bio sólidos possam ser aplicados na agricultura.²⁸

4.3 Acção da aplicação dos bio sólidos sobre os solos

4.3.1 Reacção do solo (pH)

A acidez dos solos é resultado do desenvolvimento de processos naturais, dependentes do clima e da natureza da rocha-mãe, que podem ser agravados, ou contrariados, pela acção do homem. Em condições naturais o processo é lento e gradual. Sob cultivo, o processo é acelerado, através da remoção, pelas culturas, de cations básicos. Por outro lado, grande parte dos fertilizantes tendem a aumentar a acidez do solo, nomeadamente os que contêm azoto amoniacal ou orgânico. No quadro 4.8 apresenta-se a escala usualmente utilizada na classificação do pH (H₂O) do solo.

Quadro 4.8 - Classificação do pH (H₂O) do solo⁸⁷

pH (H ₂ O)	Designação	
≤ 4,5	Muito ácido	Ácido
4,6 – 5,5	Ácido	
5,6 – 6,5	Pouco ácido	Neutro
6,6 - 7,5	Neutro	
7,6 – 8,5	Pouco alcalino	Alcalino
8,6 – 9,5	Alcalino	
> 9,5	Muito alcalino	

A aplicação dos bio sólidos poderá exercer um efeito não negligenciável sobre o pH do solo, e como tal afectar favorável ou desfavoravelmente a sua produtividade.

Os bio sólidos resultantes de processos de estabilização de cal poderão veicular maiores ou menores quantidades de compostos básicos de cálcio, comportando-se, por isso, não apenas como correctivo orgânico mas, também, simultaneamente, como correctivos alcalinizantes.

Este tipo de bio sólidos estão particularmente indicados para solos ácidos, onde a sua aplicação em quantidades apropriadas, poderá permitir a elevação do seu pH para valores mais favoráveis às culturas, aumentando a sua produtividade ao permitir maior disponibilidade dos nutrientes minerais e uma vida microbiana do solo mais intensa. Na figura 4.3 demonstra-se o efeito do pH sobre a disponibilidade dos nutrientes minerais e a actividade dos microorganismos.

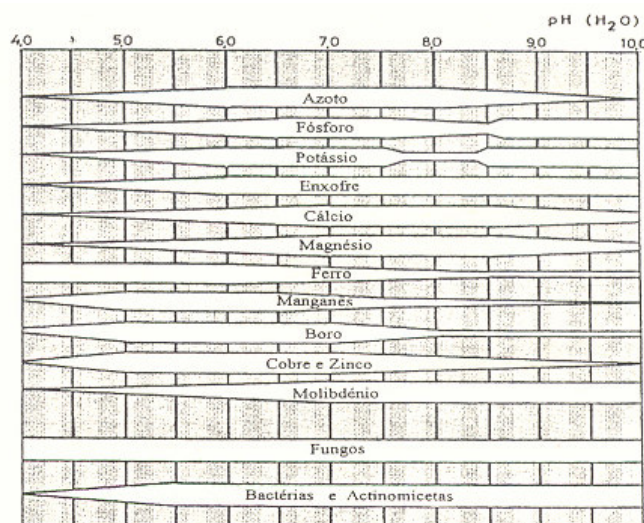


Figura 4.3 - Disponibilidade dos nutrientes e actividade dos microrganismos, segundo pH do solo (Quadro Truog)⁸⁷

Quanto maior for a largura das faixas, mais elevadas são a disponibilidade dos nutrientes ou a actividade dos microrganismos do solo. Assim, por exemplo, a disponibilidade do azoto é máxima quando o valor do pH do solo está compreendido entre 6 e 8. Abaixo ou acima destes valores decresce rapidamente.

No caso de biossólidos provenientes de lamas cuja estabilização é feita por outras vias, a sua aplicação nos solos tem um efeito acidificante devido à mineralização do azoto e do enxofre orgânicos e a sua transformação em nitratos e sulfatos através de processos microbiológicos que originam acidez. Esta acção não é, no entanto, tão acentuada como a de alguns adubos azotados amoniacais como se depreende pelos resultados que se apresentam no quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Efeito sobre o pH da camada superficial (0-30 cm) de um solo franco-limo após 7 anos de aplicação de biossólidos e de sulfato de amónio (adaptado⁸¹)

Fonte de Azoto	Azoto Total aplicado (kg/ha/ano)	pH do Solo
Nenhuma	0	5,4
Biossólidos	157-255	5,2
	325-471	5,1
Sulfato de amónio	112	5,1
	224	4,9
	336	4,7

Os solos de reacção alcalina poderão tirar benefício do efeito acidificante dos biossólidos. No caso de se realizar a sua aplicação contínua em solos ácidos, poderá levar ao aumento gradual da sua acidez que convirá corrigir com uma calagem.

Contudo, importa reter que o poder acidificante ou alcalinizante dos biossólidos sobre o solo, tenderá a atenuar devido ao poder tamponizante do solo que progressivamente vai aumentando com as sucessivas aplicações.

4.3.2 Qualidade dos solos

Por todos os motivos anteriormente referidos, pode depreender-se que os biossólidos de boa qualidade, devidamente estabilizados e higienizados e com baixos teores de metais pesados, têm efeitos muito positivos sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, desde que aplicados nas quantidades agronomicamente adequadas.

A sua aplicação melhora a resistência à erosão dos solos, a capacidade de retenção de água e de nutrientes e intensifica a actividade de micro, meso e macroorganismos vegetais e animais, tornando os solos mais produtivos e elevando os seus padrões de qualidade.

Por outro lado, as perspectivas futuras da aplicação dos bio sólidos na agricultura são bastante animadoras visto a qualidade dos bio sólidos ter vindo progressivamente a melhorar sobretudo em relação aos metais pesados cujos teores vão diminuindo cada vez mais como consequência do tratamento na origem dos efluentes industriais antes de serem lançados na rede de esgotos urbanos; e, aos teores de azoto e fósforo que têm aumentado, devido a um tratamento mais eficaz nas estações de tratamento.⁵⁶

4.4 Restrições e cuidados a adoptar na aplicação dos bio sólidos

4.4.1 Quantidades de bio sólidos a aplicar

A utilização dos bio sólidos na fertilização dos solos deverá ser racional. Deverá ter em conta as características dos solos, não só ao nível dos metais pesados, mas também e mais importante ao nível do seu estado de fertilidade, em especial a sua disponibilidade em nutrientes. Por sua vez, importa adequar as quantidades aplicadas de bio sólidos às necessidades nutricionais das culturas que ocupam ou vão ocupar os solos receptores.

A legislação em vigor, através da Portaria nº 176/96 de 4 de Outubro define as quantidades máximas a aplicar de bio sólidos em função das quantidades máximas de metais pesados que anualmente podem ser incorporadas no solo para uma base média de 10 anos.¹¹ Nos planos de fertilização, as quantidades de bio sólidos a aplicar são determinadas, regra geral, em função da quantidade de azoto, que, através deles, se pretende fornecer à cultura e ao solo.

Assim sendo, o azoto conjuntamente com os valores-limite de metais de pesados que é permitido incorporar no solo, constituem as bases para a determinação das quantidades de bio sólidos a aplicar na fertilização do solo. Aconselha-se, contudo, que esses planos de fertilização sejam complementados com estimativas das quantidades de outros elementos fertilizantes veiculados pelos bio sólidos, em especial o fósforo e o potássio.

Como já se referiu no enquadramento histórico, em Portugal, a quantidade máxima permitida (expressa em matéria seca) é, em princípio, de 6 toneladas por hectare e por ano, embora uma menor concentração de metais pesados permita aumentar esta quantidade.

No caso de terrenos situados em zonas vulneráveis à poluição das águas superficiais e subterrâneas com nitratos de origem agrícola, a quantidade anual de bio sólidos a aplicar é igualmente condicionada pelo Decreto-lei nº 235/97, de 3 de Setembro, que proíbe aplicações anuais de estrumes, chorumes, bio sólidos e outros correctivos orgânicos em quantidades que veiculem, no seu conjunto, mais de 170 kg/ha de azoto total.²⁵

4.4.2 Métodos de aplicação dos bio sólidos

Em função das características físicas dos bio sólidos, do solo e do tipo de cultura existem diferentes métodos de aplicação dos bio sólidos. A sua distribuição poderá ser feita a lanço ou por aspersão à superfície do solo, sem posterior incorporação, como é habitual em prados e pastagens ou então poderá ser feita por incorporação no solo, directamente por injeção na camada superficial, ou através de lavoura ou gradagem após a sua distribuição à superfície.

A incorporação no solo apresenta vantagens quer do ponto de vista ambiental quer do ponto de vista agronómico relativamente à sua aplicação à superfície. Se, por um lado, se reduz enormemente as perdas de azoto por volatilização sob a forma de amoníaco, por outro lado, reduz-se os problemas decorrentes dos maus cheiros.

Estes métodos poderão ser aplicados quer para bioossólidos líquidos, pastosos ou sólidos, à excepção da dispersão por aspersão, apenas aplicável para os bioossólidos líquidos.

Os bioossólidos líquidos são sobretudo aplicados à superfície ou injectados na camada superficial. Quando aplicados à superfície por aspersão deve evitar-se o uso de aspersores de alta pressão, de forma a evitar a aderência dos bioossólidos à vegetação e a formação de aerossóis que se possam propagar por vários quilómetros, com todos os inconvenientes que daí possam resultar.

Os bioossólidos sólidos e pastosos deverão ser aplicados nos solos recorrendo ao mesmo tipo de equipamento empregue para aplicação de estrumes, correctivos calcários e outros correctivos agrícolas. A aplicação deverá realizar-se em duas etapas: distribuição à superfície e a incorporação no solo através da lavoura, de uma gradagem com grades de discos ou através de outra mobilização do solo feita com alfaia apropriada.¹⁵

No caso de pastagens e forragens, a aplicação reduz-se à primeira dessas etapas – a distribuição à superfície – não havendo incorporação no solo, uma vez que tal implicaria a destruição da vegetação.

Na figura 4.4 demonstra-se a distribuição à superfície de bioossólidos.

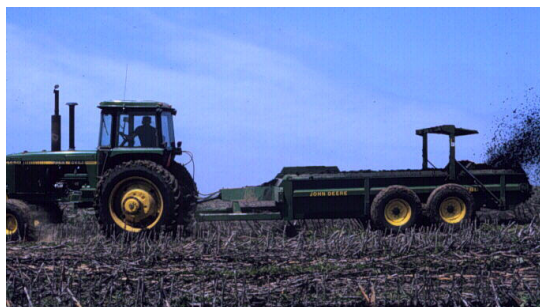


Figura 4.4 - Distribuição à superfície de bioossólidos

Independentemente do método a aplicar e do tipo de bioossólido, importa que seja realizado o mais uniformemente possível. Para tal, importa testar adequadamente se o equipamento é o mais indicado, garantindo uma distribuição por unidade de superfície homogénea.

Na prática, é extremamente complicado garantir essa uniformidade na distribuição dos bioossólidos, em especial os bioossólidos pastosos, dadas as suas características elásticas e consequentes dificuldades na sua distribuição e incorporação no solo.

As principais consequências que daí advêm é que se torna extremamente complicado garantir o cumprimento dos requisitos legais, sobretudo as quantidades a aplicar sobre os solos.

4.4.3 Épocas e oportunidades de aplicação dos bioossólidos

As melhores épocas e oportunidades de aplicação serão aquelas em que as culturas possam tirar o maior benefício do valor fertilizante dos bioossólidos e ao mesmo tempo induzam menores riscos de poluição do ar e da água e de degradação do solo.

Sendo os bioossólidos, nos seus efeitos imediatos, considerados, sobretudo um fertilizante fornecedor de azoto, em especial sob a forma orgânica, importa que sejam aplicados atempadamente para que o processo de mineralização ocorra com antecedência suficiente à

época de maior absorção das culturas, melhorando a sua eficácia ao mesmo tempo que se reduzem os riscos de poluição ambiental.

Por questões práticas, no caso das culturas anuais, a aplicação dos biofertilizantes é feita na altura das sementeiras ou plantações ou precedendo estas, aproveitando os trabalhos de mobilização do solo para preparação da “cama” para a semente.¹⁵

Em culturas perenes, como é o caso da vinha, pomares, prados permanentes ou outras, a sua aplicação deverá ser feita no fim do Inverno, precedendo o começo da rebentação ou de retoma do crescimento, altura em que se inicia a época de maior absorção de nutrientes.¹⁵

Além das orientações de carácter geral, existem uma série de imposições de natureza legal que condicionam decisivamente as épocas de aplicação dos biofertilizantes. Estas imposições definidas pelo Decreto-lei nº446/91, de 22 de Novembro visam sobretudo proteger o Homem, os animais e o ambiente de efeitos negativos de alguns poluentes eventualmente presentes nos biofertilizantes. Destacam-se as seguintes:¹⁰

- É proibido espalhar biofertilizantes sob condições climáticas adversas, designadamente em situações de alta pluviosidade.

Esta imposição visa evitar escoamentos superficiais, sobretudo no caso de biofertilizantes líquidos. Por outro lado, a circulação dos equipamentos de aplicação sobre o solo mais ou menos saturado de água, afectará gravemente a sua estrutura e provocará a sua compactação com todos os inconvenientes daí resultantes.

- É proibida a aplicação de biofertilizantes em prados ou culturas forrageiras, dentro das três semanas imediatamente anteriores à apascentação do gado ou à colheita das culturas forrageiras.

Esta imposição refere-se à aplicação de qualquer tipo de biofertilizantes em prados naturais ou artificiais, temporários ou permanentes. Além dos motivos de ordem sanitária a aplicação dos biofertilizantes em prados ou em culturas forrageiras durante o seu período de activo crescimento é totalmente desaconselhável, visto a aderência dos biofertilizantes à vegetação ir prejudicar a realização da fotossíntese, afectando negativamente a produção. Por outro lado, propicia a geração de odores e perdas de azoto por volatilização sob a forma de amoníaco.

- É proibida a aplicação de biofertilizantes em culturas hortícolas e frutícolas, com excepção das culturas de árvores de fruto, durante o período vegetativo.
- É proibida a aplicação de biofertilizantes em solos destinados a culturas hortícolas ou frutícolas que estejam normalmente em contacto directo com o solo e que sejam normalmente consumidas a cru, durante o período de 10 meses antes da colheita e durante a colheita.

Do exposto, importa destacar a importância do solo onde irão ser aplicados os biofertilizantes, apresentar um bom estado de humidade. Esse cuidado deve-se por um lado, no caso de biofertilizantes líquidos, um solo extremamente húmido não é capaz de os reter, havendo tendência para os mesmos acumularem-se em poças à superfície do terreno ou a escorrer para campos adjacentes; e, por outro lado, sobretudo se o solo for argiloso, um estado adequado de humidade é essencial para evitar que a passagem dos equipamentos de distribuição e incorporação dos biofertilizantes provoque a degradação da estrutura do solo.

Quanto mais húmido estiver o solo, mais pesados forem os veículos de distribuição e incorporação e mais fina for a textura do solo, maiores serão os danos sobre a sua estrutura. A degradação da estrutura do solo com a consequente redução da sua permeabilidade, diminui a sua capacidade de retenção dos biofertilizantes e da água das chuvas, intensificando a sua erosão e

agravando os riscos de poluição dos cursos de água. Os danos serão mínimos se a sua aplicação for feita em solos relativamente secos.¹⁵

4.4.4 Restrições e limitações legais à aplicação dos bio sólidos na agricultura

Além do decreto-lei nº 446/91 de 22 de Novembro e Portarias que o regulamentam, nº 176/96 e 177/96 de 3 de Outubro, a utilização das lamas de depuração está sujeita a disposições constantes da legislação sobre protecção da água contra a poluição com nitratos de origem agrícola (Decreto-lei nº 235/97 de 3 de Setembro), bem como a disposições regulamentares da Comunidade Europeia (CE) relativas a normas de produção e controlo da agricultura biológica em produções vegetais (Reg. CEE nº 2092/91 do Conselho, de 24 de Junho e regulamentos que o alteram: Reg. CE nº 2381/94 da Comissão, de 30 de Setembro, sobre fertilizantes autorizados e Reg. CE nº 1488/97 da Comissão, de 29 de Julho, sobre produtos fitofarmacêuticos para protecção das plantas, fertilizantes e produtos vegetais transformados).^{10-12,25,88-90}

No que concerne ao Decreto-Lei nº 446/91, para além das que já foram referidas para efeitos da qualidade das lamas, aptidão dos solos, quantidades máximas a aplicar anualmente e épocas de aplicação, este documento, impõe mais algumas restrições e limitações legais. Estabelece que só podem utilizar-se em agricultura lamas tratadas (bio sólidos) e em solos com pH (H₂O) igual ou superior a 5,5, admitindo, no entanto, que possam também utilizar-se lamas não tratadas, desde que enterradas ou injectadas no solo, e só após autorização conjunta dos serviços regionais de agricultura e do ambiente. Estes mesmos serviços poderão igualmente autorizar a aplicação de lamas tratadas em solos com pH (H₂O) inferior a 5,5. Estabelece, igualmente que a aplicação de bio sólidos deve fazer-se em solos bem desenvolvidos e profundos. Proíbe a aplicação de bio sólidos em margens de rios ou de lagos, nos termos do Dec.Lei nº 468/71, de 5 de Novembro e a sua aplicação superficial a menos de 100 m de casas individuais ou de 200 m de povoações ou de outros locais, podendo estas distâncias ser reduzidas se existir permissão escrita dos indivíduos afectados ou dos seus representantes.⁹¹ A sua aplicação deverá, também, cumprir uma distância mínima de 50 m a poços e furos exclusivamente utilizados para rega e de 100 m a captações de água para consumo humano.

Relativamente à legislação sobre protecção da água contra a poluição com nitratos de origem agrícola, a aplicação de bio sólidos em zonas vulneráveis fica obrigatoriamente dependente das disposições constantes dos programas de acção aprovados para essas zonas, nomeadamente a quantidade a aplicar anualmente de azoto total por hectare. Além destas disposições, este decreto-lei define igualmente disposições relativamente aos períodos durante os quais não é permitida a aplicação ao solo deste tipo de matérias fertilizantes; aplicação em terrenos declivosos e aplicação em solos saturados de água, inundados ou cobertos de neve.

Relativamente a regulamentação referente à agricultura biológica, a mesma define que não devem ser utilizados bio sólidos na fertilização dos terrenos submetidos a este tipo de agricultura.

4.4.5 Análises a realizar. Parâmetros obrigatórios e parâmetros complementares

Na legislação vigente, apenas são estabelecidos padrões de qualidade dos bio sólidos e dos solos receptores em função das concentrações máximas ou valores-limite dos seguintes metais pesados: cádmio (Cd), crómio (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn).

No caso da concentração de um ou vários metais pesados nos bio sólidos ultrapassar os valores-limite definidos, os bio sólidos não poderão ser utilizados na fertilização do solo, devendo ter outro destino final. No caso do solo este não poderá ser receptor de bio sólidos.

A actual legislação é contudo omissa relativamente a outros parâmetros de qualidade, designadamente no que se refere à concentração de determinados poluentes orgânicos perigosos, bem como a organismos patogénicos.

Do exposto, torna-se, pois, indispensável proceder à análise, quer dos bio sólidos, quer dos solos, para verificar se satisfazem os padrões de qualidade mencionados.

Relativamente aos bio sólidos, de acordo com a Portaria n.º 177/96 de 3 de Outubro, as análises devem contemplar obrigatoriamente os seguintes parâmetros: matéria seca; matéria orgânica; pH; azoto total, azoto nítrico e azoto amoniacal; fósforo total; e, metais pesados (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn).¹²

As análises de crómio, cobre e zinco, poderão ser eventualmente dispensadas pelas entidades competentes mencionadas na referida Portaria, caso estes não se encontrem presentes, ou apenas o estiverem em quantidades desprezáveis nas águas afluentes à ETAR.

Relativamente a frequência das análises, a referida Portaria estabelece que deverão ser executadas duas vezes por ano, uma no período Outono-Inverno e outra no período Primavera-Verão, admitindo que, no caso de os resultados das análises não diferirem significativamente no período de dois anos consecutivos, as lamas poderão ser analisadas uma vez por ano.

Por sua vez estabelece que sempre que ocorram variações significativas na qualidade das águas residuais afluentes à ETAR, ou alterações no funcionamento desta, deva ser realizada uma análise após a primeira produção de lamas.

Além dos parâmetros referidos, a literatura existente aconselha análises complementares aos seguintes parâmetros: potássio; cálcio; magnésio; enxofre; ferro; manganês; boro; molibdénio; cloro; sódio; e, condutividade para um perfeito conhecimento do valor agronómico dos bio sólidos. Contudo, a inexistência de padrões de qualidade que permitam uma interpretação segura dos valores destas determinações, não justifica a sua determinação sistemática, mas apenas em situações em que se observam efeitos tóxicos visíveis da sua aplicação sobre o solo e a cultura.

Relativamente ao solo, a Portaria determina que deverão ser analisados os seguintes parâmetros: pH; azoto; fósforo; e, metais pesados (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn).

Contudo, numa primeira aplicação de bio sólidos num determinado terreno, a análise do mesmo não se deverá limitar aos parâmetros obrigatórios mencionados, necessitando de uma análise mais detalhada, envolvendo as suas características morfológicas e a análise de outros parâmetros para uma melhor definição do seu estado de fertilidade e da sua capacidade produtiva. Entre esses parâmetros complementares destaca-se: granulometria; matéria orgânica; azoto mineral; relação C/N; capacidade de troca catiónica e bases de troca; potássio, magnésio, ferro, manganês, boro e molibdénio assimiláveis; e, quando necessário, a necessidade de cal.

Em relação à frequência das análises do solo, a Portaria determina que a mesma seja feita antes de cada aplicação dos bio sólidos. Contudo, considera-se excessivo, sobretudo quando existem garantias suficientes que não serão ultrapassados os valores-limite de metais pesados no solo, definidos na Portaria n.º 176/99 (2ª Série).¹¹

Em situações contrárias, que são situações excepcionais, e cuja primeira aplicação conduz as concentrações dos metais pesados no solo superiores ou próximas dos valores-limite impostos, este mesmo solo, desde logo, deverá ser excluído para aplicação de bio sólidos.

4.4.6 Registos de Utilização

A aplicação dos bio sólidos nos solos agrícolas reveste-se de alguns riscos, como já se referiu anteriormente. As maiores ou menores quantidades de metais pesados e de outras substâncias poluentes, capazes de acumularem-se nos solos e serem parcialmente absorvidos pelas plantas e o risco de perdas de azoto por lixiviação ou por volatilização sob a forma de amoníaco aconselha a que seja feito um controlo contínuo da sua aplicação.

Esse controlo exige que na exploração agrícola ou agro-pecuária em que se apliquem bio sólidos, haja um sistema de registo, em que, ano após ano e para cada parcela, se registem as culturas praticadas; as datas de sementeira ou plantação; e, os tipos, quantidades, datas e métodos de aplicação dos bio sólidos. Nesse registo deverá constar igualmente a composição química dos bio sólidos e dos solos receptores relativamente aos parâmetros referidos no subcapítulo anterior.

Pelo nº 2 do artigo 7º do Decreto-Lei nº 446/91, os produtores de lamas de depuração ficam obrigados a fornecer aos utilizadores, sempre que solicitadas, todas as informações relativas à composição e características dos bio sólidos.¹⁰

Segundo o Despacho Conjunto n.º 309 – G/2005, de 19 de Abril, dos Ministérios das Cidades, Administração Local, Habitação e Desenvolvimento Regional da Agricultura, Pescas e Florestas e do Ambiente e do Ordenamento do Território, a entidade que efectue qualquer operação de valorização agrícola de lamas deve prestar, semestralmente, à direcção regional informação sobre essa operação com base no modelo apresentado em anexo no referido despacho (nº 9 do referido Despacho) onde tem de declarar as datas de aplicação, o número de parcelário, a área utilizada e as culturas empregues na aplicação dos bio sólidos assim como as quantidades, origens e números dos guias de transporte.²⁴

Por sua vez, este Despacho determina que a utilização dos bio sólidos na agricultura apenas poderá realizar-se após o procedimento de licenciamento obedecer aos trâmites constantes do referido despacho, onde a entidade interessada deverá preencher o modelo de declaração de intenção de valorização agrícola de bio sólidos, onde discrimina todos os aspectos anteriormente enumerados como devendo constar do registo de utilização de bio sólidos.

4.5 Importância da aplicação dos bio sólidos nos solos portugueses

Inúmeros ensaios realizados em solos portugueses comprovam os benefícios da utilização dos bio sólidos na melhoria da fertilidade dos nossos solos e consequente aumento da produção das culturas. Destacam-se os ensaios realizados na década de noventa, sob orientação e coordenação do Departamento de Ciência do Solo, da Estação Agronómica Nacional, em diversas regiões do País e em solos de diferentes tipos, onde se demonstrou que a utilização das lamas provenientes de diversas ETAR originou a elevação dos respectivos níveis de matéria orgânica, de azoto e fósforo, sem riscos apreciáveis de poluição ambiental (solo e água subterrânea), ao mesmo tempo que se observou, na maioria das situações, acréscimos significativos de produção das culturas.⁹²

Como correctivo orgânico, existe um largo espectro de aplicação dos bio sólidos na agricultura portuguesa. Os teores de matéria orgânica são, nos solos cultivados em Portugal, geralmente baixos a médios. Apenas na área correspondente à Direcção Regional de Agricultura de Entre Douro e Minho e em áreas mais restritas de Trás-os-Montes e da Beira Litoral, normalmente associadas a zonas de altitude, mais frias, ou a sistemas culturais intensivos com frequentes aplicações de estrumes, surgem teores altos a muito altos.⁸⁷

De acordo com os resultados de um levantamento conduzido pela Comunidade Europeia em 1992 (Projecto Corine), para avaliação dos solos em risco de erosão e dos recursos em solos de

qualidade, Portugal surge como o país do Sul da Europa com mais fracos recursos em solo (66% de solos de baixa qualidade) e como aquele que apresenta maior percentagem de solos com alto risco potencial de erosão (68%).⁸⁰

Segundo dados do Relatório do Estado do Ambiente 1999, onde este aspecto foi versado, apenas 27,5 % do território continental tem quantidade de matéria orgânica considerada média ou alta como se demonstra no quadro 4.10.⁹³

Quadro 4.10 - Características dos solos incluídos na superfície agrícola portuguesa de Portugal Continental⁹³

	Alto		Médio		Baixo	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
CTC*	227.700	4,2	3.757.070	70,2	1.362.780	25,5
Matéria orgânica**	1.468.850	27,5	116.650	2,2	3.762.120	70,4
pH***	631.000	11,8	3.762.120	5,3	4.434.840	82,9

* Capacidade de troca catiónica (alto >20, médio entre 10-20, baixo <10 meq/100 g de solo)

**Matéria orgânica (alto >2%, médio entre 1%-2%, baixo <1%)

*** pH (alto >6,5; médio entre 5,5-6,5; baixo <5,5)

Nota: os valores consideram uma Superfície Agrícola Utilizada de 5.400.000 ha.

Ainda segundo o mesmo documento e como facilmente se depreende do quadro anterior, em Portugal Continental cerca de 95,7% dos solos apresentam capacidade de troca catiónica (CTC) média a baixa e 88,2 % a um pH abaixo do considerado óptimo para o crescimento da vegetação.

A fragilidade química/mineral evidente da maioria dos solos portugueses, resultante das suas características de pH e de CTC, vêm reforçar o papel preponderante da matéria orgânica na fertilidade e produtividade do solo. Como tal, é perfeitamente infundada a não utilização dos biofertilizantes como correctivo orgânico nos solos, dada a sua riqueza em matéria orgânica.

Como fornecedores de nutrientes, a sua aplicação é igualmente sustentável e aconselhável, dada a relativa pobreza de grande parte dos solos agrícolas portugueses no que respeita aos dois principais nutrientes: azoto e fósforo.

A pobreza em azoto é consequência da pobreza dos solos em matéria orgânica, que como se acaba de citar, atinge a grande maioria dos solos agrícolas em Portugal.

Relativamente ao fósforo, em mais de metade dos solos agrícolas portugueses as fertilizações a aplicar devem conter fósforo, em resultado da sua pobreza em fósforo assimilável.¹⁵ Este valor coincide com os valores referidos no Relatório de Estado do Ambiente de 1999, onde refere que dos solos nacionais cultivados apenas 57% apresentam valores de fósforo que dispensam o uso de fertilizantes.⁹³

Contudo, além da carência em azoto e fósforo, os solos portugueses carecem de outros macro e micronutrientes que os biofertilizantes contêm em maiores ou menores concentrações, e que como tal não deverão ser negligenciáveis e aproveitados através da sua utilização na agricultura.

Do exposto ressalta que a utilização dos biofertilizantes na agricultura, dado o seu valor fertilizante como veiculador de matéria orgânica e nutrientes, assume-se como uma excelente opção para corrigir os défices dos nossos solos nesses elementos, tornando-os férteis e produtivos, elevando assim, os seus padrões de qualidade.

5 Descrição do esquema de tratamento idealizado

O esquema de tratamento idealizado, apresentado na figura 5.1, visa promover a reciclagem agrícola das lamas de depuração, melhorando as suas propriedades físicas e químicas, tornando segura a sua aplicação nos solos como correctivo orgânico, melhorando as características de fertilidade física e química dos solos.

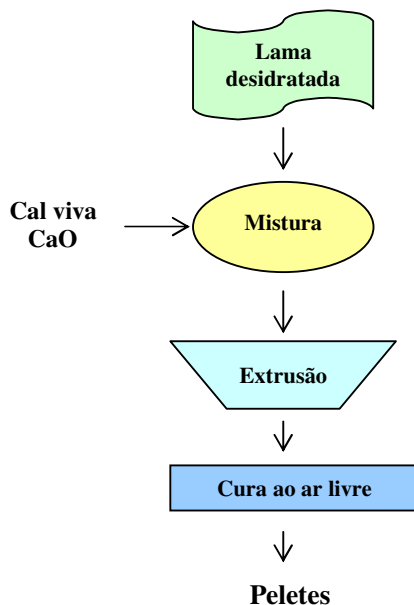


Figura 5.1 - Esquema simplificado do esquema de tratamento desenvolvido

O processo que se pretende seja barato, resume-se a uma operação de conformação das lamas, previamente desidratadas, por extrusão, antecedida por mistura com cal, adquirindo a lama forma compacta e granular. Os grânulos (ou peletes) apresentam todos os nutrientes e compostos orgânicos iniciais da lama, mas o cheiro desagradável deixa de existir e o produto torna-se estéril, tornando o seu manuseio mais seguro e facilitado.

Quando a qualidade dos peletes não o permitir, sobretudo pelo teor de metais pesados que possam veicular, a recuperação energética ou deposição segura são soluções igualmente favorecidas pelo esquema de tratamento desenvolvido, ao ser facilitado o seu manuseio e baixar os custos de transporte, visto permitir reduções de volume da ordem do $\frac{1}{4}$ do volume inicial.

Ao misturar a lama com a cal na dose adequada, além de se garantir a sua higienização e estabilização química pela elevação do pH e da temperatura, a mistura torna-se menos plástica sendo possível a sua extrusão e posterior corte do material extrudido nas dimensões pretendidas. Por mero ajuste do calibre da matriz e do mecanismo de corte, é possível obter facilmente peletes com idênticas dimensões às dos fertilizantes comerciais.

Ao ser proporcionado um tempo de cura ao ar livre durante 10-15 dias promove-se o endurecimento dos peletes, melhorando as suas características de transporte e armazenamento. O grânulo (pelete) consistente, uniforme, pouco susceptível à fractura e à aglomeração e com uma granulometria similar à dos fertilizantes, dispensa o uso de tecnologias novas para a sua dispersão nos solos.

A possibilidade de poder armazenar os peletes em segurança em sacos, permite que estes estejam disponíveis para aplicação em qualquer altura do ano, de acordo com os ciclos rotativos das culturas.

Este aspecto assume especial importância, visto a geração de lamas nas ETAR ser um processo constante, ao invés da sua aplicação nos solos que poderá ser impossibilitada por diversos motivos (indisponibilidade temporária na região de terrenos em condições de poderem receber biossólidos por estarem ocupados com culturas, criando uma situação de excesso de oferta sobre a procura; na exploração agrícola, avarias dos equipamentos de aplicação ou falta temporária de operadores desses equipamentos), obrigando ao seu armazenamento temporário, tanto nas ETAR como nas explorações agrícolas.

Quando armazenadas nas explorações agrárias, os biossólidos podem potenciar situações de poluição ambiental, nomeadamente devido à lixiviação por acção das águas das chuvas, que podem contaminar as águas superficiais e/ou subterrâneas, assim como através da geração de odores afectando populações vizinhas e ser motivo de contestação social, denegando a sua imagem de produto aplicável como correctivo dos solos.

Devido aos problemas referidos no parágrafo anterior, o agricultor é pressionado a “desembaraçar-se” rapidamente dos biossólidos, procedendo à sua aplicação sobre os solos de uma forma pouco controlada e infringindo as exigências legais nesta matéria. Por outro lado, a dificuldade no seu espalhamento/incorporação nos solos leva a que muitas das vezes sejam excedidas as doses máximas de lamas regulamentadas.

Os peletes permitem que muitos destes problemas que se colocam os agricultores sejam solucionados, ao ser possibilitado o seu armazenamento em segurança em sacos e ao facilitar a sua dispersão, dada a sua forma granular e fácil manuseio.

Cumulativamente, dado o pH elevado que os caracteriza, pela adição de cal durante o processo, os peletes podem funcionar como correctivos alcalinizantes procedendo à calagem dos solos. Este facto poderá assumir especial importância no caso dos solos das regiões do Minho e da Beira Litoral, caracteristicamente ácidos.⁸⁷

Além do mais, o esquema de tratamento delineado deixa em aberto a possibilidade de melhorar a composição das lamas, adicionando-lhes certos nutrientes em falta (do qual se destaca o potássio K, em baixos teores nas lamas de ETAR), tirando partido do processo de mistura e de extrusão.

Do exposto, as vantagens na aplicação deste esquema de tratamento às lamas geradas nas ETAR são inúmeras, visando a sua reciclagem agrícola.

Em seguida descreve-se os principais processos envolvidos no esquema idealizado: estabilização química com cal e extrusão.

5.1 Estabilização química com cal

A cal por ser um produto alcalino forte e normalmente de preço reduzido, é utilizada em diversas actividades relacionadas com a preservação das condições sanitárias e da higiene em grandes e pequenas comunidades. A alcalinidade que transmite ao meio em que é adicionada, torna-o inadequado para o crescimento e sobrevivência de grande maioria dos microorganismos.⁹⁴⁻⁹⁷

Além da vantagem referida, a estabilização com cal apresenta outras vantagens: condiciona todos os tipos de lamas; precipita metais pesados tóxicos; reduz a carência bioquímica de oxigénio e os sólidos suspensos; e, elimina odores ofensivos.

A adição da cal poderá ser feita através da forma de CaO (cal viva) ou Ca(OH)₂ (cal hidratada). A hidratação da cal viva, também conhecida como cal virgem (óxido de cálcio), resulta na cal hidratada apagada.

Por sua vez a adição da cal poderá ser realizada em várias etapas distintas do tratamento das lamas geradas numa estação de tratamento de águas residuais: antes do processo de espessamento, antes do processo de desidratação e após o processo de desidratação. Na figura 5.2 apresentam-se as diversas utilizações da cal durante o processo de tratamento das lamas de ETAR.

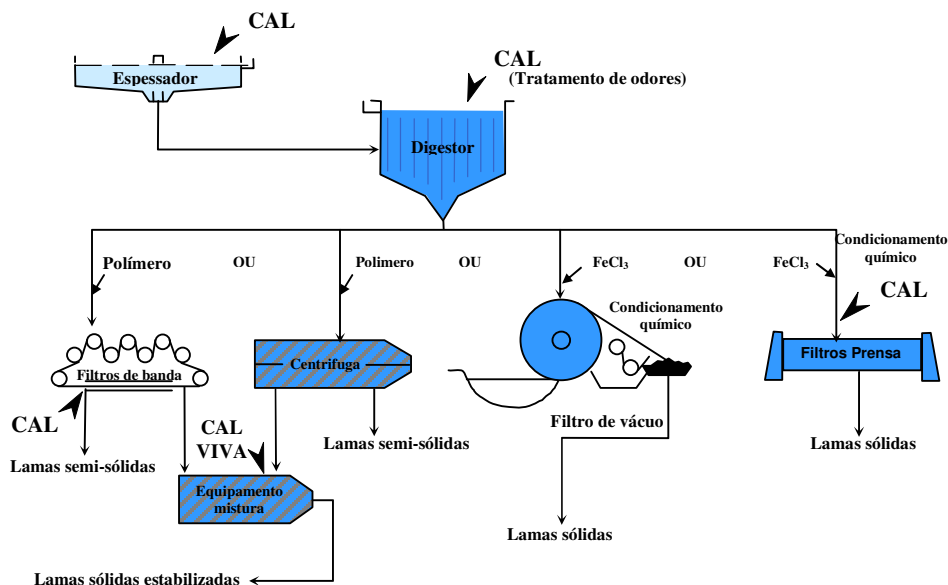


Figura 5.2 - Diferentes utilizações da cal no processo de tratamento das lamas de ETAR

Ao reagir com a água, a cal viva (CaO) origina em poucos minutos Ca(OH)₂. Por esta razão, a cal viva quando usada para tratar lamas com alto teor de humidade tem o mesmo efeito prático que a cal hidratada (Ca(OH)₂), mas implica menor dosagem de reagentes (1:1.3).^{54,94}

Como o manuseio da cal viva requer diversos cuidados, a cal apagada é usualmente utilizada em pequenas estações de tratamento, sendo a cal viva usada em grandes estações de tratamento.

A reacção de CaO com a água para originar Ca(OH)₂ (1) é uma reacção exotérmica, desenvolvendo calor, cerca de 1160 kJ/kg CaO.



Teoricamente, 350-400 kg CaO por m³ de água seriam suficientes para elevar a temperatura próximo do ponto de ebulição da água.

Os efeitos da adição de cal variam consoante o teor de matéria seca presente nas lamas, podendo dividi-los em dois tipos: efeitos sobre lamas não desidratadas e efeitos sobre lamas desidratadas.

Os efeitos da adição da cal nas lamas não desidratadas são os seguintes: melhoria das características de desidratação das lamas (em certos caso é feita a sua adição complementada com sulfato de ferro ou cloreto de ferro); o pH cresce para 11,5-12 durante pelo menos duas semanas; não se observa aumento da temperatura; e, inactivação das bactérias e vírus patogénicos, mas efeito limitado sobre os parasitas.⁹⁴

No quadro 5.1 são apresentadas algumas das doses de cal usualmente empregues para tratar lamas não desidratadas.

Quadro 5.1 - Quantidades típicas da cal adicionada para diferentes tipos de lamas líquidas (adaptado⁵⁴)

Tipo de lama	Concentração de sólidos (%)		Dose de cal aplicada (kg Ca(OH) ₂ /t m.s.)	
	Intervalo	Valor médio	Intervalo	Valor médio
Primária	3-6	4,3	60-170	120
Lamas activadas	1-1,5	1,3	260-430	300
Lamas mistas digeridas	6-7	6,5	140-250	190
Esgoto	1-4,5	2,7	90-510	200

No caso do tratamento de lamas desidratadas, a adição da cal proporciona igualmente um aumento da temperatura e um alto teor de sólidos secos devido à evaporação da água presente nas lamas. Estes efeitos melhoram as características de manuseio da lama e garantem uma desinfecção mais duradoura.

Estas diferenças foram observadas em diversos estudos onde se constatou que a adição de CaO em lamas não desidratadas não afectou nem a percentagem de matéria seca da lama, nem a temperatura desenvolvida. Pelo contrário, nas lamas desidratadas observou-se um acréscimo do teor de matéria seca de 11% e um acréscimo de temperatura, podendo atingir 9 °C. A explicação provável para este facto está associada às condições de mistura.^{96,97}

Tendo sido utilizada cal viva no esquema de tratamento desenvolvido e utilizadas lamas previamente desidratadas, passam-se a descrever os principais aspectos envolvidos e consequências deste processo específico de estabilização das lamas. Fundamentalmente referem-se factores tais como temperatura, teor de sólidos, pH, higienização da lama, manuseio da lama, características físico-químicas e disponibilidade de nutrientes para a planta, entre outros.

5.1.1 Reacções químicas

Além das formas mencionadas, o cálcio pode ser facilmente encontrado sob a forma de carbonato de cálcio (CaCO₃). Contudo a adição de CaCO₃ apresenta um efeito limitado na destruição patogénica, devido ao acréscimo reduzido do pH que atinge 8,5.⁹⁴ Por esta razão é feita a decomposição do carbonato de cálcio por acção da temperatura, na ordem dos 1100-1200 °C, originando a cal viva (CaO) segundo a seguinte reacção (2):



Se no processo industrial se fizer variar os parâmetros da reacção, de forma controlada e reprodutível, é possível obter os diferentes graus de óxido de cálcio disponíveis no mercado. Estas diferenças de qualidade da cal viva determinam o acréscimo da temperatura resultante da reacção subsequente entre CaO e água (1).

Com a adição de uma quantidade apropriada de cal viva, o pH cresce até aproximadamente 12,5. Importa, contudo, referir que caso não seja aplicada um excesso de CaO, poderá observar-se uma redução subsequente do pH, devido à reacção do Ca(OH)₂ formado com o CO₂ atmosférico ou produzido por actividade biológica, segundo as seguintes equações (3) e (4):



5.1.2 Aumento da temperatura e do teor de matéria seca

O aumento de temperatura expectável pode ser estimado teoricamente, assumindo que 100% do calor libertado (1160 kJ/kg CaO) é utilizado e considerando as capacidades caloríficas específicas da água, o valor inicial de sólidos (TS_1) e a cal:

$$\Delta T = \frac{1160 \times CaO}{4,16 \times TS_1 + 0,25 + 0,3 \times CaO} \quad (5)$$

em que:

ΔT – acréscimo da temperatura pela adição da cal viva (expresso em °C)

TS_1 – teor em sólidos da lama antes da adição da cal viva (expresso em massa kg sólidos/kg lama húmida)

CaO – Dose de cal viva adicionada à lama (expressa em massa kg CaO / kg lama seca)

Na Figura 5.3 ilustra-se o crescimento teórico da temperatura pela adição da cal viva para diferentes teores de matéria seca na lama antes da adição da cal viva.

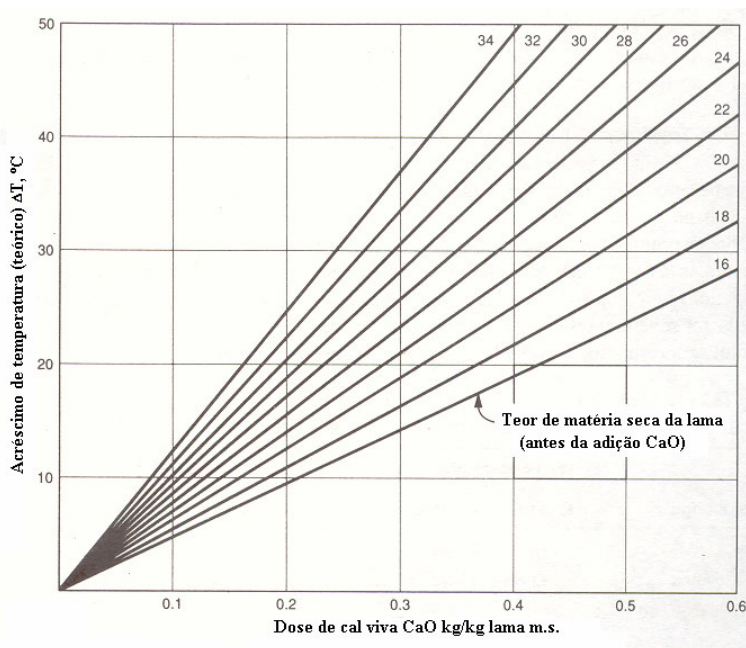


Figura 5.3 - Acréscimo teórico da temperatura pela adição de CaO para diferentes teores de matéria seca na lama (adaptado⁵⁴)

A equação (5) demonstra existir um efeito linear da temperatura pela adição de CaO. Para lamas desidratadas com teor de matéria seca dentro do intervalo 20-30% há um aumento de 3,4 e 3,9 °C, respectivamente, por cada aumento de 1 unidade percentual da dose de CaO aplicada (1% CaO = 10 kg CaO/t de lama).

Na prática verifica-se, que devido às perdas de calor e à qualidade da cal viva utilizada (graus de pureza inferiores a 100% de CaO activa), os acréscimos de temperatura observados correspondem a 60-82% dos teoricamente previstos.⁹⁴

Dependendo da qualidade da cal viva utilizada, o tempo necessário para o acréscimo da temperatura é de aproximadamente uma a duas horas após mistura.

À semelhança do acréscimo da temperatura, o efeito sobre o aumento do teor de matéria seca (sólidos) da lama é linear com a adição da cal viva. É igualmente possível obter uma expressão (6) que permita calcular o novo teor em sólidos (TS_2) teórico, considerando a reacção química (1):

$$TS_2 = \frac{TS_1(1 + CaO \times Ca(OH)_2)}{1 + TS_1 \times CaO \times Ca(OH)_2} \quad (6)$$

em que;

TS_2 – teor em sólidos da lama, após adição da cal viva (expresso em massa kg sólidos / kg lama húmida)

TS_1 – teor em sólidos da lama, antes da adição da cal viva (expresso em massa kg sólidos / kg lama húmida)

CaO – Dose de cal viva adicionada à lama (expressa em massa kg CaO / kg lama seca)

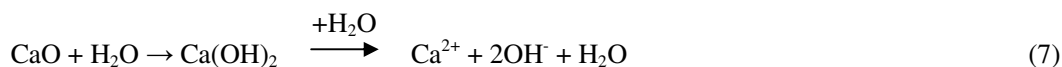
$Ca(OH)_2$ - $Ca(OH)_2$ resultante da reacção de hidratação da cal (expresa em massa kg $Ca(OH)_2$ / kg CaO adicionada à lama)

O aumento do teor de sólidos permite-nos obter uma lama mais compacta, facilitando as operações de armazenamento e manuseio. Além do aumento do teor em sólidos pela evaporação da água, pode ocorrer um endurecimento, devido à formação do $CaCO_3$ (carbonatação da cal), como resultado da reacção com o CO_2 (3).

5.1.3 Aumento e manutenção do pH

Para aumentar o pH da lama de 7 para 12,5, são necessários 1,7 mmoles de (OH^-) por grama de lama (expressa em matéria seca), de forma a neutralizar a capacidade tampão das proteínas presentes na lama.⁹⁴

Segundo (7), se 56 mg CaO produzem 2 mmoles (OH^-) , 50 mg de CaO serão necessários por grama de lama (expressa em matéria seca).



Isto significa que para uma lama com um teor de sólidos da ordem dos 20-30%, é necessário aplicar 1-1,5% CaO (em relação à matéria seca) para permitir aumentar o pH para 12,5. Para esta dose, não haverá excesso de CaO para neutralizar o CO_2 e os ácidos orgânicos que possam ser produzidos após a aplicação da cal. Como tal, é prática usual aplicarem-se doses superiores a 2% CaO.

A produção de CO_2 e consequente redução do pH deve-se, sobretudo, a actividade biológica no seio da lama. As principais razões para que essa actividade biológica ainda se verifique devem-se a uma má mistura e/ou incapacidade de neutralizar a capacidade tampão das proteínas presentes na lama. Estudos demonstram que para doses de 2% CaO, diversas regiões da lama, pelos factores referidos, permanecem instáveis com valores de pH inferiores a 12, permitindo a actividade microbiológica e a produção de CO_2 . Consequentemente, é possível observar um rápido decréscimo do pH da lama, obtendo-se um pH da ordem dos 8-9 após algumas semanas.⁹⁴

O mesmo se verifica com doses de 4% CaO, embora num tempo maior (alguns meses). Para ambas as doses referidas, poderá ocorrer o desenvolvimento de odores. Para garantir um pH estável em torno do 12,5 por longos períodos (superior a três meses), importa aplicar doses de CaO dentro do intervalo 6-10%.⁹⁴

Além do CO₂ resultante da actividade biológica ocorrida no seio da lama, importa considerar a reacção com o CO₂ atmosférico bem como o CO₂ produzido pela actividade fúngica ocorrida à superfície da lama. Contudo, um adequado armazenamento (baixa área superficial/volume, baixas temperaturas) permite reduzir substancialmente este efeito.

5.1.4 Higienização da lama

O efeito da adição da cal sobre os parâmetros bacteriológicos após mistura estão apresentados no quadro 5.2, que demonstra já ocorrer uma redução substancial dos patogénicos para uma dose de 2% de CaO (em relação à matéria seca). Contudo, o quadro 5.3 demonstra que a redução dos patogénicos para longos períodos de armazenamento requer doses superiores a 4% de CaO.

Quadro 5.2 - Influência da adição de CaO sobre diversos parâmetros bacteriológicos, 4 horas após mistura, 20°C (adaptado⁹⁴)

Dose CaO	Coliformes	Coliforme termoresistentes	<i>Streptococcus</i>	<i>Clostridium perfringens</i>	<i>Salmonella</i>
%	n°/g	n°/g	n°/g	n°/g	n°/g
0	23x10 ⁴	40x10 ³	11x10 ⁴	30x10 ³	Vestígios em 10g
2	33x10 ¹	-	<100	18x10 ²	-
4	13x10 ¹	-	<100	14x10 ²	-
6	33x10 ¹	-	<100	13x10 ²	-
8	13x10 ¹	-	<100	9x10 ²	-
10	13x10 ¹	-	<100	2x10 ²	-

Quadro 5.3 - Influência da adição de CaO e do período de armazenamento sobre diversos parâmetros bacteriológicos, 4 horas após mistura, 20°C (adaptado⁹⁴)

Dias Dose CaO	Temperatura	Coliformes		Coliformes termoresistentes		<i>Clostridium perfringens</i>				<i>Salmonella</i>	
						<i>Estado vegetativo</i>		<i>Esporos</i>			
		1	14	1	14	1	14	1	14	1	14
%	°C	n°/g lama									
0	20	10x10 ⁶	49x10 ⁴	33x10 ³	49x10 ⁴	90x10 ³	10x10 ⁴	90x10 ³	40x10 ³	+	-
2	20	33x10 ²	46	2,3	<2	30x10 ²	10x10 ²	<10x10 ¹	<10x10 ¹	-	-
4	20	70x10 ²	4,9	<2	<2	13x10 ²	6x10 ¹	100	100	-	-
6	20	70	5,0	<2	<2	12x10 ²	10x10 ¹	<10	<10	-	-
6	26	70	5,0	<2	<2	60x10 ¹	<10	<10	<10	-	-
8	20	63	<2	<2	<2	20x10 ²	100	<10	<10	-	-
8	28	26	<2	<2	<2	11x10 ²	<10	<10	<10	-	-
10	20	9	6	<2	<2	18x10 ²	<10	<10	<10	-	-
10	33	34	5	<2	<2	70x10 ¹	<10	<10	<10	-	-
15	20	33	<2	<2	<2	11x10 ¹	<10	<10	<10	-	-
15	39	11	<2	<2	<2	<10	<10	<10	<10	-	-

Do mesmo quadro 5.3 facilmente se depreende que o efeito do tempo de armazenamento e da temperatura, sob pH elevado, varia consoante o tipo de patogénico. Assim sendo, a exposição prolongada durante alguns dias (14 dias) a pH elevado, revela-se eficaz para a redução de todos os patogénicos considerados, sendo o efeito da temperatura apenas significativo para o *Clostridium perfringens* no seu estado vegetativo.⁹⁴

Estudos realizados com doses mais elevadas de CaO adicionado à lama, denotaram igualmente o efeito do tempo de armazenamento sobre a eficácia na redução dos patogénicos presentes na lama tratada com cal viva.⁹⁶

Num desses estudos testou-se a eficácia do processo de calagem das lamas sobre a redução de diversos microorganismos (*Salmonella*, *E. coli*, *Enterococci*, *Salmonella* e ovos de nemátodos (*Ascaris*, *Toxocara*, *Capillaria* e *Thichurs*) em dois tipos de lamas – lama líquida e lama sólida com diferentes quantidades de CaO adicionado (de 0 a 45% p/p de m.s. de lama) e tempos de armazenamento de 14 horas a 60 dias.⁹⁶ Na figura 5.4 apresenta-se os resultados obtidos desse estudo.

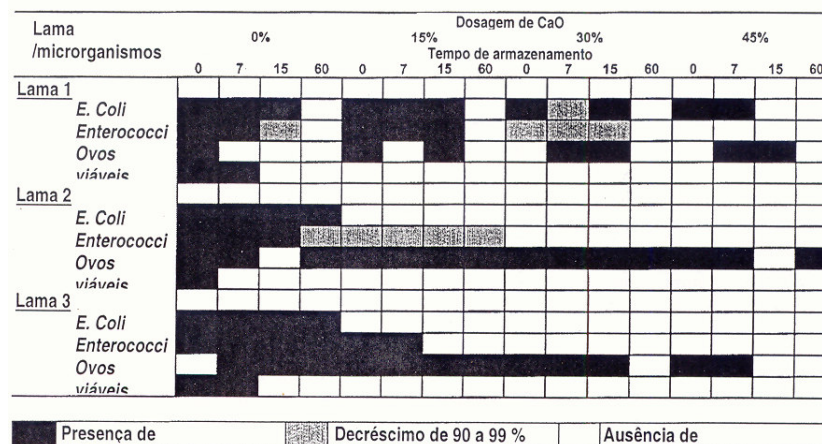


Figura 5.4 - Contaminação de três lamas sujeitas a calagem⁹⁶

Os seus autores concluíram que a eficiência do processo de calagem, em termos de eliminação de microorganismos patogénicos, depende fundamentalmente de quatro factores: pH final da lama; duração da actividade da cal; teor de matéria seca da lama; e, o tempo de armazenamento.⁹⁶

Concluiu-se igualmente que o processo de calagem quando devidamente conduzido, contribui para a melhoria da qualidade microbiológica da lama, desde que se garanta a sua manutenção nas condições seguintes: a pH 11,6 durante 60 dias ou 11,9 durante 14 dias para lamas líquidas; e a pH 11,5 durante 14 dias, pH 12 durante 7 dias ou pH 12,5 durante 24 horas para lamas sólidas.⁹⁶ Este ponto de vista é corroborado por outros investigadores que adoptando a mesma metodologia obtiveram resultados idênticos.⁹⁷

No *Draft*, onde são sugeridas as principais alterações à Directiva 86/278/CEE, o tratamento com a cal é referido, em função dos requisitos de higienização, como tratamento convencional e avançado. Assim sendo como:²⁸

Tratamento Avançado:

- deverá ser atingido pH igual ou superior a 12 e a temperatura mantida a 55°C durante pelo menos 2 horas, após contacto;
- deverá ser mantido pH igual ou superior a 12 por um período superior a três meses.

(Critérios de higienização: a lama tratada não deverá conter *Salmonella spp* em 50 g de lama (peso fresco) e o tratamento deverá garantir uma redução 6 Log₁₀ de *Escherichia coli* para valores inferiores a 5x10² CFU/g)

e como Tratamento Convencional:

- deverá ser atingido pH igual ou superior a 12 após contacto e mantido o pH 12 durante pelo menos 24 horas.

(Critério de higienização: o tratamento deverá garantir pelo menos uma redução 2 Log₁₀ de *Escherichia coli*.)

5.1.5 Outros aspectos

a) Mistura

Como já referido anteriormente, o processo de mistura influi sobre a eficácia da adição da cal na melhoria das características físico-químicas e bacteriológicas da lama. É importante garantir uma mistura adequada (que permita o contacto efectivo entre a cal e as partículas de lama mais pequenas), de modo a evitar a formação de “bolsas” de material séptico.

Na figura 5.5 apresentam-se as principais variáveis que afectam o desempenho e sucesso do processo de mistura.

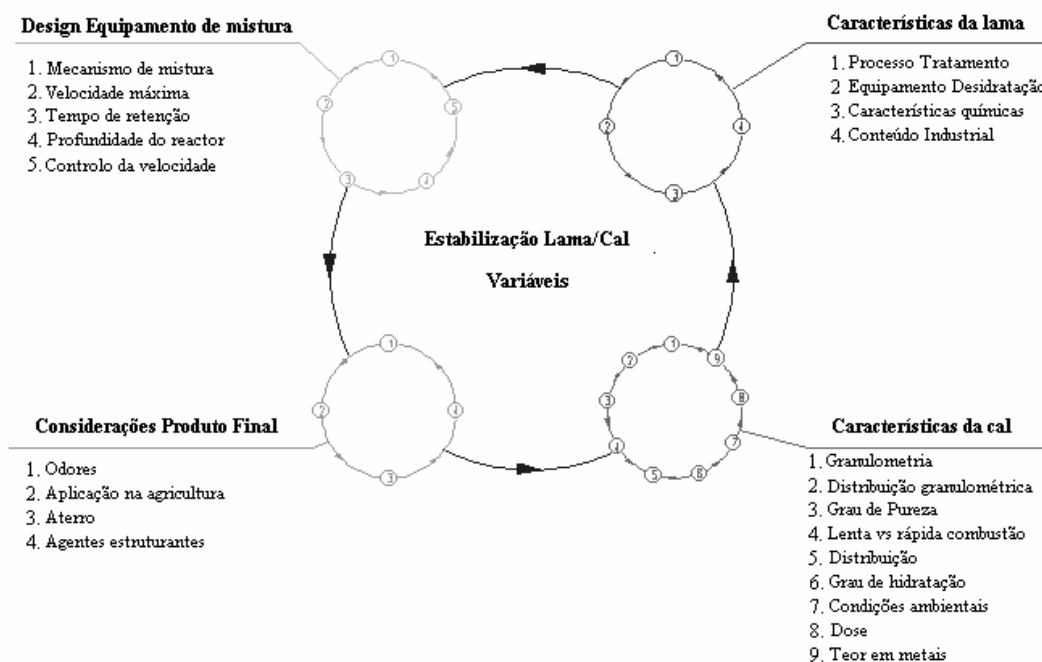


Figura 5.5 - Principais variáveis que afectam o processo de mistura da lama+cal (adaptado⁹⁸)

A alteração de uma delas provoca alterações sobre as restantes 21. É impossível quantificar todas estas variáveis, e, como tal, torna-se necessário testar e providenciar um modelo de mistura adequado que garanta uma extrema flexibilidade, de forma a compensar todas as variáveis intervenientes.⁹⁸

b) Efeito da adição da cal sobre o teor de sólidos, azoto total e amoniacal (N) e fósforo total (P) presente nas lamas após longos períodos de armazenamento

No quadro 5.4 apresentam-se as características das lamas após longos períodos de armazenamento.

Quadro 5.4 - Efeito de longos períodos de armazenamento sobre as características das lamas após tratamento com 10% de CaO (em relação à matéria seca) (adaptado⁹⁴)

Parâmetro	Unidades	Dias						
		0*	0	14	45	120	210	720
pH	g/kg	7,1	12,5	12,5	12,3	12,3	12,1	8,4
Teor em sólidos (TS)	g/kg	168	283	292	291	332	303	531
Teor em sólidos voláteis (TSVol)	g/kg	101	87	86	90	93	104	103
TSVol/TS	%	60	31	29	31	28	34	19
P total	g/kg m.s.	17	9,8	9,6	-	9,3	-	17
N total	g/kg m.s.	32	19	17	17	17	17	13
N-NH ₃	g/kg	1,5	0,27	0,21	0,27	0,31	0,18	-
Alcalinidade	mmol/kg	-	-	2390	2700	3080	2700	1340
Odores			-	-	-	-	-	-

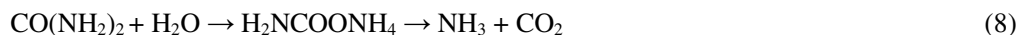
*antes da adição de CaO

Do quadro 5.4 depreende-se que após a adição da cal ocorre um aumento do teor de sólidos e do pH, pelas razões já supracitadas, e um decréscimo dos teores de sólidos voláteis, fósforo, azoto e amónia. Para períodos de armazenamento superiores a sete meses, o teor de sólidos tende a crescer significativamente, enquanto que o pH reduz ligeiramente, permanecendo superior a 12. Será apenas após um período de armazenamento de 2 anos, que se observa uma redução drástica do pH e da alcalinidade. O teor de sólidos totais cresce significativamente, ao invés da relação teor de sólidos voláteis / teor de sólidos, que decresce, devido à degradação da matéria orgânica.⁹⁴ A degradação da matéria orgânica explica igualmente o facto de se observar um acréscimo do teor de fósforo total presente na lama. Ao fim desse período a lama apresenta uma textura idêntica à madeira, com um odor ligeiro, embora não desagradável.⁹⁴

A referida redução do teor de azoto pela adição da cal foi alvo de estudo de inúmeros trabalhos dada a importância deste elemento como macronutriente na nutrição vegetal e como importante fertilizante das lamas.^{99,100}

O acréscimo da temperatura da mistura lama+cal causado pela reacção exotérmica da hidratação da cal e o aumento do pH são as principais razões apontadas para as perdas de N por volatilização sobre a forma de amoníaco (NH₃).⁹⁹

O efeito da temperatura sobre a volatilização do NH₃ deve-se ao facto de temperaturas acima de 45 °C aumentarem a cinética de várias reacções e a actividade da ureia (8).



O efeito do aumento do pH é facilmente compreendido pela reacção de protólise do NH₄⁺ com formação de NH₃ (9).



Como se demonstra pela figura 5.6, as perdas de N sob a forma de NH₃ são maiores para pH mais elevado; a partir de pH 11 praticamente toda a forma amoniacal solúvel está sob o estado gasoso.

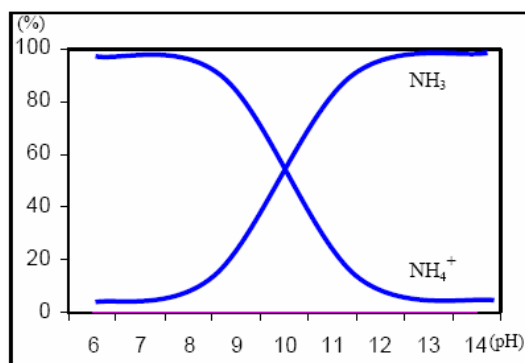


Figura 5.6 - Influência do pH na proporção de NH_4^+ e NH_3 em solução⁹⁹

Pode-se estimar as seguintes perdas percentuais do azoto amoniacal pela elevação do pH, por adição de cal:⁹⁸

- 1% Conversão do azoto amoniacal em amoníaco para pH 7,0
- 10% Conversão do azoto amoniacal em amoníaco para pH 8,4
- 50% Conversão do azoto amoniacal em amoníaco para pH 9,4
- 90% Conversão do azoto amoniacal em amoníaco para pH 10,4
- 99% Conversão do azoto amoniacal em amoníaco para pH > 11,4

Um estudo realizado em que se avaliou o efeito da adição de diferentes doses de CaO (2, 3, 5, 7, 9 e 11 % kg/kg lama fresca) em lamas de depuração, sobre os teores de azoto total presentes nas lamas 24 horas após a mistura, demonstrou os seguintes resultados, apresentados na figura 5.7.

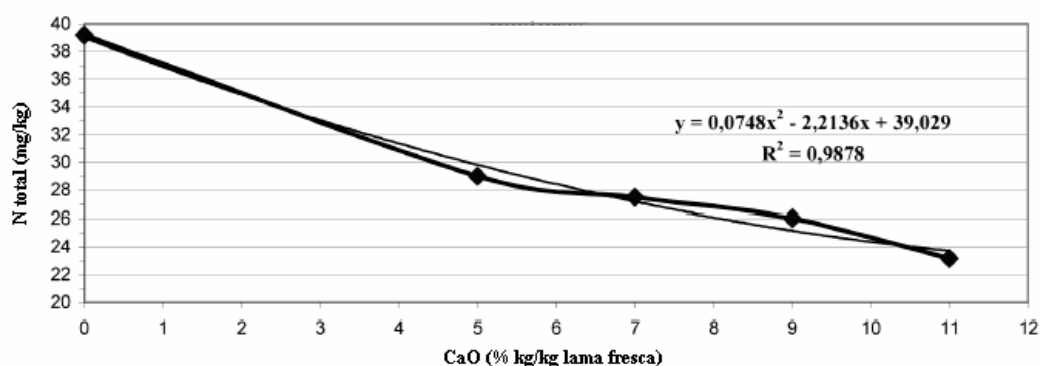


Figura 5.7 - Influência da adição de cal sobre o azoto total presente na mistura lama+cal após 24 horas (adaptado¹⁰⁰)

Pode-se concluir que a adição de cal potencia a libertação do N sob a forma de amoníaco e que há um efeito linear da dose de cal adicionada sobre o decréscimo do N total presente na lama estabilizada com cal.¹⁰⁰

Relativamente ao teor do fósforo na lama estabilizada com cal, estudos realizados referem que após a adição da cal e subida do pH, o fósforo disponível para a planta é limitado a aproximadamente 68% do total. Contudo, quando ocorre a neutralização, em condições de pH neutro (que ocorre quando a lama é introduzida no solo), o fósforo disponível aumenta para cerca de 90%.² Este ponto de vista é corroborado por outros autores.¹⁰¹

Do exposto, pode sumariar-se que a adição da cal viva à lama e consequente armazenamento a um pH elevado durante pelo menos três meses, garante um grau elevado de higienização. Esta lama pode ser utilizada como condicionador do solo (pelo teor elevado de cal) e como correctivo orgânico sem qualquer tipo de restrições, no que concerne a patogénicos. Mesmo

após armazenamentos prolongados, há um decréscimo pouco significativo dos teores de N, enquanto que a disponibilidade do fósforo para as culturas é alta (cerca de 90%) sobre condições de pH neutro, que se atingem facilmente durante a sua mistura com o solo. Por último, a adição da cal viva, ao promover o aumento do teor de matéria seca e a redução dos odores gerados, torna o seu manuseio mais facilitado e seguro.

5.2 Extrusão

Não sendo intenção descrever exaustivamente este processo e a tecnologia a ele associado, dada a enorme aplicação que tem nos dias actuais, nomeadamente nas indústrias alimentares, de plásticos, cerâmica, de fabricação de perfis de metais não ferrosos e ferrosos, irão abordar-se os principais conceitos básicos recolhidos a partir da extensa bibliografia existente sobre o processo.

O desenvolvimento da tecnologia de extrusão moderna já conta com mais de 70 anos, apesar das ideias básicas terem sido desenvolvidas em meados do século XIX. No processo de extrusão, o material alimentado ao extrusor é forçado a passar através de uma matriz (crivo+fieira), de forma similar ao aperto de um tubo de pasta de dentes. Na figura 5.8 apresenta-se um exemplo de um extrusor.

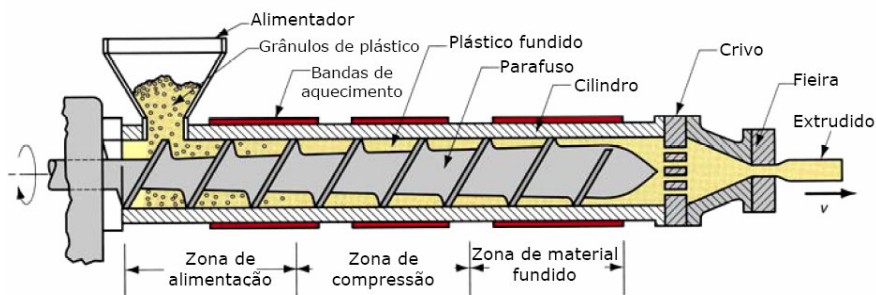


Figura 5.8 - Esquema simplificado de um extrusor utilizado no processamento de plásticos¹⁰²

Os produtos extrudidos (filetes) apresentam secção transversal constante, uma vez que a geometria da matriz permanece inalterada. Dependendo da ductilidade do material a extrudir, o processo pode ser feito a frio ou a quente, em altas temperaturas. As principais variáveis envolvidas no processo de extrusão e na qualidade do produto extrudido são: humidade, temperatura, velocidade dos parafusos, velocidade de alimentação, diâmetros da matriz, configuração dos parafusos e matéria-prima.

São diversas as vantagens associadas ao processo de extrusão, das quais podemos destacar: alta qualidade e uniformidade dos produtos; versatilidade: pode-se produzir uma ampla variedade de produtos, mudando poucos ingredientes e as condições de operação do extrusor; alta velocidade de produção; e, automação de processo, reduzindo mão-de-obra.

Dada a enorme diversidade de extrusores existentes no mercado, para inúmeros fins, são inúmeras as operações, que podem ser realizadas num extrusor: aquecimento, arrefecimento, transporte, bombagem, cozimento, mistura, homogeneização, fundição, texturização, modelagem e corte.

Estas operações desenvolvem-se em diferentes partes de um extrusor, que podemos resumir em sistema de alimentação, pré-condicionador, cilindro (corpo) do extrusor e mecanismo de desenho e corte. Relativamente ao sistema de alimentação importa que o mesmo garanta uma alimentação constante, uniforme e homogénea, a fim de proporcionar um produto extrudido de boa qualidade. Na figura 5.9 apresentam-se dois exemplos de alimentadores.

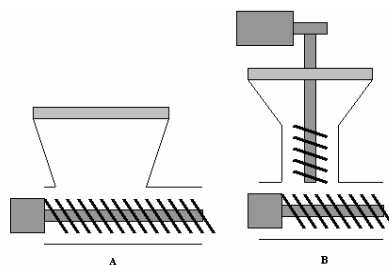


Figura 5.9 - Esquema de alimentadores horizontais (A) e verticais (B)¹⁰³

No pré-condicionamento ocorre a mistura, a hidratação, o pré-aquecimento e pré-cozimento da matéria-prima. Normalmente o pré-condicionamento, num extrusor, tem a função de aumentar o tempo de residência do produto no equipamento. É realizado à pressão atmosférica ou em câmaras pressurizadas, na qual os ingredientes crus são humedecidos e aquecidos uniformemente por contacto com vapor ou água quente.

O cilindro do extrusor é a parte principal, compreendida pelo parafuso ou parafusos extrusores, e pelo cilindro, que pode estar envolvido, permitindo a circulação de vapor de aquecimento ou água de resfriamento. O parafuso é a parte mais importante do extrusor. Existem diversos desenhos, dependendo da finalidade pretendida. Pode ser dividido em três partes: zona de alimentação, de compressão e de cocção. Na figura 5.10 apresentam-se essas zonas características do cilindro do extrusor.

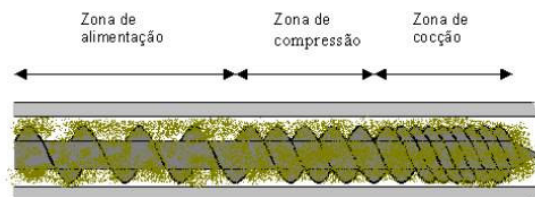


Figura 5.10 - Zonas características do cilindro do extrusor¹⁰⁴

No quadro 5.5 descreve-se resumidamente cada uma dessas zonas características do corpo do extrusor.

Quadro 5.5 - Principais zonas características do corpo do extrusor¹⁰³

Zona do corpo do extrusor	Descrição
Zona de alimentação ou de transporte de sólidos	Nesta zona o material é introduzido no cilindro de extrusão. Este material é de baixa densidade devido à sua natureza granular e à presença do ar que entra com o produto. O canal encontra-se parcialmente cheio, mas à medida que se desloca, o material é ligeiramente comprimido, expulsando o ar. Pode ser injectada água nesta zona, com o propósito de alterar a textura, desenvolver viscosidade e aumentar a transferência de calor por condução.
Zona de compressão	Nesta etapa o produto perde a sua característica granular e a densidade começa a aumentar na medida que a pressão desenvolve-se no cilindro. As partículas do material começam aglomerar-se e a formar uma massa que flui até alcançar a máxima compactação. Nesta zona a pressão ainda é baixa, o que permite, quando desejável, a injeção de vapor e água.
Zona de cocção ou de cisalhamento	É nesta zona que ocorre a texturização. A máxima compactação é obtida nesta zona e sob condições desenvolvidas de temperatura e pressão, o material é expulso através do crivo.

Relativamente ao mecanismo de desenho e corte e em função da forma e tamanho desejado, existem inúmeras possibilidades de apresentação de um produto extrudido. As principais partes de um extrusor que permitem a obtenção do produto na forma e tamanho desejado são:

- **Matriz (Crivo + Fieira):** placa instalada no final do cilindro, com um ou vários furos, com o formato desejado. Possui duas funções: dar forma desejada ao produto e restringir o escoamento, aumentando a pressão na zona de cocção;

- **Mecanismo de corte:** constituído por facas que giram a uma determinada velocidade, dependendo do tamanho desejado do produto.

5.2.1 Principais fenómenos

Tal como já fora referido são inúmeros os fenómenos que ocorrem durante o processo de extrusão, em função do fim desejado. No quadro 5.6 apresentam-se resumidamente os principais fenómenos físicos, físico-químicos e químicos e microbiológicos.

Quadro 5.6 - Principais fenómenos físicos, físico-químicos, químicos e microbiológicos que ocorrem durante o processo de extrusão¹⁰³

Principais fenómenos físicos	
Transporte	A alimentação do extrusor deve ser contínua, sem interrupções, e a vazão, uniforme. A velocidade do transporte e a vazão são determinadas pelo tipo e geometria do material, dimensões e configuração do parafuso, dimensão do cilindro extrusor, velocidade rotacional do eixo extrusor e tipo e desenho da matriz.
Mistura	Nas primeiras partes do extrusor há uma mistura intensa dos ingredientes do material, em função do fluxo e do cisalhamento produzido no interior do cilindro. Esta mistura contribui para uma adequada fusão e plasticização do material.
Cisalhamento	A intensidade do cisalhamento depende do tipo de fluxo, geometria e configuração do parafuso e do cilindro, assim como do espaço entre eles e da velocidade rotacional do parafuso.
Atrito	Provocado pelo intenso cisalhamento e deslocamento do material no interior do extrusor, o atrito ocorre não só entre o material e o equipamento, mas também entre as partículas do material. O calor decorrente desse atrito é suficiente para cozinhar e até fundir o material, sendo por isso, às vezes, necessário a refrigeração do equipamento.
Transferência de calor	A transferência de calor no material é muito complexa, pois ocorre em dois sentidos: do material para o equipamento e do equipamento para o material.
Pressão	A pressão a que se desenvolve no material é consequência de diversos factores: transporte, geometria e configuração do parafuso e do cilindro extrusor, vazão de alimentação e restrição apresentada pela matriz. Essa pressão é responsável pela evaporação flash e expansão que ocorre no material ao sair da matriz.
Moldagem e expansão	O desenho e tipo de matriz utilizada dão a forma ao produto final. A expansão e a velocidade de corte dão a configuração e tamanho ao produto.
Principais fenómenos físico-químicos	
Plasticização	O material extrudido é transformado de sólido a fluido, praticamente fundido e com características plásticas, o que contribui para sua expansão.
Desnaturação	Os materiais proteicos, devido à intensidade dos processos físicos que sofrem, são desnaturados.
Gelatinização	Os materiais sofrem uma ruptura estrutural, alterando a sua solubilidade e viscosidade, entre outras propriedades.
Aglomeração e orientação de estruturas	As partículas são aglomeradas e compactadas e, na passagem pela matriz, as estruturas são acomodadas e orientadas, permitindo a obtenção de novas estruturas pelos materiais proteicos
Principais fenómenos químicos e microbiológicos	
Redução dos factores tóxicos, antinutricionais e microorganismos	Devido ao processo de extrusão, muitas substâncias são degradadas, e o tratamento térmico por que passa o material diminui substancialmente a carga microbiana

5.2.2 Exemplo de aplicação a lamaz de ETAR

Entre diversos estudos realizados a nível internacional, destaca-se o trabalho realizado pelo Dr. George Harrison para a San Diego Region Water Reclamation Agency. Ele produziu agregado leve a partir de lamaz de depuração através de um processo designado CCBA (Coordinate Chemical Bonding Adsorption).

O processo consistia das seguintes etapas: mistura da lama com argila, alumínio e ácido poliacrílico; coagulação e floculação; decantação (lama com 45% de sólidos); mistura com argila; extrusão; corte para formação de peletes com cerca de 6 mm de diâmetro; e queima entre 1070 a 1095 °C. A figura 5.11 mostra o fluxograma deste processo.

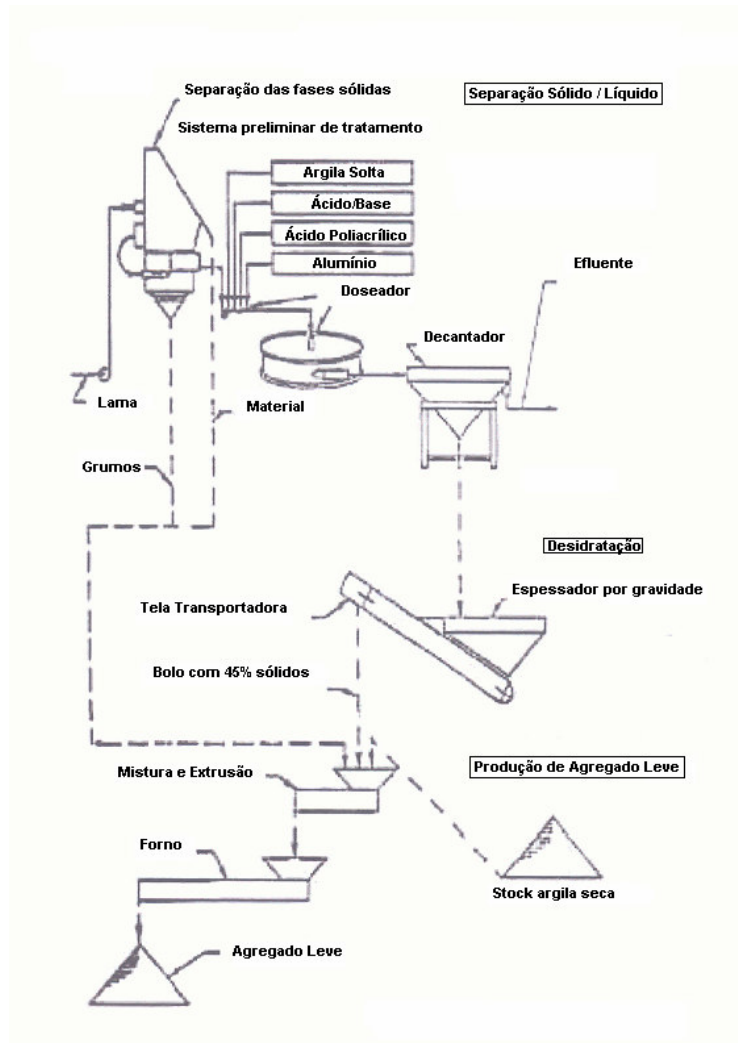


Figura 5.11 - Fluxograma do processo CCBA de fabricação de agregado leve (adaptado¹⁰⁵)

O agregado leve produzido está em conformidade com as normas da ASTM. A partir deste agregado obtiveram-se betões com valores de resistência à compressão acima de 35 MPa e blocos com mais de 6,5 MPa.¹⁰⁵ A figura 5.12 mostra esses blocos.

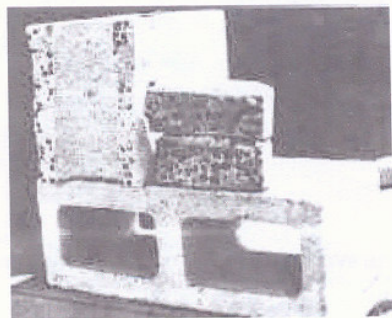


Figura 5.12 - Blocos de concreto usando agregado leve do processo CCBA¹⁰⁵

6 Metodologia experimental adoptada

O procedimento experimental adoptado para pôr em prática o esquema de tratamento idealizado para as lamas, foi dividido em cinco etapas, descritas nos seguintes subcapítulos:

- 6.1 - Processo de obtenção dos peletes;
- 6.2 - Avaliação do valor fertilizante dos peletes;
- 6.3 - Caracterização analítica dos resíduos orgânicos (lama e peletes), do material foliar e avaliação do estado de fertilidade do solo;
- 6.4 - Avaliação do grau de higienização dos peletes e da lama;
- 6.5 - Tratamento Estatístico.

As lamas utilizadas foram desidratadas por centrifugação, previamente estabilizadas por um processo de digestão anaeróbia. O ponto de recolha foi no final do processo de tratamento na ETAR, antes da expedição para aplicação nos solos como fertilizante, situação que se verifica no presente. A cal utilizada foi cal viva em pó micronizada comercializada pela empresa Calcidrata S.A.¹⁰⁶

6.1 Processo de obtenção dos peletes

Nota justificativa

Nesta primeira etapa, visou definir-se a percentagem de CaO a aplicar na mistura tendo em conta o seu efeito sobre o pH, teor em matéria seca e na melhoria das propriedades físicas dos peletes.

Como meio para avaliar as propriedades físicas dos peletes adoptou-se os critérios usualmente utilizados para avaliar as propriedades físicas dos fertilizantes granulados, onde o principal parâmetro avaliado é a dureza mecânica¹⁰⁷. Tal facto deve-se a necessidade de os mesmos apresentarem dureza mecânica suficiente para que durante o seu manuseamento não fracturem, originando partículas de tamanho não uniforme e consequentes inconvenientes com o aumento da percentagem de pó; segregação das partículas; e, presença de finos. Este último inconveniente tem como consequência o aumento do número de pontos de contacto entre as partículas, proporcionando fenómenos de agregação que dificultam o restabelecimento da sua fluidez quando da utilização.⁷⁵

A dureza mecânica dos fertilizantes granulados pode ser avaliada por diversas formas: resistência à compressão; resistência à abrasão; e, resistência ao impacto. Contudo, uma boa resistência a uma das acções mecânicas dá-nos uma indicação razoável da dureza mecânica dos fertilizantes granulados, no geral.¹⁰⁷

A resistência à compressão é o método de avaliação mais comum, devido ao facto do teste poder ser realizado fácil e rapidamente usando equipamentos de ensaio de compressão. Existem diversos métodos para avaliar a resistência à compressão dos granulados, desde o simples esmagamento entre os dedos até aos mais avançados, envolvendo equipamentos de teste de compressão.¹⁰⁷

No caso em estudo, optou-se pela avaliação da resistência a compressão dos peletes através de ensaios em equipamentos de teste de compressão.

Simultaneamente e no sentido de aferir da possibilidade de complementar o esquema de desenvolvido com um processo de secagem pós-extrusão, realizaram-se ensaios de secagem, simulando diferentes períodos de secagem e a diferente temperatura.

6.1.1 Efeito da adição de cal no pH e no teor de matéria seca da lama tratada

Para a dosagem da cal viva (CaO), expressa em % kg/kg lama fresca, a adicionar à lama para atingir o valor de pH desejado (igual ou superior a 12, segundo *Draft*)²⁸, recorreu-se a um método expedito através do qual se verificou o valor de pH decorrente da adição de cal a uma suspensão aquosa de lama+água desionizada na proporção 1:5 (p/v).

Os diferentes valores de pH correspondentes às quantidades de cal adicionadas permitiram obter uma curva relacionando a percentagem de cal adicionada com o pH medido na solução.

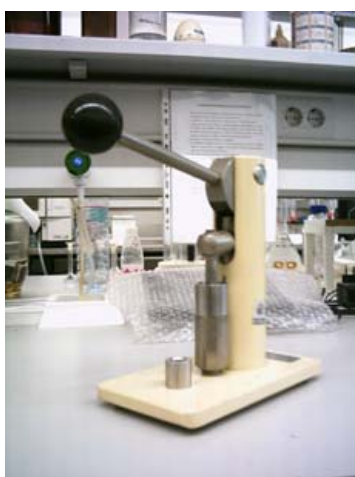
As indicações obtidas permitiram seleccionar diferentes percentagens de cal a adicionar e a misturar manualmente com a lama, à escala laboratorial, posto o que se deixou a mistura a repousar, à temperatura ambiente, durante 24 horas. Após esse período de repouso, determinou-se o teor em humidade, secando uma amostra em estufa a 103 ± 2 °C, até peso constante, bem como o valor de pH dum extracto aquoso obtido duma relação sólido: líquido 1:5 (p/v) por electrometria.

6.1.2 Efeito das diferentes doses de cal ensaiadas sobre a resistência à compressão dos peletes

Com o objectivo de avaliar o comportamento mecânico dos peletes para diferentes doses de cal adicionada realizaram-se ensaios de compressão uniaxial não confinada em pequenos provetes.

As percentagens de cal consideradas foram as seguintes: 0, 6, 8, 10 e 12% de cal em relação à lama fresca. Para cada uma das percentagens avaliaram-se os reflexos de diferentes períodos de cura (7, 14 e 28 dias). O estudo da resistência à compressão foi efectuado através de ensaios segundo NP EN 12390, adaptados para o material em questão, dada a inexistência de metodologia apropriada.¹⁰⁸ Para as diferentes proporções de cal na mistura prepararam-se 6 provetes de forma cilíndrica com 10 mm de diâmetro e 20 mm de altura, sendo o nº total de provetes de 5 (dose) x 3 (período de cura) x 6 (nº amostras) = 90.

Na figura 6.1 apresenta-se o equipamento utilizado na preparação das provetes e o equipamento usado para realizar os ensaios de compressão uniaxial não confinada (ELE® “*Multiplex 50-3 Load Frame 25-3535*”, com anel de ensaio de 4,5 kN).



(A)



(B)

Figura 6.1 - Equipamento utilizado para a preparação das provetes (A) e para a realização dos ensaios de compressão uniaxial não confinada (B)

6.1.3 Ensaios de secagem

As secagens foram realizadas sujeitando os provetes, preparados de forma análoga aos ensaios anteriores, às temperaturas de 75, 100 e 125 °C e aos tempos de secagem de 15, 30, 60 e 90 minutos em estufa. As percentagens de cal consideradas foram 4 e 12 % de cal em relação à lama fresca. Após cada um dos períodos de secagem mencionados, retiraram-se os provetes da estufa e deixaram-se arrefecer durante aproximadamente 1 hora, sendo posteriormente avaliada a sua resistência à compressão através de ensaios de compressão uniaxial, de forma similar aos ensaios descritos anteriormente. O nº total de provetes foi de 2 (dose) x 3 (temperatura) x 4 (tempos de secagem) x 6 (nº amostras) = 144.

6.1.4 Preparação dos peletes para a avaliação do seu valor fertilizante

Tendo-se adoptado 12%, como a percentagem de cal a adicionar (% massa cal relativamente à massa de lama fresca), realizou-se a sua mistura num tambor, procedendo-se posteriormente à sua extrusão. Na figura 6.2 apresenta-se o tambor e o extrusor utilizado (extrusor de pistão de bancada Macocer® Pmax. 10bar).



Figura 6.2 - Aspecto do tambor (A) e extrusor (B) utilizado no processo de preparação dos peletes

Os filetes obtidos foram cortados em peletes com aproximadamente 10 mm de diâmetro e 25 mm de comprimento, sendo posteriormente mantidos à temperatura ambiente durante aproximadamente 15 dias como se demonstra na figura 6.3.

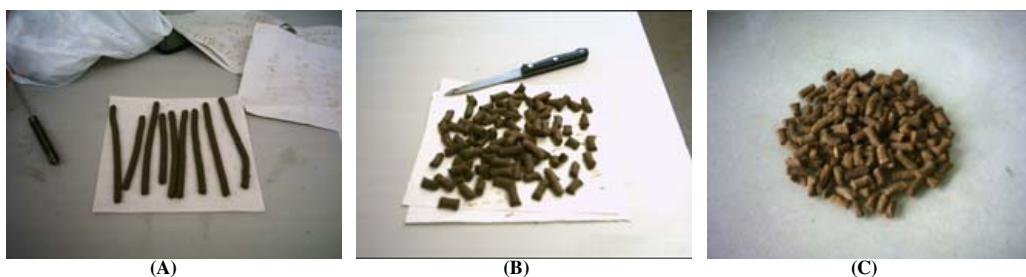


Figura 6.3 - Aspecto dos filetes obtidos por extrusão (A), dos peletes obtidos após corte (B) e dos peletes após permanência à temperatura ambiente durante 15 dias (C)

Após esse período, os peletes foram armazenados em sacos plásticos até à sua caracterização analítica e aplicação nos ensaios biológicos (aproximadamente 90 dias).

6.2 Avaliação do valor fertilizante dos peletes

Nota justificativa

A actual legislação em vigor para a aplicação de lamas ao solo utiliza como critério de avaliação a concentração de metais pesados presentes nas lamas e nos solos receptores. Contudo os

resultados da avaliação química são grandemente influenciados pela metodologia analítica aplicada e têm pouca correlação relativamente à biodisponibilidade dos metais pesados e compostos tóxicos para a fauna e flora do solo, assim como para as plantas.¹⁰⁹

Como tal no processo de avaliação do efeito tóxico e/ou valor fertilizante das lamas deverá ser igualmente avaliado o seu comportamento no solo, recorrendo a parâmetros biológicos, utilizando plantas, sementes e organismos do solo.¹¹⁰

Nessa perspectiva realizaram-se dois tipos de ensaios biológicos com plantas, de forma a avaliar o valor fertilizante dos peletes comparativamente com o da lama, e aferir possíveis efeitos tóxicos da aplicação de ambos os resíduos orgânicos.

Num primeiro ensaio pretendeu-se avaliar a fitotoxicidade de ambos os resíduos orgânicos, tendo-se utilizado a cultura da cevada (*Hordeum vulgare L.*) e adoptado a metodologia definida por Gutezeichen Kompost RAL-GZ 251 (1992) e proposta por Souteiro & Baptista, como método de referência para avaliar a fitotoxicidade dos compostos.¹¹¹

Num segundo ensaio pretendeu-se avaliar o efeito da aplicação de doses crescentes de ambos os resíduos orgânicos sobre a fertilidade física e química do solo e sobre o estado nutritivo da planta. Utilizou-se a cultura da alface (*Lactuca sativa L.*), visto que diversos estudos comprovam ser uma cultura que apresenta grande resposta à adubação azotada e a altos teores de água no solo, além de possuir grande potencial de produção com adubos orgânicos.¹¹²

6.2.1 Teste de fitotoxicidade

Para este ensaio seguiu-se a metodologia definida por Gutezeichen Kompost RAL-GZ 251 (1992) proposta por Souteiro & Baptista.¹¹¹ Utilizou-se turfa corrigida (acidez pH 6,15) como substrato testemunha e como componente das misturas com os resíduos em análise (peletes e lama). A lama e os peletes foram adicionados à turfa corrigida em proporções crescentes de 12,5, 25 e 50%.

Nos quadros 6.1, 6.2 e 6.3 demonstra-se como se determinaram as quantidades de lama e turfa a aplicar em cada tratamento.

Quadro 6.1 - Relações volume de turfa e volume de peletes/lama para cada tratamento, expressas em ml por vaso

Produto	Tratamento			
	0%	12,50%	25%	50%
(ml/vaso)				
Turfa	500	437,5	375,0	250,0
Lama/Peleles	0	62,5	125,0	250,0

Quadro 6.2 - Valores de densidade a granel^b, expressas em g/ml

Produto	Densidade a granel
	(g/ml)
Lama	0,842
Peletes	0,633

^b Determinada pela pesagem expedita de diferentes volumes de ambos os resíduos (n=6)

Quadro 6.3 - Quantidades de peletes e de lama aplicadas por vaso, expressas em g/vaso

Produto	Tratamento			
	0%	12,50%	25%	50%
	(g/vaso)			
Peletes	0	39,6	79,1	158,3
Lama	0	52,7	105,3	210,6

Foi realizada uma fertilização base com os macronutrientes N:P:K nas doses referidas no quadro 6.4, utilizando um adubo composto ternário.

Quadro 6.4 - Caracterização da adubação efectuada por vaso

Adubo utilizado (18:18:18)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Quantidade por vaso (mg)	65	65	65
Quantidade a adicionar de adubo por vaso (mg)	361		
Volume adicionado por vaso (ml)	100 ml		

Após assegurar uma boa homogeneização, as diferentes misturas foram introduzidas nos vasos e ligeiramente comprimidas e regadas até atingir a capacidade de retenção máxima do substrato.

Na superfície do substrato distribuíram-se uniformemente 50 sementes de cevada (*Hordeum vulgare* L.) que se comprimiram ligeiramente e cobriram com cerca de 40 ml de areia. Esta camada de cobertura foi bem humedecida com água, tendo-se optado por cobrir os vasos com um prato no início do ensaio. Os ensaios decorreram sob coberto, em abrigo de polietileno, sendo a perda de água regularmente compensada através da rega diária com aproximadamente 50 ml de água destilada. A figura 6.4 ilustra os diversos passos realizados para a preparação dos ensaios (no caso do tratamento com peletes).

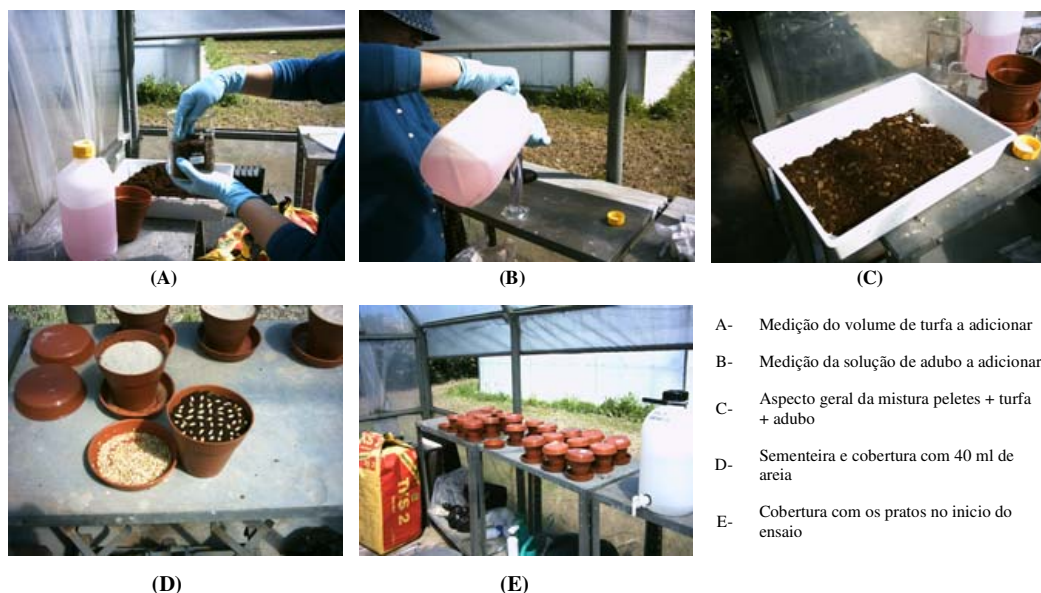


Figura 6.4 - Passos efectuados para a preparação do ensaio de fitotoxicidade

Na rega evitou-se ultrapassar a capacidade de retenção de água do substrato, e, quando tal acontecia a água drenada era recolhida nos pratos e novamente introduzida no respectivo vaso. O ensaio foi levado a cabo com três repetições para cada modalidade, à excepção da modalidade testemunha em que se realizaram 4 repetições.

O corte realizou-se quando no substrato de comparação (turfa), a maioria das primeiras folhas definitivas apresentavam maior desenvolvimento do que as alimentadas com as reservas dos cotilédones. A avaliação da eventual fitotoxicidade do produto foi efectuada com base nos valores médios de acumulação de biomassa das plantas produzidas. Os resultados foram expressos em % de produção de biomassa média nos vasos de turfas, adoptando os ensaios para avaliar a fitotoxicidade de compostos (Gutezeichen Kompost RAL-GZ 251, 1992 proposto por Souteiro & Baptista).¹¹¹

Durante o ensaio não se realizou nenhum reforço na fertilização. No final do ensaio foi comparada a biomassa produzida em todas as modalidades com a produção de biomassa da testemunha. Na interpretação dos resultados, de acordo com o método de referência adoptado (Gutezeichen Kompost RAL-GZ 251, 1992 proposto por Souteiro & Baptista), considera-se que o “composto” estava suficientemente maturado podendo ser usado como correctivo orgânico, quando a produção de biomassa na proporção 25% for igual ou superior a 90% da produção verificada na testemunha. O “composto” é passível de ser utilizado como substrato de culturas, quando a produção de biomassa para a proporção 50% for igual ou superior a 90% da verificada na testemunha. O “composto” deve ser utilizado com restrições se a biomassa da modalidade 25% for inferior a 90% da modalidade testemunha.¹¹¹

6.2.2 Teste de vegetação em vaso

A 6 quilos de um solo de textura arenosa, depois de crivado (crivo de 5 mm) e correctamente fertilizado, foram misturados peletes e lama em doses equivalentes a 0, 6, 12 e 36 t/ha m.s. No quadro 6.5 e quadro 6.6 apresentam-se a caracterização inicial do solo no início do ensaio e as quantidades de peletes e lama aplicadas para as doses testadas.

Quadro 6.5 - Caracterização inicial do solo no início do ensaio

Determinações		Resultados	Classificação e pH recomendado ¹¹³
Textura		Ligeira	
pH		7,6	6
Matéria orgânica (MO)	g.kg ⁻¹	7,0	Baixo
Azoto mineral	ppm N	14	Baixo
Fósforo	ppm P ₂ O ₅	2	Muito baixo
Potássio	ppm K ₂ O	9	Muito baixo
Cálcio	ppm Ca	68	Médio
Magnésio	ppm Mg	8	Muito baixo
Sódio	ppm Na	14	Ótimo
Condutividade eléctrica a 25 °C (CE)	mS/cm	0,45	Desprezável
Massa volúmica aparente	g/cm ³	1,53	
CTC (capacidade de troca catiónica)	cM.kg ⁻¹	32,8	
Humidade a 0,3 bar	g.kg ⁻¹	34,7	
Humidade a 15 bar	g.kg ⁻¹	28,4	

Quadro 6.6 - Quantidades de peletes e de lama aplicadas (g) em matéria fresca, por vaso de 6 kg de solo arenoso em doses equivalentes a 6, 12 e 36 t/ha m.s

Produto	Tratamento		
	6 t/ha m.s.	12 t/ha m.s.	36 t/ha m.s.
	(g/vaso)		
Peletes (P)	13,69	27,39	82,17
Lama (L)	22,15	44,29	132,87

Optou-se por um solo arenoso fundamentalmente por duas razões. A primeira relaciona-se com a necessidade de um solo que apresenta um baixo teor em matéria orgânica, a fim de se aumentar a probabilidade de ocorrer uma resposta relativamente aos parâmetros de avaliação da fertilidade física do solo à adição de doses crescentes de lama e dos peletes. A segunda razão prende-se com o facto deste tipo de solos apresentar uma baixa capacidade de troca catiónica (CTC), e, consequentemente, um menor poder de adsorção dos elementos tóxicos eventualmente presentes nos produtos, que deste modo encontrar-se-ão mais facilmente disponíveis para serem absorvidos pela cultura.¹⁰⁹

As misturas resultantes foram colocadas em vasos brancos de capacidade de 7 litros e a cultura utilizada como planta indicadora foi a alface (*Latuca sativa* L.), que foi transplantada com 3 a 4 folhas, tendo sido plantadas 3 plantas por vaso, e, posteriormente, seleccionada apenas uma.

A fertilização foi efectuada de acordo com a recomendada para a cultura da alface que se demonstra no quadro 6.7. Os tipos de adubos e respectivas doses aplicadas estão representadas no quadro 6.8.

Quadro 6.7 - Valores de referência no solo para a cultura da alface, expressos em mg/kg solo¹¹⁴

Valores de referência no solo - Cultura da Alface			
(mg/kg)			
N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg (MgO)
25	30	90	25

Quadro 6.8 - Tipos de adubos e respectivas doses de aplicação, expressas em mg/vaso

Necessidades por cada vaso		
Adubo	(mg/vaso)	+ 500 ml água destilada
Nitrato de amónia (33,5 %N)	197,0	
Fosfato monopotássico (0:52:34)	323,1	
Sulfato de Potássio	752,3	
Sulfato de Magnésio	402,4	
Total Adubo	1674,752	

Optou-se pela utilização de adubos simples, dada a maior facilidade no ajuste dos valores de nutrientes a ceder ao solo para fazer face aos valores de referência no solo da cultura da alface. Utilizou-se o nitrato de amónia (NH₄NO₃) como adubo nitroamionacal, sob a forma concentrada, doseando cerca de 33,5% de azoto na sua forma comercial, metade nítrico e metade amoniacal. O seu uso deveu-se, sobretudo, à sua elevada solubilidade e ao facto de o azoto nítrico que contém lhe conferir uma acção imediata sobre as culturas, que se mantém por um período maior ou menor, assegurada pelo azoto amoniacal que gradualmente se vai convertendo em azoto nítrico.⁷⁹

Para satisfazer a exportação dos macronutrientes primários (P e K) necessários à cultura da alface, utilizou-se o adubo composto - fosfato monopotássico (KH₂PO₄) (que contém cerca de 52% de P e 34% de K) e o adubo potássico - sulfato de potássio, (K₂SO₄) que é normalmente comercializado com um teor de potássio de cerca de 50%. A escolha deste último comparativamente com outras soluções (nomeadamente a utilização do cloreto do potássio), prendeu-se com o receio em gerar fenómenos de salinização ou teores elevados de cloretos, uma vez que a cultura da alface é extremamente sensível a estes dois factores.^{79, 87}

Relativamente ao macronutriente secundário – magnésio, ao qual a cultura da alface é extremamente sensível em situações de carência, utilizou-se o sulfato de magnésio, MgSO₄.7H₂O (também conhecido por sal de Epsom) doseando cerca de 10% de magnésio e

14% de enxofre (S). É muito solúvel em água (cerca de 60%) e usado, sobretudo, em fertirrigação.^{79,87}

A rega foi efectuada a peso, de modo a assegurar a manutenção da quantidade da humidade do solo a 80% da capacidade de campo. Na figura 6.5 demonstra-se a realização da rega a peso.



Figura 6.5 - Rega a peso

Nos quadros 6.9 e 6.10 demonstram-se as dotações de água da rega em função da fase do ciclo e do tratamento, respectivamente.

Quadro 6.9 - Dotação de água de rega para as várias fases do ciclo, expressa em g/vaso

Fase do ciclo (n° folhas adultas)	Capacidade de Campo (CC) (%)	Peso água (g)	Peso total (g)
Até 6 folhas	60%	540	6795 ≈ 6800
8-10 folhas	70%	630	6885
	80% (dias quentes)	720	6975
Fase final – Repolho	70%	630	6885
	100% (fins de semana)	900	7155

Peso do prato + vaso = 255 g

Peso de 6 kg solo à Capacidade de Campo = 900 g

Quadro 6.10 - Dotação total de água para os vários tratamentos, expressa em g/vaso

Tratamento	Fase do Ciclo		
	Até 6 folhas	8-10 folhas	11 folhas – à fase final
Testemunha, P6 e L6	6800	6885 6975*	6885 7150**
P12, L12	6850	6935 7025*	6935 7200**
P36, L36	6900	6985 7075*	6985 7250**

Adicionar: T0 e P6 e L6: 0 g; P12, L12: 50 g; P36, L36: 100 g

*80% da Capacidade de Campo (CC); ** 100% da CC

O ensaio teve a duração aproximada de um mês, durante o qual foram efectuadas observações diárias ao desenvolvimento da cultura. No final do ensaio foi apreciado o efeito da aplicação de doses crescentes dos peletes e da lama sobre a produção da biomassa da alface (peso do repolho), sobre a fertilidade física e química do solo, através da determinação do pH, matéria orgânica (MO), azoto mineral (N), azoto amoniacal (N), azoto nítrico (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), sódio (Na), magnésio (Mg), condutividade eléctrica (CE), zinco (Zn), manganês (Mn), ferro (Fe) e cobre (Cu). Para detecção de possíveis efeitos poluentes decorrentes da aplicação dos resíduos orgânicos, foi igualmente realizada a análise foliar do alface, tendo sido quantificados os seguintes parâmetros: azoto total (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) ferro (Fe), manganês (Mn), Boro (B), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Crómio (Cr), Níquel (Ni) e Cádmiio (Cd). O ensaio foi levado a cabo com 4 repetições. Na figura 6.6 demonstra-se o aspecto geral do ensaio 7 dias após a plantação.



Figura 6.6 - Aspecto geral do ensaio (7 dias após a plantação)

6.3 Caracterização analítica dos resíduos orgânicos (lama e peletes), do material foliar e avaliação do estado de fertilidade do solo.

No quadro 6.11 apresentam-se os parâmetros avaliados para os resíduos orgânicos (lama e peletes), material foliar e solo.

Quadro 6.11 - Parâmetros analisados nos resíduos orgânicos, matéria foliar e solo

Resíduos orgânicos	Material Foliar	Solo
• pH	• Azoto total (N)	• Textura
• Humidade	• Fósforo (P)	• pH
• Matéria orgânica	• Potássio (K)	• Matéria orgânica
• Carbono orgânico total	• Cálcio (Ca)	• Azoto mineral (N)
• Azoto total (N)	• Magnésio (Mg)	• Azoto nítrico (N)
• Azoto mineral (N)	• Ferro (Fe)	• Azoto amoniacal (N)
• Azoto amoniacal (N)	• Manganês (Mn)	• Fósforo (P)
• Fósforo (P)	• Boro (B)	• Potássio (K)
• Potássio (K)	• Zinco (Zn)	• Cálcio (Ca)
• Cálcio (Ca)	• Cobre (Cu)	• Magnésio (Mg)
• Magnésio (Mg)	• Cádmio (Cd)	• Sódio (Na)
• Ferro (Fe)	• Chumbo (Pb)	• Condutividade eléctrica (CE)
• Zinco (Zn)	• Crómio (Cr)	• Zinco (Zn)
• Cobre (Cu)	• Níquel (Ni)	• Cobre (Cu)
• Cádmio (Cd)		• Ferro (Fe)
• Chumbo (Pb)		• Manganês (Mn)
• Crómio (Cr)		• Massa volúmica aparente
• Níquel (Ni)		• Capacidade de Troca Catiónica (CTC)
• Mercúrio (Hg)		• Humidade a 0,3 bar
		• Humidade a 15 bar

O doseamento dos elementos minerais e metais pesados na matéria foliar e nos resíduos orgânicos foi efectuado após digestão nítrico-perclórica em forno microondas, por espectrofotometria de absorção molecular para o P (método colorimétrico do ácido ascórbico), por fotometria de chama para o K e por espectrofotometria de absorção atómica para os restantes elementos (Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Cr, Ni e Hg).¹¹⁵ No caso concreto do mercúrio, recorreu-se ao uso do gerador de vapor frio para a sua determinação por espectrofotometria de absorção atómica.

A determinação do pH por electrometria e da condutividade eléctrica dos resíduos orgânicos foi realizado sobre o extracto aquoso 1:5 (p/v).

O doseamento do carbono orgânico nos resíduos orgânicos foi efectuado utilizando o método de Tinsley.¹¹⁶ Para o doseamento do azoto total (N) nos resíduos orgânicos e no material foliar utilizou-se o método de Kjeldahl, e o método do arrastamento pelo vapor para quantificar o N amoniacal e N mineral presente nos resíduos orgânicos. Para o doseamento do boro na matéria foliar recorreu-se à análise colorimétrica com 1,1 diantrimida.¹¹⁷

A caracterização física e química do solo foi realizada no extracto aquoso 1:5 (p/v) e no doseamento dos nutrientes usou-se o método de destilação para o N mineral, potenciometria (método do eléctrodo selectivo) para doseamento do N amoniacal e N nítrico, a espectrofotometria de absorção molecular para o P, a fotometria de chama para o Na e K, a espectrofotometria de absorção atómica para Ca e Mg.^{118,119} A determinação do pH e da condutividade eléctrica realizou-se igualmente sobre o extracto aquoso na proporção 1:5 (p/v). A determinação da capacidade de retenção da água do solo foi efectuada através dos métodos da panela de pressão a 0,3 bar e da membrana de pressão a 15 bar.¹²⁰ Na determinação da densidade aparente utilizou-se o método de Keen & Raczkowski modificado.¹²¹ Na determinação das bases de troca utilizou-se o método do acetato de amónio.¹²² Para o doseamento da matéria orgânica no solo utilizou-se o método de Walkey-Black.¹²²

Na determinação dos metais extraíveis no solo (Zn, Cu, Fe e Mn), utilizou-se a solução obtida por extracção com $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ 0,5 M + CH_3COOH 0,5 M + EDTA 0,02 M (pH 4,65) e doseamento por espectrofotometria de absorção atómica.¹²³

6.4 Avaliação do grau de higienização dos peletes e da lama

As análises microbiológicas para monitorização do grau de higienização incidiram na pesquisa das bactérias *Escherichia coli* e *Salmonella sp*, consensualmente referidas como microorganismos indicadores.^{28,111,124} Na ausência de métodos específicos para os resíduos orgânicos adoptaram-se os que constam nas normas de qualidade alimentar. Para a pesquisa de *E.coli* usou-se a fermentação em tubos múltiplos, seguida da interpretação dos resultados pela tabela de McCrady; e, para a *Salmonella sp* foi realizado o pré-enriquecimento seguido do isolamento em placa e da confirmação sorológica e bioquímica.^{125,126}

6.5 Tratamento estatístico

Os resultados obtidos foram agrupados e sujeitos a tratamento estatístico utilizando o programa *SPSS 11.5 for Windows*.¹²⁷ Os dados foram analisados estatisticamente aplicando o Teste de Duncan, a um nível de significância de 0,05, para avaliar a diferença mínima significativa, na comparação entre as médias, assumindo que os dados provêm de populações com distribuições normais e com variâncias idênticas.

7 Resultados e discussão

7.1 Efeito da adição da cal viva (CaO) no pH e no teor de matéria seca da lama tratada

A figura 7.1 apresenta dois ensaios realizados com o objectivo de determinar a dose apropriada de cal a adicionar à lama, de forma a garantir a manutenção do pH igual ou superior a 12.

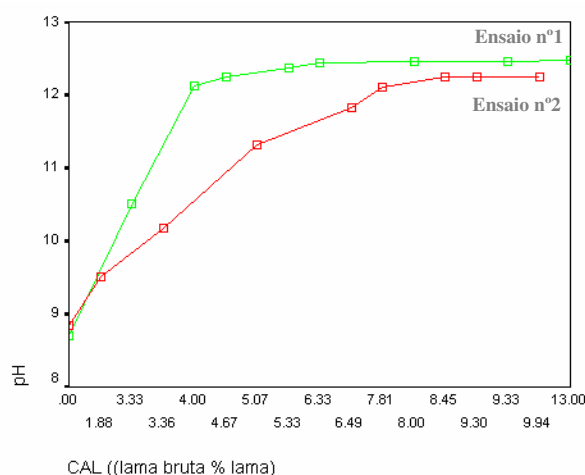


Figura 7.1 - Variação do pH em função da percentagem de cal adicionada às amostras de lama bruta

A análise dos resultados permite concluir que a adição de 8-12% cal às lamas brutas é suficiente para garantir a obtenção do pH pretendido. Observou-se igualmente que para doses superiores a 12% cal, o valor do pH manteve-se praticamente inalterado. Assim sendo elegeu-se aquele valor como o limite da dose de cal a aplicar às lamas.

No quadro 7.1 apresentam-se outros valores obtidos para teores de matéria seca e pH decorrentes de ensaios com adição de cal, após 24 horas à temperatura ambiente.

Quadro 7.1 - Teor de matéria seca e pH da lama e da lama tratada com cal após 24 horas à temperatura ambiente ([média+desvio padrão(DP)+coeficiente de variação de Pearson (CVP) (n=3)]). Os resultados seguidos da mesma letra minúscula não diferem significativamente ($p < 0,05$) de acordo com o teste de Duncan

Material	Teor de matéria seca					pH				
	(% m.s.)									
	Média	DP	CVP(%)			Média	DP	CVP(%)		
Lama desidratada	28,23	±	1,12	3,98	a	8,47	±	0,05	0,59	a
+ 2 % CaO	32,90	±	1,30	3,95	b	9,24	±	0,02	0,22	b
+ 4% CaO	34,57	±	1,35	3,91	b	11,66	±	0,15	1,24	c
+ 8% CaO	36,97	±	0,81	2,19	c	12,43	±	0,13	1,05	d
+12 % CaO	38,90	±	0,87	2,23	c	12,49	±	0,01	0,08	d
Total (n=15)	34,31	±	3,91	11,39		10,86	±	1,74	16,02	

Os resultados obtidos permitem concluir haver variações significativas do teor de matéria seca pela adição da cal, comparativamente com a lama sem adição de cal, como seria de esperar. Relativamente ao efeito da dose de cal adicionada, verificou-se haver diferenças significativas pela aplicação de doses mais elevadas (8% e 12%) comparativamente com as doses mais baixas de CaO (2% e 4%). Quanto ao pH, os valores obtidos reforçam as conclusões anteriormente obtidas de que 8-12% de cal garantem a manutenção do pH igual ou superior a 12 após 24 horas.²⁸

7.2 Efeito das diferentes doses de cal ensaiadas sobre a resistência à compressão dos peletes

No quadro 7.2 são apresentados os valores obtidos para os ensaios de compressão realizados ao fim dos seguintes períodos de cura: 7, 14 e 28 dias.

Quadro 7.2 - Resistência à compressão para diferentes períodos de cura (7, 14 e 28 dias) expressa em N/mm² para a lama e para as diferentes misturas lama+ cal (valores [média+desvio padrão (n=6)]). Os resultados seguidos da mesma letra minúscula (efeito da dose) e letra maiúscula (efeito do período) não diferem significativamente (p<0,05) de acordo com o teste de Duncan

Material	Período											
	Resistência à compressão (N/mm ²)											
	7 dias				14 dias				28 dias			
Lama (0% CaO)	A2,75	±	0,83	a	B 7,05	±	1,77	a	C 15,36	±	2,61	a
+ 6% CaO	(a)				B 2,41	±	1,14	b	C 14,92	±	1,09	a
+ 8% CaO	A 0,41	±	0,17	b	B 3,33	±	1,56	bc	C 14,56	±	0,96	a
+ 10% CaO	A 0,41	±	0,14	b	B 4,61	±	1,20	cd	C 14,39	±	1,01	a
+12% CaO	A 0,61	±	0,13	b	B 5,21	±	0,97	d	C 14,71	±	0,96	a

(a) não foi possível determinar o valor da resistência à compressão, visto os peletes para esta dose e tempo de cura manterem o seu aspecto plástico (inferior ao limite de detecção < 0,01 kN)

O valor médio da resistência à compressão dos peletes ao fim de 28 dias, independentemente da percentagem de cal adicionada, foi sempre superior a 10 N/mm², valor médio para fertilizantes granulados, permitindo antever o seu fácil manuseio, bem como o seu acondicionamento sem risco de esboroamento ou geração de pó.¹⁰⁷

Para qualquer dose de cal testada, facilmente se depreende o ganho da resistência à compressão que ocorre para períodos mais longos de cura, sendo o efeito significativo para os períodos em causa.

Relativamente ao efeito da dose, verificaram-se diferenças significativas entre a lama e as misturas de lama+cal para os períodos de cura 7 e 14 dias, tendo a lama obtido os valores de resistência à compressão mais elevados comparativamente com as diferentes misturas com cal. A adição de cal às lamas nas percentagens testadas não provoca diferenças significativas de resistência à compressão das misturas ao longo dos períodos de 7, 14 e 28 dias.

No período de cura de 28 dias, não se observaram diferenças significativas entre a resistência da lama e a das diferentes misturas testadas.

A figura 7.2 traduz graficamente o efeito da adição da cal sobre a resistência à compressão medida para os diferentes períodos de cura considerados.

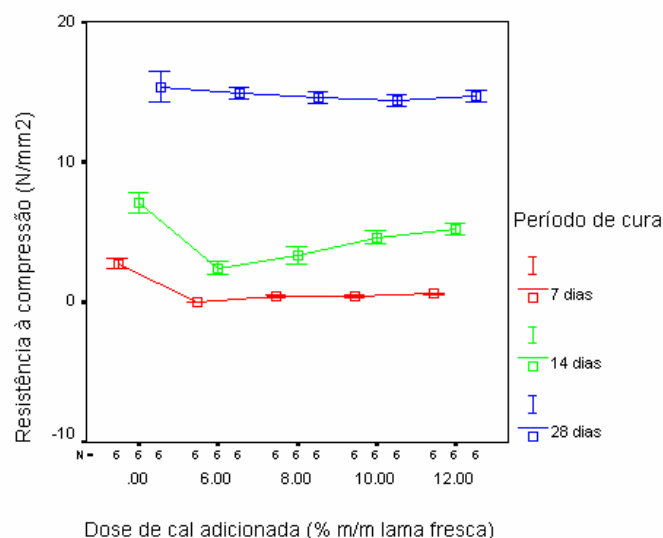


Figura 7.2 - Variação da resistência a compressão em função da dose aplicada e dos períodos de cura. As barras verticais indicam o desvio padrão

No quadro 7.3 apresenta-se o estudo das correlações entre as variáveis em jogo: dose, tempo de cura e resistência à compressão.

Quadro 7.3 - Análise de correlação linear entre as variáveis: dose, tempo de cura e força de compressão

Variável		Período de Cura	Dose Cal	Resistência à compressão
Período de Cura	Coeficiente (r) correlação Pearson	1	.000	.965(**)
	Nível de significância (t-Student)	.	1.000	.000
	Graus de liberdade (N)	90	90	90
Dose de Cal	Coeficiente (r) correlação Pearson	.000	1	-.091
	Nível de significância (t-Student)	1.000	.	.392
	Graus de liberdade (N)	90	90	90
Resistência à Compressão	Coeficiente (r) correlação Pearson	.965(**)	-.091	1
	Nível de Significância (t-Student)	.000	.392	.
	Graus de liberdade (N)	90	90	90

** Significativo a 1% (t-Student).

Este estudo reforça existir uma correlação positiva entre o tempo de cura e a tensão de compressão até à rotura e não existir correlação entre o tempo de cura e a dose de cal aplicada.

A principal razão que explica o endurecimento gradativo do peletes após um certo período de cura é o facto de, em contacto com o ar, perder água e sofrer endurecimento pela absorção do CO₂ atmosférico (como se referiu em 5.1.2) que reagindo provoca a carbonatação da cal (1). Este fenómeno é lento e processa-se da superfície para o interior da mistura.



Neste caso pressupõe-se que o endurecimento seja favorecido pela espessura reduzida dos peletes e pelo aumento da superfície de contacto. Além disso, como o processo de carbonatação ocorre da superfície para o interior da mistura, prevê-se que a maior quantidade de carbonato formado esteja na camada superficial, tornando essa camada menos porosa que o seu interior.

Importa referir que se observou o aparecimento de bolores, assim como a manutenção de um cheiro nauseabundo na lama (0% CaO) e nas misturas com 6% e 8% de cal.

7.3 Ensaios de secagem

Os resultados obtidos para os ensaios de secagem para diferentes percentagens de cal e temperatura, revelaram-se algo inconclusivos, dada a impossibilidade de avaliar a resistência à compressão dos diferentes provetes de teste, quer por não adquirirem consistência suficiente, permanecendo com um comportamento plástico, quer por fragmentarem.

Para a temperatura de secagem de 75 °C, nas percentagens ensaiadas (4 e 12%) e nos períodos de secagem testados (15, 30, 60 e 90 minutos), não se observou qualquer ganho de consistência, tendo os peletes mantido características plásticas, tornando impossível avaliar a sua resistência à compressão (inferior a 0,01 kN, valor mínimo detectável).

Para a temperatura de secagem de 100 °C e para 4% de cal adicionada os peletes permaneceram plásticos para períodos de secagem curtos (15 e 30 minutos). Para os outros períodos de secagem ensaiados de 60 e 90 minutos, observou-se ainda aspecto plástico mas com fragmentação dos peletes.

Para esta temperatura, no caso da percentagem de cal mais elevada (12%), embora não tenha sido observável a fragmentação dos peletes, estes mantiveram o seu aspecto plástico e deformabilidade, impossibilitando a execução dos ensaios de compressão.

Para a temperatura de 125 °C, observou-se que os peletes fragmentaram para períodos de tempo de secagem mais curtos (30 minutos) e para 4% de cal adicionada. Para o período de tempo mais curto (15 minutos) os peletes permanecem com comportamento plástico.

Com percentagens de cal mais elevadas, apenas foi possível avaliar a resistência à compressão dos peletes para o período de secagem de 30 minutos, visto que nos restantes casos (60 e 90 minutos) fragmentaram ou permaneceram com aspecto pouco consistente (15 minutos). Contudo, os resultados obtidos para os ensaios de compressão (média=0,02 kN, n=6) sugerem um ganho pouco significativo de resistência com o tratamento (T=125 °C, 30 minutos).

Este aspecto do efeito de uma secagem após o processo de extrusão deveria, provavelmente, ser melhor avaliado em estudos posteriores.

7.4 Caracterização analítica da lama e dos peletes

Foram verificadas variações significativas nas concentrações, em função do tratamento a que a lama foi sujeita, em todos os parâmetros analisados, atestados pelo Teste de Duncan a 5% de probabilidade como se demonstra no quadro 7.4.

Quadro 7.4 - Caracterização analítica da lama e dos peletes (valores [média+desvio padrão (DP) + coeficiente de variação de Pearson (CVP) (n=3)] expressos em função da matéria seca a 105°C). Para cada parâmetro, resultados seguidos da mesma letra maiúscula não diferem significativamente (p <0,05) de acordo com o teste de Duncan

Parâmetros		Lama			Peletes		
		Média	DP	CVP (%)	Média	DP	CVP (%)
		(n=3)			(n=3)		
pH (H ₂ O)		A 6,20	± 0,06	0,94	B 12,27	± 0,03	0,22
Humidade	g.kg ⁻¹	A 575,0	± 25,0	4,4	B 312,7	± 24,9	8,0
Matéria orgânica	g.kg ⁻¹	A 532,7	± 15,3	2,9	B 243,1	± 9,1	3,8
Carbono orgânico total	g.kg ⁻¹	A 309,0	± 8,9	2,9	B 141,0	± 5,3	3,8
Azoto Total	g.kg ⁻¹	A 22,9	± 1,0	4,4	B 16,7	± 0,4	2,3
Azoto mineral	g.kg ⁻¹	A 2,33	± 0,16	7,05	B 0,28	± 0,01	2,5
Azoto amoniacal	mg.kg ⁻¹	A 212,2	± 18,5	8,7	B 184,1	± 19,1	10,4
Razão C/N		A 13,5	± 0,6	4,7	B 8,5	± 0,4	5,1
Fósforo (P)	g.kg ⁻¹	A 58,9	± 3,6	6,2	B 16,6	± 1,0	6,2
Potássio (K)	g.kg ⁻¹	A 1,04	± 0,14	13,6	B 0,32	± 0,06	19,0
Cálcio (Ca)	g.kg ⁻¹	A 37,4	± 0,8	2	B 153,3	± 4,7	3
Magnésio (Mg)	g.kg ⁻¹	A 32,2	± 0,6	1,7	B 22,7	± 0,8	3,5
Razão Ca/Mg		A 11,6	± 0,2	1,6	B 67,5	± 4,4	6,4
Ferro (Fe)	mg.kg ⁻¹	A 7625	± 127	2	B 3789	± 1	0
Manganês (Mn)	mg.kg ⁻¹	A 145,9	± 4,0	2,8	B 91,1	± 6,4	7,1
Condutividade eléctrica (CE)	ms/cm	A 3,2	± 0,1	3,2	B 27,6	± 0,2	0,9

A adição de CaO à lama conduz a uma subida significativa do pH, o que seria de esperar face ao forte valor neutralizante que apresenta a cal viva (CaO) e que se demonstra no quadro 7.5.

Quadro 7.5 - Valor neutralizante dos principais compostos presentes nos correctivos minerais alcalinizantes usados na correcção da acidez dos solos e quantidades que corrigem a mesma quantidade de ácidos que uma tonelada de CaCO₃¹²⁸

Compostos	Fórmula	Valor neutralizante	Quantidade equivalente (kg)
Carbonato de cálcio	CaCO ₃	100	1000
Carbonato de magnésio	MgCO ₃	119	840
Hidróxido de cálcio	Ca(OH) ₂	136	741
Hidróxido de magnésio	Mg(OH) ₂	172	581
Óxido de cálcio	CaO	179	559
Óxido de Magnésio	MgO	248	403

O valor neutralizante (VN) é expresso pelo número de partes em peso de carbonato de cálcio puro que tem o mesmo efeito neutralizante que 100 partes em peso desse correctivo.

Este forte poder neutralizante da cal viva (CaO) deve-se à sua acção muito rápida, quando em contacto com a água, pois converte-se rapidamente em cal apagada Ca(OH)₂, que por sua vez origina OH⁻ em solução, fazendo elevar o pH (equação (7) referida em 5.1.3).

É possível observar que ao contrário do pH dos peletes, após armazenamento durante 90 dias, o pH da lama decresceu 2,3 unidades comparativamente ao pH inicial determinado em 7.1.

A observação do quadro 7.4 revela que a adição da cal viva à lama aumentando o pH ocasiona uma redução substancial dos teores em azoto total, azoto amoniacal e azoto mineral. As

principais razões para estes valores são as perdas de N por volatilização de amoníaco e as menores taxas de nitrificação (equação (9) referida em 5.1.5b).

Outra razão influente é o aumento da temperatura causada pela reacção exotérmica da hidratação da cal, que aumenta as perdas de NH_3 , acelerando a cinética de várias reacções e a actividade da ureia.⁹⁹

A diminuição dos teores de azoto sob as diversas formas, sobretudo sobre a forma mineral, traduz-se numa perda do valor fertilizante dos peletes obtidos pelo processo testado.⁷⁹

Relativamente aos teores de matéria orgânica e dos restantes macro e micronutrientes, à excepção do cálcio, verificou-se um decréscimo significativo dos seus teores nos peletes comparativamente com os da lama. A principal razão apontada é o efeito de diluição devida à adição da cal. No caso da matéria orgânica, o seu decréscimo poderá dever-se, igualmente, à perda de orgânicos voláteis para a atmosfera pelo aumento da temperatura e ao processo de mineralização da matéria orgânica potenciado pelo aumento do pH.⁷⁹ O aumento do teor de cálcio nos peletes é facilmente justificável pela adição da cal viva, maioritariamente constituída por CaO .

Os resultados também mostram o aumento significativo da condutividade dos peletes relativamente à lama que se relaciona com o acréscimo de cálcio naqueles.

Embora a condutividade/salinidade pudesse ser um factor limitante na sua utilização como fertilizante no solo como se demonstra no quadro 7.6, a sua dissolução lenta, como se observou nos ensaios biológicos posteriores, não o revelou.

Quadro 7.6 - Tolerância de algumas culturas à salinidade do solo⁷⁹

Culturas sensíveis (1 – 3 mS/cm)	Culturas tolerantes (3 -6 mS/cm)	Culturas muito tolerantes (6 – 12 mS/cm)
Alface	Batateira	Algodão
Abóbora	Bróculos	Beterraba sacarina
Ameixoeira	Cártamo	Cevada
Amendoeira	Cebola	Colza
	Erva do Sudão	Espargo
Bersim	Fava	Espinafre
Cenoura		Festuca
Citrinos	Figueira	
Couve		
Damasqueiro	Lolium	
Feijoeiro	Melão	
	Milho	
Linho	Oliveira	
Luzerna	Soja	
Macieira	Sorgo	
Morangueiro	Tomateiro	
Pessegueiro	Trigo	
Trevos	Videira	

Quanto aos teores em metais pesados observados, quer nos peletes, quer nas lamas que se apresentam no quadro 7.7, verifica-se não imporem qualquer restrição à sua aplicação, face à actual legislação em vigor.¹¹

Quadro 7.7 - Caracterização analítica (metais pesados) da lama e dos peletes (valores [média + desvio padrão (DP) + coeficiente de variação de Pearson (CVP) (n=3)], expressos em mg.kg⁻¹ na matéria seca a 105°C)^{11,28}

Parâmetros	3 rd Draft	Portaria 176/96	Lama				Peletes			
			Média	DP	CVP (%)		Média	DP	CVP (%)	
			(n=3)				(n=3)			
Cobre (Cu)	1000	1000	A 309,3	±	3,5	1,1	B 132,5	±	7,1	5,8
Zinco (Zn)	2500	2500	A 1326,7	±	71,3	5,4	B 524,2	±	86,1	16,4
Cádmio (Cd)	10	20	(a)				(a)			
Chumbo (Pb)	750	750	A 135,1	±	2,7	2,0	B 97,5	±	4,3	4,4
Crómio (Cr)	1000	1000	A 90,7	±	5,4	5,9	B 14,6	±	1,2	7,9
Níquel (Ni)	300	300	A 39,4	±	0,1	0,2	B 19,0	±	1,5	8,1
Mercúrio (Hg)	10	16	A 12,0	±	0,4	3,4	B 5,3	±	0,7	13,3

(a) valor inferior ao limite de detecção do elemento pelo espectrofotómetro de absorção atómica (<0,032 mg/l)

Contudo, são de destacar os valores elevados de zinco e mercúrio das lamas, resultantes da forte componente industrial na composição do efluente à entrada da estação de tratamento. As diferenças significativas obtidas entre os peletes e a lama dever-se-ão, concerteza, ao efeito da diluição trazido pela adição da cal viva.

Embora a actual legislação permita a aplicação da lama com as características referidas, o teor em mercúrio que veicula é superior ao proposto no *Draft*, desaconselhando a valorização agrícola como destino final.²⁸

A título meramente indicativo apresentam-se no quadro 7.8 as principais características fertilizantes de alguns correctivos orgânicos aplicados usualmente nos solos, fazendo-se a sua comparação com os peletes e a lama.

Quadro 7.8 - Principais aspectos fertilizantes de alguns correctivos orgânicos, em comparação com os valores obtidos para os peletes e para a lama analisada (valores expressos em % matéria seca)

Parâmetros	Estrume de aviário ⁷⁹	Chorume de suinicultura ⁷⁹	Bagaços de uva ⁷⁹	Bagaços de azeitona ⁷⁹	Lamas celulósicas compostadas ⁷⁹	Compostos de RSU ²⁷	Peletes	Lama
(expresso em % m.s.)								
Matéria orgânica	87,3	85,3	93,8	86,0	32,8	53,2	24,3	53,3
Azoto (N)	3,90	5,00	2,71	0,88	1,07	1,80	1,67	2,29
Fósforo (P ₂ O ₅)	2,30	4,70	0,67	0,17	2,00	1,40	3,85	13,5
Potássio (K ₂ O)	2,60	1,60	2,46	0,74	2,51	1,60	0,08	0,25
Cálcio (Ca)	2,10	5,30	0,44	0,36	6,64	10,6	15,3	3,74
Magnésio (Mg)	0,60	0,80	0,08	0,03	1,13	1,30	2,27	3,22
Razão C/N	13	10	20,15	56,7	18	17,1	8,5	13,5

Nota: A composição dos correctivos orgânicos são bastantes variáveis nomeadamente os compostos e as lamas. Os resultados pretendem ter apenas valor meramente indicativo.

Os peletes apresentam percentagens mais baixas de matéria orgânica e potássio, podendo esta carência em potássio exigir uma adubação potássica complementar no caso da sua aplicação na agricultura. No caso da lama, salientam-se as percentagens elevadas de fósforo.

Em relação aos restantes parâmetros fertilizantes, são também de referir os maiores teores de cálcio dos peletes, bem como de magnésio, este quer na lama, quer nos peletes, em resultado da forte componente industrial de origem destas lamas.

7.5 Avaliação do grau de higienização

A figura 7.3 e o quadro 7.9 dizem respeito aos ensaios para análise bacteriológica dos peletes e lamas. Os resultados obtidos demonstram a inexistência de *Salmonella* e *E.coli* em ambas as amostras analisadas, pelo que ambos se encontram higienizados.

Estes resultados são os esperados, pois a lama sofreu um processo de estabilização (digestão anaeróbia) e na obtenção dos peletes houve uma elevação da temperatura e de pH suficientes para inactivar os microorganismos patogénicos que pudessem estar presentes.

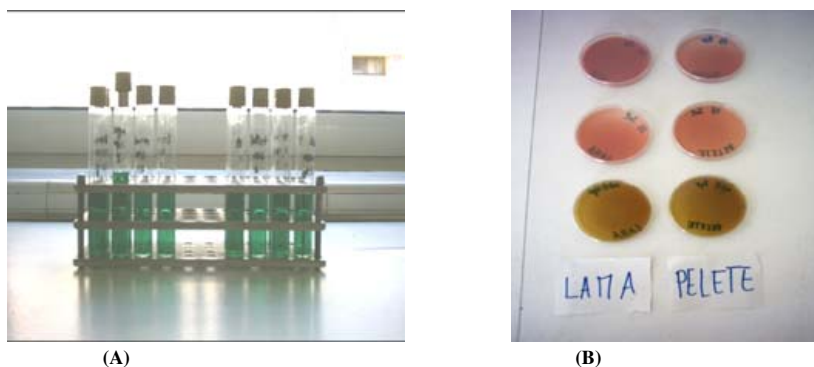


Figura 7.3 - Pesquisa de *Escherichia coli* (A) e *Salmonella sp* (B) na lama e nos peletes

Quadro 7.9 - Análises microbiológicas efectuadas sobre a lama e peletes (Pesquisa de *Salmonella* e *E.coli*)

Parâmetros	<i>Salmonella sp</i>		<i>Escherichia coli</i>	
	Lama	Peletes	Lama	Peletes
1	Neg.	Neg.	Neg.	Neg.
2	Neg.	Neg.	Neg.	Neg.
3	Neg.	Neg.	Neg.	Neg.

7.6 Teste de Fitotoxicidade

A aplicação da lama e dos peletes nas doses de 12,5 e 25% de mistura com a turfa não induziu perdas de produção da biomassa da cevada como se observa nas figuras 7.4 e 7.5. Essa produção manteve-se sempre acima de 90% da produção da biomassa da modalidade testemunha como se demonstra no quadro 7.10. A lama e os peletes não se revelaram fitotóxicos, permitindo assim afirmar, que ambos os resíduos podem ser utilizados como correctivos orgânicos.¹¹¹

Como seria de esperar, a adição da lama e dos peletes na proporção de 50%, induziu uma quebra significativa da produção da biomassa, o que é indicativo da presença de agentes de fitotoxicidade. Deste modo, estes resíduos não apresentam condições para ser utilizados como substrato ou suportes de cultura para viveiros.¹¹¹



Figura 7.4 - Ensaio de produção de biomassa com cevada para os produtos: Peletes (P) e Lama (L) e a modalidade testemunha. Nas fotografias da parte superior, da esquerda para a direita, encontram-se os vasos da testemunha (T) seguido do vaso com 12,5% de volume de substrato (P/L 12,5), seguido do vaso com 25% de volume de substrato (P/L 25) e por fim o vaso com 50% de volume de substrato (P/L 50). Nas fotografias da parte inferior, encontram-se os vasos para cada uma das proporções (12,5; 25% e 50%), demonstrando as principais diferenças entre os produtos testados (peletes e lama) e a testemunha

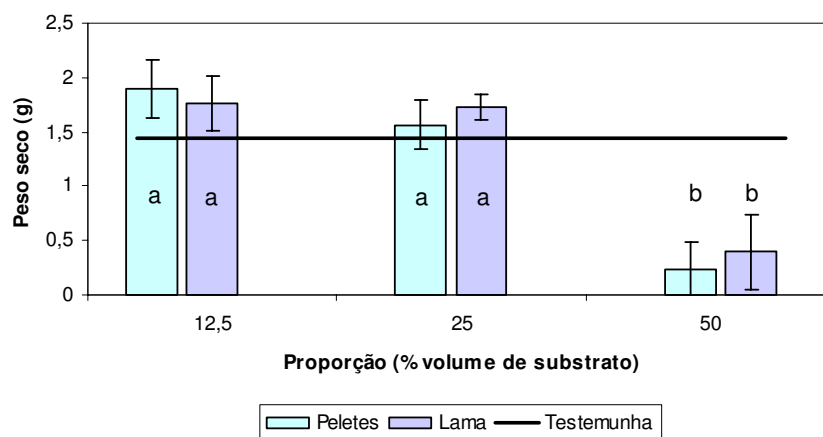


Figura 7.5 - Produção de biomassa de cevada para 12,5%, 25% e 50% de mistura peletes e lama com turfa corrigida. Para colunas da mesma cor, resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p<0,05$) de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

Quadro 7.10 - Avaliação do Grau de maturação do peletes e da lama (valores [média + desvio padrão (DP) + coeficiente de variação de Pearson (CVP)]. Os resultados seguidos da mesma letra minúscula (efeito da proporção) e maiúscula (efeito do tratamento) não diferem significativamente ($p<0,05$) de acordo com o teste de Duncan

Proporção		Produção de biomassa			Produção relativa	
		(g peso seco)			(%)	
Testemunha (n=4)						
		Média		DP	CVP(%)	Média
100%	Turfa (Tf)	A 1,45 a	±	0,13	8,9	100%
Peletes (P) (n=3)						
		Média		DP	CVP (%)	Média
12,5% P	87,5% Tf	B 1,90 b	±	0,26	13,93	131%
25% P	75% Tf	A 1,57 ab	±	0,23	14,74	108%
50% P	50% Tf	B 0,23 c	±	0,25	107,85	16%
Total (n=9)		1,23	±	0,79	64,36	85%
Lama (L) (n=3)						
		Média		DP	CVP (%)	Média
12,5% L	87,5% Tf	AB 1,77 a	±	0,25	14,24	122%
25% L	75% Tf	A 1,73 a	±	0,12	6,66	120%
50% L	50% Tf	B 0,40 b	±	0,35	86,60	28%
Total (n=9)		1,30	±	0,71	54,66	90%
Total (n=22)						
		Média		DP	CVP (%)	---
		1,30	±	0,66	51,08	

Sendo a cevada uma cultura muito tolerante à salinidade (6-12 ms/cm), observou-se que a salinidade dos peletes não afectou o seu crescimento, mesmo quando aplicados nas proporções mais elevadas (50%).^{79,129,130}

Na hipótese de a fitotoxicidade observada na proporção de 50% poder ser devida ao alumínio veiculado pela lama, para o qual a cevada é particularmente sensível, esta não tem razão de ser, dado que o substrato não está em condições de acidez ($pH>5,2$), e, como tal, o alumínio

encontra-se maioritariamente em formas insolúveis e pouco susceptíveis de ser absorvidas pela cultura.¹²⁹ O decréscimo da produção poderá dever-se a níveis sub-tóxicos dos metais pesados que, interagindo entre si, conduziram a uma redução do crescimento. Estudos demonstram que a aplicação de elevadas doses de lama, com altos teores de metais pesados, no solo cultivado com cevada, induziram um aumento significativo de certos metais nestas plantas.¹³¹

No caso concreto da lama, o elevado teor em zinco associado ao elevado teor em azoto amoniacal poderão ter sido os principais agentes de fitotoxicidade responsáveis pelo decréscimo significativo da produção da biomassa na dose máxima.⁷⁹

No caso dos peletes, além do zinco, supõe-se que o elevado pH introduzido pela adição de peletes terá sido igualmente agente de fitotoxicidade ao reduzir os metabolismos celulares e provocar o decréscimo significativo da produção da biomassa.

7.6.1 Análise sintomatológica (visual) das folhas da cevada

As principais sintomatologias anómalas observadas no desenvolvimento da cultura são referidas em seguida:

- Problemas de fitotoxicidade para a mistura 50% de produto com 50 % de turfa, para ambos os produtos analisados (peletes e lama), que se traduziram no reduzido número médio de semente germinadas.
- Ocorrência de sintomas anómalos nas folhas da cevada para a mistura de 25% de lama, possivelmente associados a um problema de carência de nutrientes. Na figura 7.6a demonstra-se esses sintomas anómalos.
- Observou-se igualmente que quer para os peletes quer para a lama, apareceram pontas brancas nas folhas, sintomas característicos da carência de ferro como se visualiza na figura 7.6b. A hipótese que se aponta para esta carência é que a mesma seja induzida pelos teores elevados de zinco veiculados por ambos os resíduos (fenómeno de antagonismo iónico).⁷⁹

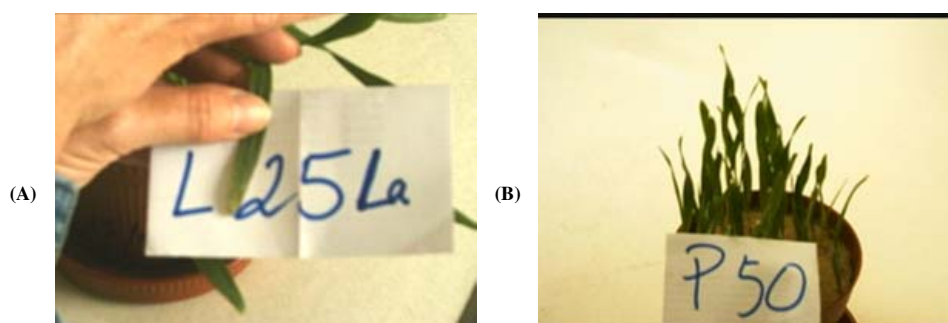


Figura 7.6 - Sintomas anómalos (A,B) observados na cultura da cevada.

7.7 Teste de Vegetação em vaso – Cultura da alface

7.7.1 Efeito da dose sobre a produção

De uma forma geral, observou-se um aumento significativo do peso fresco da cultura da alface comparativamente ao ensaio testemunha para ambos os tratamentos e para doses de 6, 12 e 36 t/ha como se demonstra na figura 7.7. Este aumento está de acordo com os resultados de diversos estudos portugueses que estudaram o efeito da aplicação de lamas residuais urbanas em solos agrícolas.^{92,109,132}

Os aumentos de produção observados para todos os tratamentos comparativamente à testemunha podem ser atribuídos ao facto da lama e dos peletes veicularem macro e micronutrientes em quantidades significativas para a nutrição da alface.



Figura 7.7 - Teste de vegetação em vaso com a alface para os diferentes tratamentos: Lama (L) e Peletes (P) e para diferentes doses: 6, 12 e 36 t/ha

Na figura 7.8 apresenta-se o efeito da dose sobre o comprimento das folhas no final do ensaio para ambos os tratamentos. O comprimento máximo das folhas foi atingido para ambos os tratamentos na dose de 36 t/ha (dose máxima). Observaram-se diferenças significativas para a dose de 12 t/ha no caso dos peletes e para a dose de 36 t/ha para o tratamento com a lama.

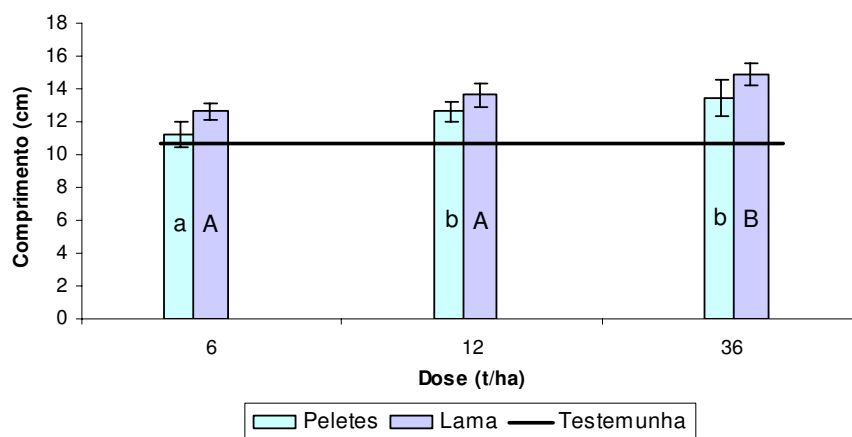


Figura 7.8 - Efeito da dose (t/ha) no comprimento das folhas no final do ensaio, para os peletes e para a lama. Os resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam os desvio padrão

Na largura da folha observaram-se os valores mais elevados e significativos para a dosagem máxima em ambos os tratamentos, como se demonstra na figura 7.9.

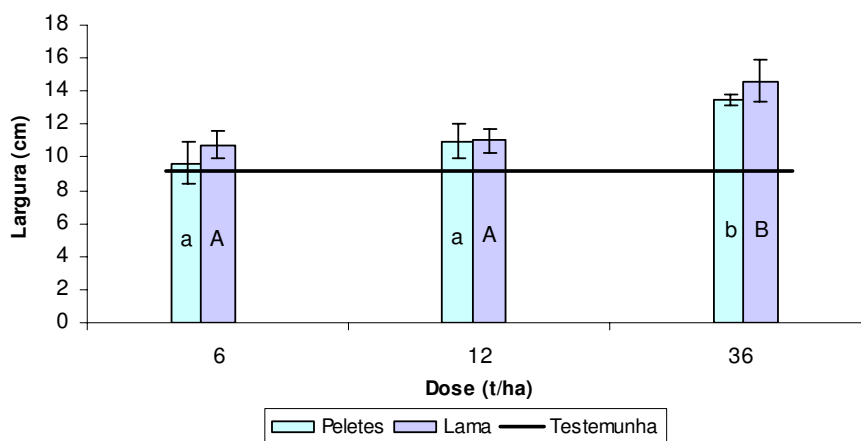


Figura 7.9 - Efeito da dose (t/ha) na largura das folhas no final do ensaio, para os peletes e para a lama. Os resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$) de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam os desvio padrão

Em relação ao efeito da dose sobre o diâmetro do repolho no final do ensaio, que se demonstra na figura 7.10, o diâmetro mais elevado foi obtido igualmente para a dosagem máxima, mas para o tratamento com a lama. Verificaram-se diferenças significativas entre as adições crescentes de lama contrariamente ao caso do tratamento com os peletes em que não se observaram diferenças significativas entre as diferentes doses aplicadas.

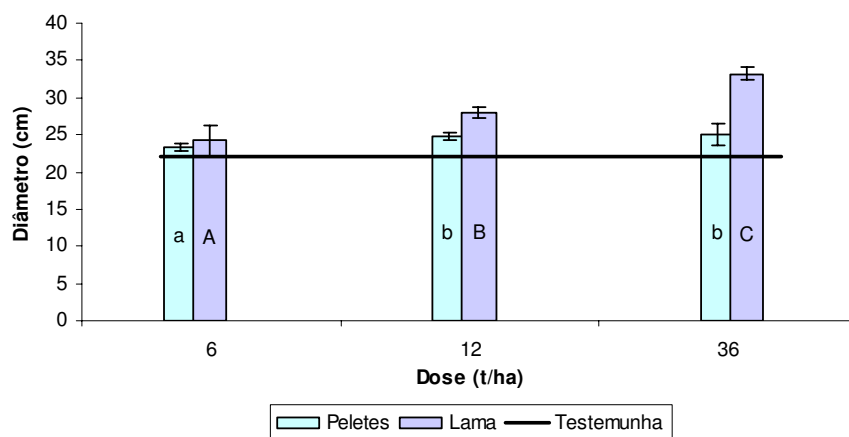


Figura 7.10 - Efeito da dose (t/ha) no diâmetro do repolho no final do ensaio, para os peletes e para a lama. Os resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam os desvio padrão

No que toca ao peso do repolho, expresso em matéria seca, que se representa na figura 7.11, o valor mais elevado foi obtido para a dose 36 t/ha no caso da lama e de 12 t/ha no caso dos peletes, sendo o primeiro mais elevado que o segundo. No caso da lama houve variação do peso do repolho pela adição de doses crescentes de lamas, sendo significativa para a dose máxima aplicada. No caso do tratamento com os peletes não se observaram variações significativas do peso do repolho pela adição de doses crescentes deste resíduo.

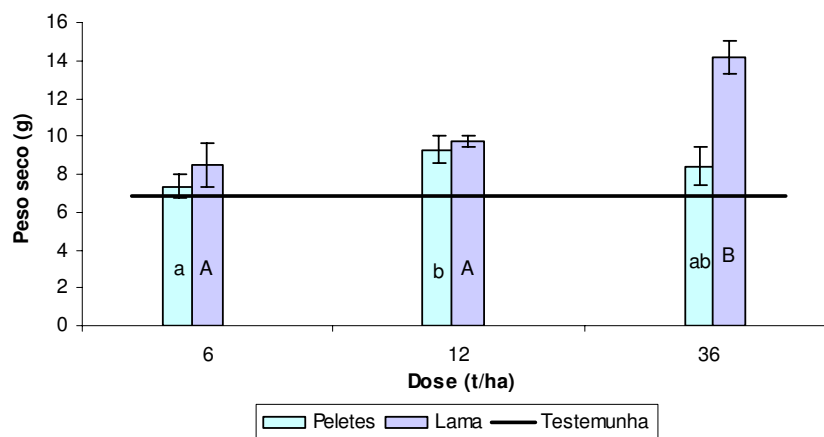


Figura 7.11 - Efeito da dose (t/ha) no peso aéreo seco no final do ensaio para os tratamentos: testemunha, peletes e lama. Os resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

Na globalidade dos parâmetros analisados e na perspectiva da avaliação do efeito da dose aplicada sobre a produção da alface, a adição da dose máxima de 36 t/ha, quer da lama, quer dos peletes, foi a que demonstrou melhores resultados.

7.7.2 Efeito do tratamento efectuado sobre a produção

Na figura 7.12 demonstra-se o efeito do tratamento efectuado sobre o peso aéreo seco no final do tratamento. Observou-se que a aplicação da lama induziu um aumento do peso aéreo seco significativamente superior ao obtido pela aplicação dos peletes, para todas as doses testadas.

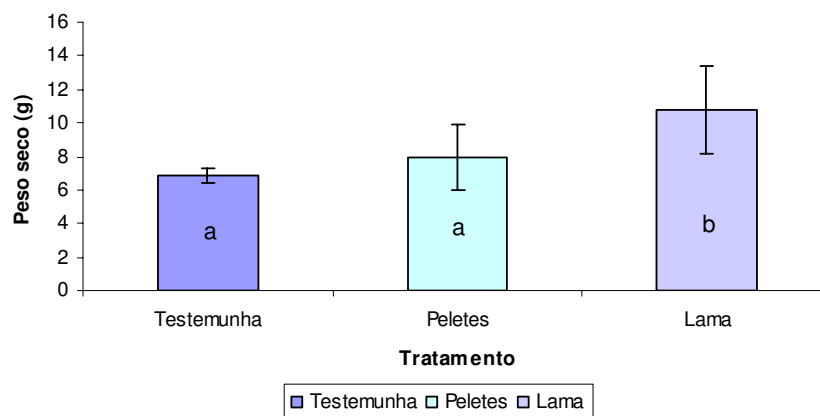


Figura 7.12 - Efeito do tratamento no peso aéreo seco no final do ensaio para as modalidades: testemunha, peletes e lama. Os resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

Relativamente aos outros parâmetros de apreciação do desenvolvimento do repolho que se representam na figura 7.13, a lama permitiu obter repolhos de maior diâmetro e folhas com maior comprimento do que os peletes. Quanto à largura das folhas não se verificaram diferenças significativas pela adição da lama e dos peletes.

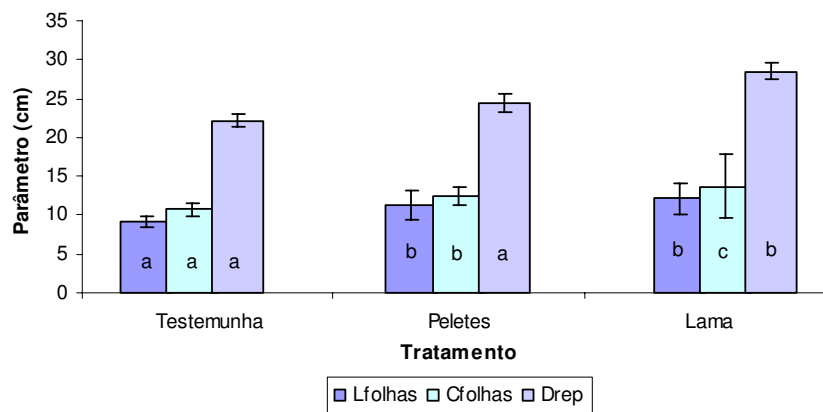


Figura 7.13 - Efeito do tratamento na largura (Lfolhas), no comprimento (Cfolhas) das folhas e no diâmetro do repolho no final do ensaio para as modalidades: testemunha, peletes e lama. Para colunas da mesma cor, resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$) de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

7.7.3 Efeito da dose no ritmo de crescimento da alface

A adição de doses crescentes de lama ao solo aumenta o ritmo de crescimento da alface, sendo este efeito particularmente notório na dose de 36 t/ha de lama aplicada como se demonstra na figura 7.14.

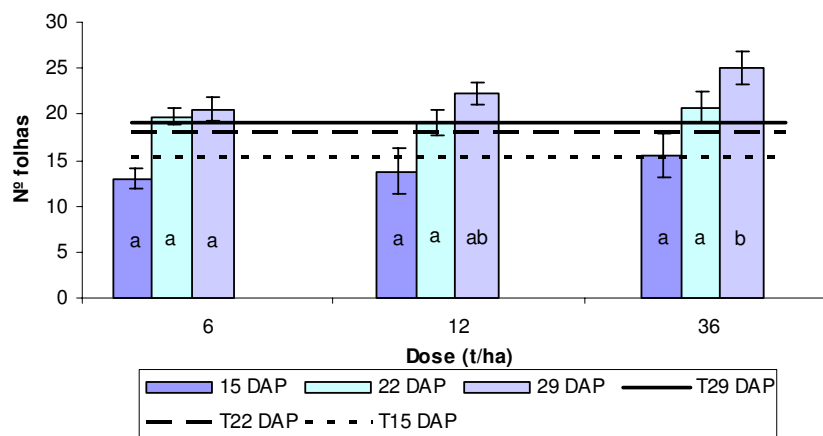


Figura 7.14 - Efeito da dose no número de folhas de alface (*Lactuca sativa*) desenvolvidas, para o tratamento com a lama, aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP). Para colunas da mesma cor, resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$) de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

No que toca aos peletes e como se depreende da figura 7.15, observou-se um efeito positivo sobre o ritmo de crescimento para a dose de aplicação de 12 t/ha, efeito este que é particularmente notório na fase inicial do desenvolvimento (15 DAP). A partir dos 22 dias observa-se também uma resposta positiva no ritmo de desenvolvimento da alface pela adição de doses de 12 e 36 t/ha de peletes.

Estes resultados permitem concluir que, numa fase juvenil, a planta é mais sensível a algum agente de fitotoxicidade dos peletes cujo efeito negativo na dose 36 t/ha prevalece sobre o efeito pontual no crescimento, criado por uma maior disponibilização de nutrientes, nomeadamente o azoto.

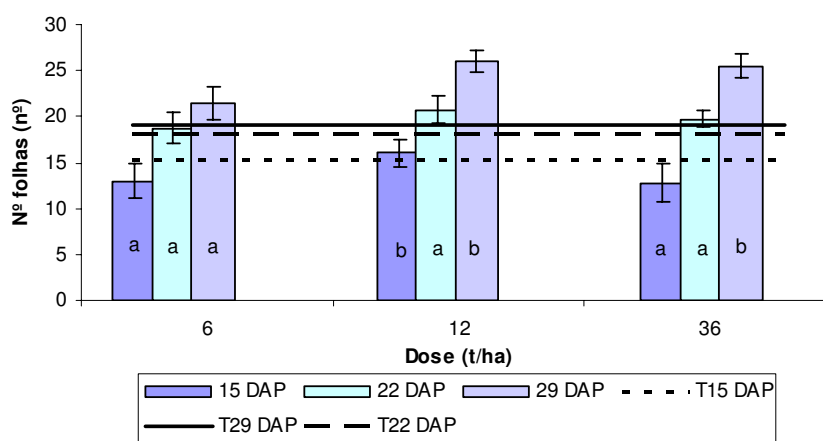
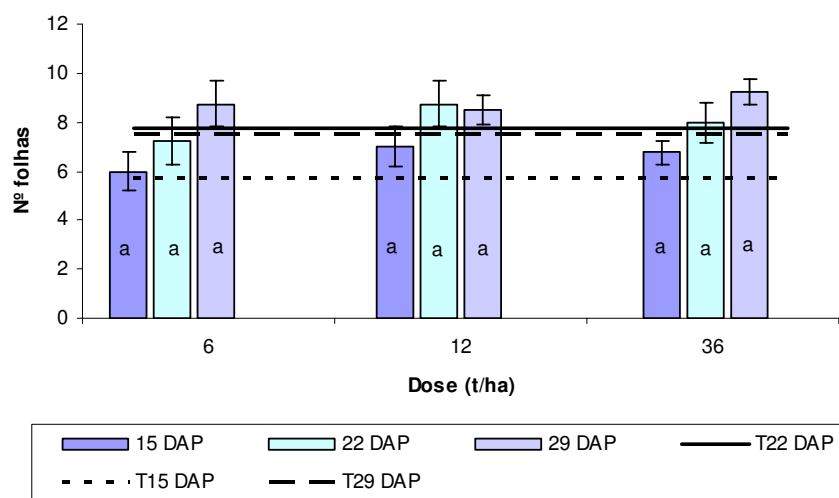


Figura 7.15 - Efeito da dose no número de folhas de alface (*Lactuca sativa*) desenvolvidas, para o tratamento com os peletes, aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP). Para colunas da mesma cor, resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$) de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

No que respeita ao número de folhas em desenvolvimento, a aplicação de doses crescentes de lama e de peletes não induz um aumento significativo do número de folhas jovens como se observa na figura 7.16.

Contudo, verificou-se que a adição da lama conduziu a um aumento do número de folhas em desenvolvimento comparativamente à modalidade testemunha, o que não se passou com os peletes, que originaram folhas jovens em número inferior ao da testemunha, só se atenuando a diferença no final do ensaio (29 DAP).

Lama



Peletes

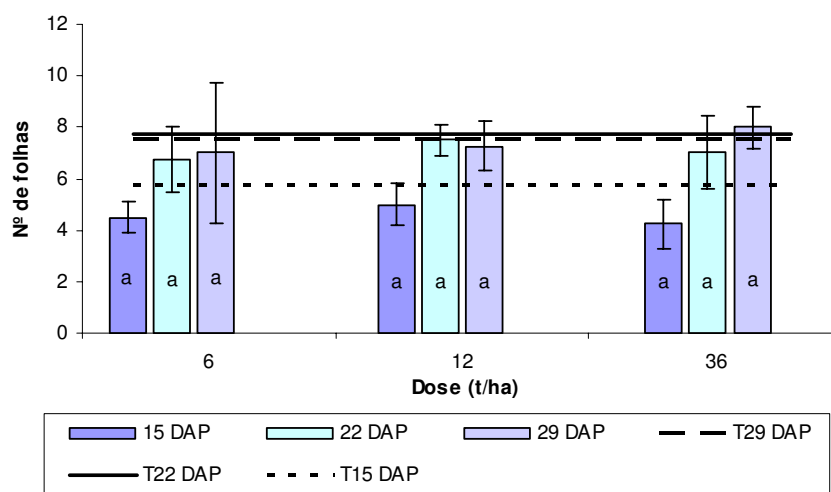


Figura 7.16 - Efeito da dose no número de folhas de alface (*Latuca sativa*) em desenvolvimento, para os seguintes tratamentos: testemunha, peletes e lama aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP). Para colunas da mesma cor, resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$) de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

7.7.4 Efeito do tratamento no ritmo de crescimento da alface

A partir dos 22 DAP, o ritmo de crescimento nos tratamentos com a lama e com os peletes foi superior ao da testemunha, como se depreende da figura 7.17. Entre os tratamentos não se verificaram diferenças significativas no ritmo de crescimento da alface.

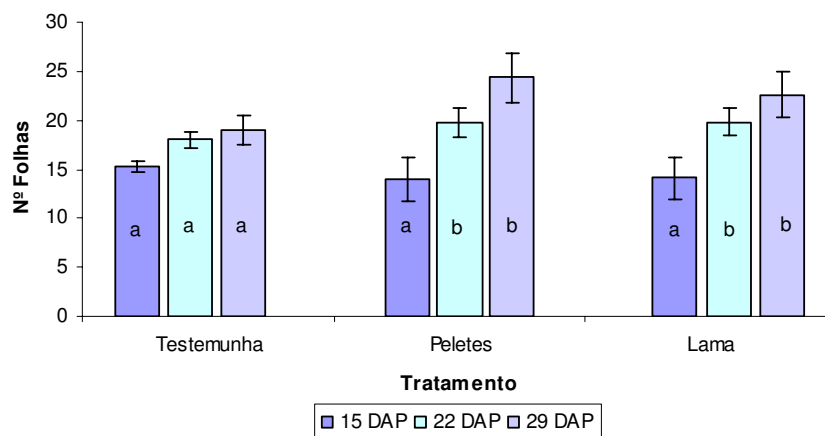


Figura 7.17 - Efeito do tratamento no número de folhas de alface (*Lactuca sativa*) desenvolvidas, para os seguintes tratamentos: testemunha, peletes e lama aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP). Para colunas da mesma cor, resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

Relativamente ao número de folhas em desenvolvimento que se representa na figura 7.18, a adição de doses crescentes de lama conduziu a um aumento comparativamente com a testemunha, sendo significativo na fase juvenil da planta (15 DAP) e na fase final do ensaio (29 DAP). No caso do tratamento com os peletes, observou-se que o número de folhas jovens foi sempre inferior ao da modalidade testemunha, sendo a diferença significativa na fase juvenil da planta (15 DAP).

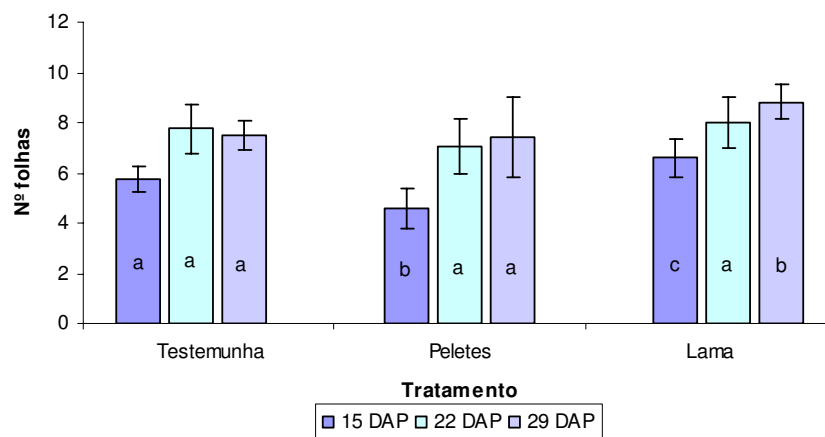


Figura 7.18 - Efeito do tratamento no número de folhas de alface (*Lactuca sativa*) em desenvolvimento, para os seguintes tratamentos: testemunha, peletes e lama aos 15, 22 e 29 dias após a plantação (DAP). Para colunas da mesma cor, resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Duncan. As barras verticais indicam o desvio padrão

Analisando o efeito de ambos os tratamentos sobre o ritmo de crescimento da alface, pode-se concluir, ao nível dos parâmetros considerados que, o tratamento com a lama permitiu obter os melhores resultados.

7.7.5 Aspectos fitossanitários a referir

- Aparecimento de necroses marginais em aproximadamente 50% das folhas do repolho (folhas desenvolvidas) para todas as doses referentes ao tratamento com os peletes, demonstrado na figura 7.19.



Figura 7.19 - Aparecimento de necroses marginais para o tratamento com os peletes

- Aparecimento do pulgão (*Macrosiphon lactucae*; *Hyperomyzus lactucae*) no tratamento com lamas para as doses máximas (36 t/ha). Não foi aplicado qualquer tipo de produto para o seu controlo, tendo-se tido o cuidado de “limpar” as folhas destes parasitas.
- Aparecimento do míldio da alface (“*Bremia lactucae*”), doença comum em alface no início da cultura, nomeadamente quando plantada em estufa. O sintoma que permitiu a sua detecção foi o aparecimento de manchas descoloridas nas folhas (amareladas), delimitadas pelas nervuras, a que correspondia na página inferior a uma eflorescência branca resultante da frutificação do fungo. Como meio de protecção, utilizou-se um fungicida que tem por base o mancozebe (fungicida ditiocarbamato).
- Aparecimento da Botrytis da alface também designada por podridão cinzenta, em algumas folhas. Esta doença provocada pelo fungo, geralmente na sua forma conidiana *Botrytis cinerea*, é típica em culturas de alface cultivadas em estufa, visto existirem as condições favoráveis ao seu desenvolvimento (humidade elevada, temperaturas compreendidas entre 17 e 24°C, excessivas adubações azotadas, etc). Os sintomas que o evidenciaram foram o aparecimento de zonas atacadas com um aspecto cinzento e podre (figura 7.20). Dados que estes sintomas apenas foram detectados em algumas folhas (tratamento com a lama) e no final do ensaio (recolha) não foi efectuado qualquer tipo de tratamento contra esta doença (fungicida).



Figura 7.20 - Aparecimento da Botrytis em algumas folhas de alface

- Desenvolvimento deficiente do ensaio P6/4 característico por apresentar folhas moles e deformadas.
- Aparecimento de sintomatologia *Tip-burn* nas doses máximas do tratamento com lama. O aparecimento deste problema de ordem fisiológica dever-se-à a carências induzidas (cálcio) pelos desequilíbrios hídricos e mudanças bruscas de temperatura (os ensaios foram

realizados em Maio/Junho de 2005). Os principais sintomas que o evidenciaram foram o aparecimento de necrose (queima) marginal nas folhas em desenvolvimento (centro do repolho). Estes sintomas apenas se evidenciaram na parte final do ensaio.

7.7.6 Efeito das doses e do tratamento na fertilidade do solo e no estado nutritivo da alfalfa

No quadro 7.11 são apresentados os efeitos sobre a aplicação de doses crescentes de lama e dos peletes (6, 12 e 36 t/ha) sobre a fertilidade do solo.

Quadro 7.11 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] do pH, humidade, matéria orgânica, condutividade eléctrica (CE) e teor de nutrientes extraíveis no extracto aquoso 1:5 em volume, para os tratamentos: testemunha, lama e peletes após a extracção pela cultura. Os resultados seguidos da mesma letra minúscula (efeito da dose) e maiúscula (efeito do tratamento) não diferem significativamente (p <0,05) de acordo com o teste de Duncan

Tratamento	Dose t/ha	Parâmetros							
		pH		Matéria orgânica		Azoto Mineral		Azoto Nítrico	
		(H ₂ O)		mg/g		µg/g N		µg/g N	
Testemunha	0	AB 7,08 ± 0,17	A	A 6,2 ± 1,0	A	A 15,8 ± 1,8	A	A 1,7 ± 0,1	A
Lama	6	A 7,14 ± 0,09	a	B 8,7 ± 1,1	a	A 19,5 ± 3,5	a	A 1,5 ± 0,1	a
	12	A 7,06 ± 0,07	ab	B 8,9 ± 0,3	a	B 20,1 ± 2,1	a	B 1,4 ± 0,1	b
	36	A 6,99 ± 0,05	b	B 9,5 ± 2,2	a	B 20,6 ± 1,8	a	B 1,3 ± 0,0	b
Total (n=12)		7,06 ± 0,09	A	9,0 ± 1,4	B	20,0 ± 2,4	B	1,4 ± 0,1	B
Peletes	6	A 7,15 ± 0,06	a	A 6,9 ± 0,7	a	A 17,6 ± 1,8	a	A 1,7 ± 0,3	a
	12	A 7,12 ± 0,08	a	AB 7,5 ± 1,3	ab	B 19,6 ± 1,9	ab	B 1,5 ± 0,0	a
	36	B 7,19 ± 0,03	a	B 8,7 ± 1,0	b	B 20,9 ± 1,9	b	A 1,8 ± 0,3	a
Total (n=12)		7,15 ± 0,06	A	7,7 ± 1,2	B	19,4 ± 2,2	B	1,7 ± 0,2	A
		Azoto amoniacal		P		K		Ca	
		µg/g N		µg/g P ₂ O ₅		µg/g K		µg/g Ca	
Testemunha	0	A 0,53 ± 0,10	A	A 4,4 ± 0,3	A	A 6,4 ± 0,5	A	A 57,5 ± 3,9	A
Lama	6	B 0,18 ± 0,02	a	B 5,7 ± 0,9	a	B 4,0 ± 0,4	a	A 61,0 ± 4,8	a
	12	B 0,29 ± 0,07	b	B 5,5 ± 0,4	a	B 3,3 ± 0,3	b	A 61,3 ± 5,8	a
	36	A 0,58 ± 0,08	c	B 8,3 ± 1,1	b	B 2,9 ± 0,3	b	A 66,5 ± 11,7	a
Total (n=12)		0,35 ± 0,18	B	6,5 ± 1,5	B	3,3 ± 0,6	B	62,9 ± 7,7	A
Peletes	6	C 0,42 ± 0,02	a	A 4,2 ± 0,5	a	A 6,1 ± 2,6	a	A 54,1 ± 2,0	a
	12	B 0,40 ± 0,05	a	A 4,3 ± 0,9	a	B 4,1 ± 0,9	a	A 58,4 ± 7,5	a
	36	B 0,25 ± 0,02	b	A 5,3 ± 1,1	a	C 4,6 ± 1,3	a	A 61,3 ± 9,4	a
Total (n=12)		0,36 ± 0,08	B	4,6 ± 0,9	B	5,0 ± 1,8	C	57,9 ± 7,1	A
		Mg		Na		CE		Humidade	
		ppm Mg		ppm Na		25°C ms/cm		g.kg ⁻¹	
Testemunha	0	A 7,8 ± 0,6	A	A 9,1 ± 0,5	A	A 0,39 ± 0,01	A	A 59,0 ± 5,4	A
Lama	6	A 7,6 ± 0,3	a	A 8,3 ± 0,5	a	A 0,40 ± 0,02	a	A 55,8 ± 8,1	a
	12	A 7,9 ± 0,6	a	A 7,4 ± 1,6	a	A 0,39 ± 0,01	a	B 41,6 ± 2,6	b
	36	A 8,4 ± 0,8	a	A 9,5 ± 1,7	a	A 0,44 ± 0,06	a	B 21,9 ± 2,6	c
Total (n=12)		8,0 ± 0,6	A	8,4 ± 1,5	A	0,41 ± 0,04	A	39,8 ± 15,2	B
Peletes	6	A 7,5 ± 0,4	a	A 8,5 ± 2,5	a	A 0,38 ± 0,03	a	A 52,1 ± 3,1	a
	12	A 7,6 ± 0,9	a	A 8,8 ± 3,9	a	A 0,39 ± 0,05	a	A 61,9 ± 6,8	b
	36	A 7,5 ± 0,7	a	A 10,0 ± 3,2	a	A 0,41 ± 0,04	a	C 36,9 ± 2,1	c
Total (n=12)		7,5 ± 0,7	A	9,1 ± 3,1	A	0,39 ± 0,04	A	50,3 ± 11,5	AB

Embora pudesse ser previsível um aumento do pH do solo pelo efeito alcalinizante dos peletes, tal facto não se verificou de forma significativa visto que para ambos os tratamentos e para as diferentes doses aplicadas, o pH do solo não ser significativamente diferente do determinado na modalidade testemunha.

Num outro estudo a realizar futuramente, caberia a aplicação de idêntica metodologia utilizando solos ácidos (característicos da zona Norte do País), sem qualquer correcção da alcalinidade, de forma a avaliar o seu efeito alcalinizante sobre a absorção da água, dos elementos tóxicos e dos

nutrientes pelo sistema radicular das culturas. Na figura 7.21 apresenta-se a assimilação dos principais nutrientes em função do pH do solo. Por exemplo, em condições de solo ácido, o alumínio encontra-se sob a forma biodisponível e o seu efeito manifesta-se através de um atrofiamento do sistema radicular.¹³³

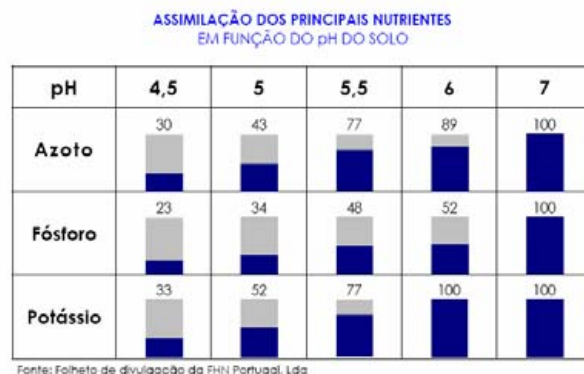


Figura 7.21 - Assimilação dos principais nutrientes em função do pH do solo

No que toca ao teor de matéria orgânica no solo, a aplicação de doses crescentes de ambos os produtos, aparentemente conduz a um aumento do seu teor no solo. Contudo a elevada variabilidade dos resultados, apenas permite encarar como significativo o aumento de matéria orgânica atingido pela aplicação 36 t/ha de peletes. Analisando o efeito do tipo de tratamento, não se observaram diferenças significativas entre os dois tipos testados (peletes e lama). Porém, para cada dose testada observou-se um aumento significativo no teor de matéria orgânica comparativamente à modalidade testemunha.

No que se refere aos teores de azoto mineral, nítrico e amoniacal, não se detectaram diferenças significativas por aplicação de diferentes doses, à excepção do azoto mineral no tratamento com peletes na dose máxima e no caso do azoto amoniacal no tratamento com lama para as diversas doses. No que toca ao efeito do tratamento verificaram-se diferenças significativas entre os tratamentos para a dose máxima, equivalente a 36 t/ha, no teor de azoto nítrico e para as doses 6 e 36 t/ha no teor de azoto amoniacal.

A ausência de um aumento significativo do teor de azoto mineral com a aplicação de doses crescentes de lama poder-se-á dever a uma maior absorção deste elemento pela planta, uma vez que, como já referido anteriormente, se observou um maior desenvolvimento da biomassa foliar nas doses superiores aplicadas.

Quer as lamas, quer os peletes, são ricos em azoto, pelo que apresentam valor fertilizante como veiculadores deste nutriente. No quadro 7.12 apresentam-se as quantidades estimadas de azoto total (expressas em kg/ha e em g/vaso) introduzidos pelos peletes e lama aplicados no ensaio de vegetação em vaso, tendo por base os teores determinados em 7.4.

Quadro 7.12 - Quantidades de azoto total [(expresso em kg/ha e em g/vaso) em matéria seca] aplicados no ensaio de vegetação

Dose (t/ha)	Peletes	Lama	Peletes	Lama
	(kg/ha)		(g/vaso)	
6	100	138	0,157	0,216
12	200	275	0,314	0,432
36	600	825	0,941	1,295

As quantidades de azoto total aplicadas nos ensaios, à excepção da dose de 6 t/ha, excedem as recomendações efectuadas pelo CBPA que restringe a aplicação às correspondentes a 170 kg de azoto total por hectare e por ano, em zonas vulneráveis, como medida de prevenção da poluição da água por nitratos.²⁷ Para este valor-guia, as doses a aplicar não deveriam ultrapassar 7,4 t/ha

(m.s.) para lama e 10,2 t/ha (m.s.) para os peletes. Importa, contudo, referir, que o valor-guia de N total por hectare e por ano se aplica a zonas vulneráveis, mas que, presentemente, é proibido a sua aplicação nestas zonas. Considerou-se este valor como guia, por uma questão defensiva.

Nos ensaios realizados estas doses foram premeditadamente ultrapassadas para averiguar a possível existência de substâncias fitotóxicas. No anexo A.II apresenta-se um exemplo de cálculo das quantidades de peletes e lama a aplicar na fertilização do solo tendo com base o azoto disponibilizado por ambos e o azoto presente no solo.

Nos restantes parâmetros de avaliação da fertilidade do solo importa destacar o efeito do tratamento sobre o teor de fósforo extraível em solução aquosa 1:5 (p/v). Neste aspecto verificaram-se diferenças significativas entre os tratamentos para ambas as doses testadas, constatando-se a presença de teores mais elevados no tratamento com a lama. Tal facto poderá derivar de o fósforo precipitar em presença de cálcio (presente em teores mais elevados nos peletes, quadro 7.4) formando fosfatos bicálcicos CaHPO_4 e tricálcicos, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, que sendo formas insolúveis, não são detectados no extracto aquoso analisado.

No que se refere aos outros parâmetros do solo analisados, não se observaram diferenças significativas pela incorporação de doses crescentes de lama e peletes, nem pelo tipo de tratamento realizado.

À semelhança do azoto, apresentam-se no quadro 7.13 as quantidades estimadas de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) veiculadas por ambos os resíduos orgânicos, expressas em g/m^2 e g/vaso em matéria seca.

Quadro 7.13 - Quantidades estimadas de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (expressas em g/m^2 e g/vaso , em matéria seca) aplicadas no ensaio de vegetação em vaso para o tratamento com a lama (L) e com os peletes (P)

Dose (t/ha)	Fósforo (P)				Potássio (K)			
	P	L	P	L	P	L	P	L
	g/m^2		g/vaso		g/m^2		g/vaso	
6	10	35	0,156	0,554	0,2	0,6	0,003	0,010
12	20	70	0,312	1,108	0,4	1,2	0,006	0,020
36	60	210	0,935	3,325	0,12	3,6	0,018	0,059

Dose (t/ha)	Cálcio (Ca)				Magnésio (Mg)			
	P	L	P	L	P	L	P	L
	g/m^2		g/vaso		g/m^2		g/vaso	
6	92	22,5	14,4	3,5	0,136	0,193	0,214	0,303
12	184	45	28,9	7,0	0,272	0,386	0,427	0,607
36	552	135	86,6	21,1	0,816	1,158	1,282	1,820

Importa referir que nos processos de calagem é usual aplicar 6 t/ha CaCO_3 , o que equivale, aproximadamente, à aplicação de 3,36 t/ha Ca, ou seja, 336 g/m^2 Ca. No caso do tratamento com peletes, a aplicação da dose máxima cede quantidades de cálcio superiores podendo potenciar alguma sobrecalagem dos solos. Contudo, tal efeito não foi observável nos ensaios realizados, visto não ocorrer variação significativa do teor deste elemento pelo acréscimo da dose, nem pelo tipo de tratamento aplicado. Esse facto poderá estar “mascarado” pela dissolução lenta dos peletes na matriz solo-planta, o que constitui uma perspectiva de estudo futuro, de forma a avaliar o efeito da solubilidade sobre a biodisponibilização dos diferentes nutrientes veiculados pelos peletes e sobre o efeito alcalinizante.

No quadro 7.14 apresentam-se os teores de Cu, Fe, Mn e Zn presentes no solo para os tratamentos efectuados: testemunha, lama e peletes. No caso do tratamento com a lama, observa-se um aumento significativo dos teores de Cu e Zn pela incorporação de doses crescentes, sendo mais vincado no caso do zinco. No tratamento com peletes, não ocorreu qualquer acréscimo significativo de Cu, Fe, Mn e Zn, pela incorporação de doses crescentes,

facto que poderá ser atribuído a uma reduzida solubilidade dos peletes durante o período de ensaio (1 mês).

Quadro 7.14 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] dos metais extraíveis pelo método de Lakanen no extracto aquoso 1:10 em volume, para os tratamentos: testemunha, lama e peletes após a extracção pela cultura. Os resultados seguidos da mesma letra minúscula (efeito da dose) e maiúscula (efeito do tratamento) não diferem significativamente ($p<0,05$) de acordo com o teste de Duncan

Tratamento	Dose	Parâmetros							
		Cu		Fe		Mn		Zn	
		t/ha		μg/g		μg/g		μg/g	
Testemunha	0	A 0,98	± 0,1 A	A 33,9	± 2,7 A	A 6,5	± 0,3 A	AB 4,5	± 0,9 A
Lama	6	B 1,15	± 0,1 a	A 34,4	± 2,5 a	A 6,9	± 0,3 a	A 3,7	± 0,2 a
	12	B 1,28	± 0,1 b	B 38,9	± 2,0 ab	B 7,7	± 0,3 ab	A 4,7	± 0,5 b
	36	B 1,53	± 0,2 c	B 43,1	± 4,3 b	B 8,0	± 0,9 b	A 6,3	± 0,7 c
Total (n=12)		1,32	± 0,2 B	38,8	± 4,7 B	7,5	± 0,7 B	4,9	± 1,2 A
Peletes	6	B 1,18	± 0,1 a	A 36,5	± 2,0 a	A 6,8	± 0,3 a	B 5,3	± 1,2 a
	12	B 1,18	± 0,1 a	A 39,7	± 1,3 a	B 7,5	± 0,4 a	A 4,2	± 0,1 a
	36	B 1,35	± 0,2 a	AB 37,6	± 5,2 a	AB 7,2	± 1,0 a	A 5,0	± 1,8 a
Total (n=12)		1,23	± 0,1 B	37,9	± 3,3 AB	7,2	± 0,7 B	4,8	± 1,2 A

De forma avaliar as quantidades de metais aplicadas para cada um dos tratamentos representa-se no quadro 7.15 as suas estimativas expressas em kg/ha e mg/vaso, em matéria seca, tendo por base os teores determinados em 7.4.

Quadro 7.15 - Quantidades estimadas de metais (expressos em kg m.s./ha e mg m.s./vaso) aplicadas no ensaio de vegetação em vaso

Dose (t/ha)	Cobre (Cu)				Níquel (Ni)				Chumbo (Pb)				Zinco (Pb)			
	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L
	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso
6	0,8	1,9	1,2	2,9	0,1	0,2	0,2	0,4	0,6	0,8	0,92	1,27	3,1	8,0	4,9	12,5
12	1,6	3,7	2,5	5,8	0,2	0,5	0,4	0,7	1,2	1,6	1,83	2,54	6,3	15,9	9,9	25,0
36	4,8	11,1	7,5	17,5	0,7	1,4	1,1	2,2	3,5	4,9	5,50	7,63	18,9	47,8	29,6	74,9
Dose (t/ha)	Mercúrio (Hg)				Crómio (Cr)				Ferro (Fe)m				Manganês (Mn)			
	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L
	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso	kg m.s./ha	mg m.s./vaso
6	0,03	0,07	0,05	0,11	0,1	0,5	0,1	0,9	23	46	36	72	0,5	0,9	0,9	1,4
12	0,06	0,14	0,10	0,23	0,2	1,1	0,3	1,7	45	92	71	144	1,1	1,8	1,7	2,7
36	0,19	0,43	0,30	0,68	0,5	3,3	0,8	5,1	136	275	214	431	3,3	5,3	5,1	8,2

Comparando as quantidades estimadas de metais pesados aplicadas com os valores limite permitidos no solo na base de um período médio de 10 anos definidos pela Portaria n.º 176/96 e os sugeridos pelo *Draft*, que se apresentam no quadro 7.16, verifica-se que o mercúrio é claramente o metal pesado limitativo das quantidades de peletes e lama a aplicar ao solo.

Quadro 7.16 - Valores-limite das quantidades de metais pesados que anualmente será permitido aplicar ao solo numa base de uma média de dez anos (kg m.s./ha/ano)^{11,28}

Elementos	Portaria nº 176/96 (2ª série)	Working document on sludge 3 rd Draft
	kg m.s./ha/ano	
Cd	0,15	0,03
Cu	12	3
Ni	3	0,9
Pb	15	2,25
Zn	30	7,5
Hg	0,1	0,03
Cr	4,5	3

Segundo a legislação em vigor seria possível aplicar 18,9 t m.s./ha/ano de peletes e 8,3 t m.s./ha/ano de lamas. Contudo, a este respeito importa ainda relembrar as recomendações impostas pelo CBPA, que recomenda a utilização de doses inferiores (10,2 t m.s./ha e 7,4 t m.s./ha), como medida de prevenção da poluição da água por nitratos.²⁷

De acordo com o *Draft*, as doses a aplicar numa base média de 10 anos, serão significativamente inferiores, ou seja, de 5,7 t/ha/ano m.s. para os peletes e 2,5 t/ha/ano m.s. para as lamas.²⁸

Relativamente ao efeito da aplicação de doses crescentes de lama e de peletes sobre o estado nutritivo da alface, apresenta-se no quadro 7.1.7 os teores foliares dos diversos parâmetros analisados.

Quadro 7.17 - Teores foliares encontrados no repolho pela adição de doses crescentes de lama e de peletes [média+desvio padrão (n=4)]. Valores expressos na matéria seca a 105°C. Os resultados seguidos da mesma letra minúscula (efeito da dose) e maiúscula (efeito do tratamento) não diferem significativamente (p<0,05) de acordo com o teste de Duncan

Tratamento	Dose t/ha	Parâmetros											
		N total			P			K			Ca		
		mg/g			mg/g			mg/g			mg/g		
Testemunha	0	A 13,4	± 1,0	A	A 2,1	± 0,2	A	A 31,9	± 3,7	A	A 9,2	± 0,3	A
Lama	6	B 15,3	± 1,1	a	B 2,9	± 0,3	a	A 31,6	± 1,3	a	B 11,4	± 0,4	a
	12	B 16,7	± 1,3	a	B 3,0	± 0,2	ab	A 29,0	± 2,1	ab	A 9,7	± 1,2	a
	36	B 20,1	± 1,4	b	B 3,3	± 0,1	b	B 26,4	± 2,3	b	B 11,6	± 1,8	a
Total (n=12)		17,4	± 2,4	AB	3,1	± 0,2	B	29,0	± 2,8	A	10,9	± 1,4	B
Peletes	6*	B 16,8	± 1,1	a	A 2,3	± 0,2	a	B 37,1	± 0,2	a	AB 10,4	± 1,2	a
	12	B 18,2	± 0,7	a	A 2,4	± 0,3	a	B 37,3	± 0,6	a	A 10,2	± 0,7	a
	36	C 30,5	± 3,1	b	A 1,9	± 0,1	b	C 43,9	± 3,2	b	B 12,1	± 1,5	a
Total (n=12)		22,3	± 6,8	B	2,2	± 0,3	A	39,7	± 3,8	B	10,9	± 1,4	B
Ref ¹⁴		42-112			4-9			39-98			8,8-20		
		Mg			Fe			Mn			B		
		mg/g			µg/g			µg/g			mg/g		
Testemunha	0	A 2,2	± 0,3	A	AB 72,6	± 8,5	A	A 48,0	± 6,2	A	A 29,3	± 3,0	A
Lama	6	A 3,0	± 0,7	ab	A 77,3	± 32,0	a	A 40,2	± 2,6	a	B 45,5	± 6,3	a
	12	B 2,6	± 0,3	a	A 61,7	± 14,5	a	A 39,8	± 10,0	a	B 36,2	± 4,7	b
	36	B 3,5	± 0,4	b	A 64,2	± 5,1	a	B 35,4	± 2,6	a	B 38,0	± 6,4	ab
Total (n=12)		3,1	± 0,6	B	67,7	± 19,9	A	38,5	± 8,7	B	39,9	± 6,0	B
Peletes	6*	A 2,4	± 0,1	a	A 75,2	± 6,0	a	A 44,1	± 2,7	a	B 39,1	± 7,2	a
	12	B 2,6	± 0,1	a	A 61,8	± 0,1	a	A 38,4	± 7,8	a	C 47,7	± 2,4	b
	36	B 3,6	± 0,2	b	B 82,4	± 8,5	b	AB 39,9	± 6,7	a	C 54,5	± 1,6	b
Total (n=12)		2,9	± 0,6	B	72,5	± 10,8	A	40,5	± 6,2	AB	47,8	± 7,3	C
Ref ¹⁴		3,6-8,8			56-580			30-198			21,6-65		

* anulou-se o ensaio (P6-4), uma vez que os teores obtidos para os diferentes parâmetros diferiam significativamente dos restantes ensaios. Apresenta-se no anexo AIII, os resultados obtidos para este ensaio.

Observa-se um acréscimo significativo no teor em azoto da planta, para a aplicação da dose máxima em ambos os tratamentos, comparativamente com a modalidade testemunha, sendo que o efeito da adição da lama ou peletes apenas se distingue para a dose máxima aplicada.

Embora o teor foliar de azoto esteja fora da gama de valores de referência para a cultura, não se detectaram sintomas característicos da carência deste elemento.

No quadro 7.18 são apresentadas as quantidades de azoto total expressos em mg/repolho, de forma a atenuar o efeito de diluição provocado pelo acréscimo de massa foliar verificado entre as doses e os tratamentos.

Quadro 7.18 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] do azoto total presente por repolho m.s., para os diferentes tratamentos: testemunha, lama e peletes. Os resultados seguidos da mesma letra minúscula (efeito da dose) e maiúscula (efeito do tratamento) não diferem significativamente ($p<0,05$) de acordo com o teste de Duncan

Tratamento	Dose	Parâmetro			
		Azoto			
	t/ha	mg/repolho			
Testemunha	0	A 92	±	5,4	A
Lama	6	B 130	±	21,7	a
	12	B 163	±	10,9	b
	36	B 284	±	12,9	c
Total (n=12)		192	±	70,4	B
Peletes	6*	B 123	±	5,6	a
	12	B 169	±	7,0	b
	36	C 254	±	6,0	c
Total (n=12)		188	±	56,7	B

*anulou-se o ensaio (P6-4)

Ao invés dos resultados obtidos para o quadro 7.17, observa-se um acréscimo significativo do teor deste elemento na planta para as maiores doses de lamas e peletes, como seria de esperar. A lama conduziu aos teores mais elevados de azoto na planta, o que para a dose máxima de aplicação se traduziu em plantas mais verdes e de maior vigor vegetativo, comparativamente com as restantes modalidades de fertilização.

Contudo, importa referir que esse efeito espectacular que se observa pelo excesso de azoto introduzido, traz alguns inconvenientes para a planta, sobretudo se essa maior disponibilidade não for acompanhada de maiores disponibilidades de outros nutrientes. Assim, embora o azoto aumente a área das folhas, e, conseqüentemente, a superfície disponível para a fotossíntese, e, portanto, a síntese de glúcidos, quando existam teores mais elevados deste nutriente, os glúcidos já sintetizados são convertidos em proteína e protoplasma, fazendo com que fique menor proporção disponível para formar as paredes celulares. Este efeito tem como consequência a formação de células maiores e de paredes mais finas, o que torna as folhas mais suculentas, menos duras, e, por tal motivo, menos resistentes ao ataque de insectos e fungos, e também a condições adversas, como sejam a secura e a geada.⁷⁹

Quanto ao teor de fósforo (P) nas folhas, no quadro 7.17, observaram-se diferenças significativas entre os tratamentos para todas as doses testadas, tendo-se verificado teores foliares mais elevados para o tratamento com lama. Tal facto poderá dever-se à já referida precipitação do fósforo na presença de cálcio, formando compostos insolúveis, impedindo o fósforo de se manter em formas absorvíveis pelas plantas para o tratamento com os peletes. À semelhança do teor foliar do azoto, o teor em fósforo encontra-se fora dos valores de referência para a cultura, sendo mais evidente para o caso do tratamento com os peletes. Este facto permite adiantar que muito provavelmente o fósforo foi o factor limitante do crescimento da alface no tratamento com os peletes e a sua carência a principal causa pelo aparecimento de necroses marginais nestas alfaces.

Observaram-se igualmente diferenças significativas entre os tratamentos no que concerne aos teores de potássio na planta. Na verdade, para todas as doses testadas, há teor mais elevado deste elemento nos tratamentos com peletes, sendo neste caso significativo o efeito da dose, obtendo-se o seu acréscimo para a dose máxima. Os teores foliares encontrados estão dentro do intervalo de referência deste elemento para a cultura da alface.

À semelhança do azoto total, apresentam-se no quadro 7.19 os valores médios dos macronutrientes fósforo e potássio, expressos em mg/repolho.

Quadro 7.19 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] do fósforo e potássio totais presentes expressos em mg/repolho m.s., para os diferentes tratamentos: testemunha, lama e peletes. Os resultados seguidos da mesma letra minúscula (efeito da dose) e maiúscula (efeito do tratamento) não diferem significativamente (p<0,05) de acordo com o teste de Duncan

Tratamento	Dose t/ha	Parâmetros							
		Fósforo (P)				Potássio (K)			
		mg/repolho				mg/repolho			
Testemunha	0	A 14,3	±	1,9	A	A 218,5	±	20,5	A
Lama	6	B 24,5	±	1,8	a	B 266,9	±	30,2	a
	12	B 29,3	±	2,3	b	B 283,2	±	24,6	a
	36	B 46,4	±	2,7	c	B 372,3	±	15,5	b
Total (n=12)		33,4	±	10,1	B	307,4	±	53,1	B
Peletes	6*	A 16,5	±	0,7	a	B 273,2	±	23,3	a
	12	C 22,1	±	3,9	a	C 346,9	±	21,8	ab
	36	A 15,6	±	2,0	a	B 368,1	±	27,2	b
Total (n=12)		18,22	±	3,9	A	334,5	±	46,0	B

*anulou-se o ensaio (P6-4)

Anulando-se o efeito da diluição pela maior produção da biomassa, comprovam-se os teores foliares significativamente inferiores de fósforo na alface para o tratamento com os peletes, comparativamente com a lama, reforçando a hipótese referida deste elemento ter sido factor limitante na produção da alface para o tratamento com os peletes. Contudo suspeita-se que o mesmo seja atenuado para solos com pH ácidos. Estudos em que se avaliou o efeito fertilizante do P em diferentes tipos de lamas (entre elas, lamas tratadas com cal) quando aplicadas em dois solos com pH diferentes, concluíram que o pH ácido do solo, favorecia a solubilização dos fosfatos de cálcio, tornando o P presente na lama calada, em formas disponíveis para a planta.^{2,101}

No caso do potássio, verificou-se que as diferenças significativas inicialmente detectadas entre os tratamentos, se deviam ao efeito de diluição pela diferentes produções de biomassa, não se detectando quando analisadas ao nível do repolho. O efeito da dose no tratamento com a lama revelou-se significativo para o potássio introduzido pela lama, em particular para a dose máxima aplicada. No tratamento com os peletes não se observaram variações significativas pelo efeito da sua adição ao solo no caso dos dois macronutrientes, fósforo e potássio.

Os teores foliares dos restantes parâmetros encontram-se dentro da gama de valores de referência para esta cultura, à semelhança do potássio, não pressupondo qualquer carência ou excesso destes elementos. No que concerne à variação destes elementos em função da dose aplicada, apenas a adição dos peletes na dose máxima induziu um aumento significativo nos teores foliares de Mg e Fe. Relativamente ao tratamento com a lama, não se observaram acréscimos significativos nos teores de Ca, Mg, Fe, Mn e B por incorporação de doses crescentes do produto.

Comparando os dois tratamentos, detectaram-se diferenças significativas para os teores de B para doses superiores a 12 t/ha e de Fe para a dose máxima equivalente a 36 t/ha.

Relativamente aos teores de metais pesados nas folhas, referidos no quadro 7.20, exceptuando-se o zinco, os teores encontrados encontram-se abaixo dos limites de detecção para a metodologia adoptada.

No caso do zinco detectaram-se teores elevados deste metal na modalidade testemunha comparativamente com os restantes tratamentos. A explicação apontada é a utilização, durante o ensaio, de pesticida para combate ao míldio cujo princípio activo é o mancozebe, que é um sal do complexo Alquilenobis (ditiocarbamato) de manganésio (polimérico) com zinco.

Embora tenha havido o cuidado de aplicar quantidades idênticas de pesticida em todos os vasos, apenas o tratamento com a lama demonstrou diferenças pela adição de doses crescentes, sendo a mesma significativa para a dose máxima de 36 t/ha. No caso do tratamento com os peletes não se observaram diferenças significativas pela adição de doses crescentes. Relativamente ao efeito do tratamento, observaram-se os teores mais elevados no tratamento com os peletes, sendo os mesmos significativos para as doses 6 e 36 t/ha. Contudo, estas ilações devem ser analisadas com precaução, pelas razões referidas no parágrafo anterior.

Quadro 7.20 - Valores [média+desvio padrão (n=4)] do metais pesados presentes nas amostras de alface, para os diferentes tratamentos: testemunha, lama e peletes após a extracção pela cultura. Os resultados seguidos da mesma letra minúscula (efeito da dose) e maiúscula (efeito do tratamento) não diferem significativamente ($p<0,05$) de acordo com o teste de Duncan

Tratamento	Dose	Parâmetros								
		Zinco				Cu	Pb	Cr	Ni	Cd
	<i>t/ha</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>				<i>mg.kg⁻¹</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>
Testemunha	0	A 56,3	±	13,5	A	a)	b)	c)	d)	e)
Lama	6	B 30,4	±	4,8	a	a)	b)	c)	d)	e)
	12	B 32,9	±	3,8	a	a)	b)	c)	d)	e)
	36	B 40,6	±	3,4	b	a)	b)	c)	d)	e)
Total (n=12)		34,7	±	5,8	B	a)	b)	c)	d)	e)
Peletes	6*	A 58,8	±	25,0	a	a)	b)	c)	d)	e)
	12	B 34,8	±	2,3	b	a)	b)	c)	d)	e)
	36	A 59,4	±	5,7	ab	a)	b)	c)	d)	e)
Total (n=12)		50,3	±	16,95	A	a)	b)	c)	d)	e)
Ref ¹⁴		32,5-195								

* anulou-se o ensaio (P6-4).

a) inferior ao limite de detecção (<0,041 mg/l); b) inferior ao limite de detecção (<0,10 mg/l); c) inferior ao limite de detecção (<0,05 mg/l); d) inferior ao limite de detecção (<0,063 mg/l); e) inferior ao limite de detecção (<0,032 mg/l)

8 Conclusões

A adição de diferentes doses de cal afecta significativamente o teor de matéria seca e o pH da lama, tendo-se verificado que no caso em questão, doses de 12% de cal em massa por massa de lama fresca, são suficientes para garantir a manutenção de pH superior a 12 após um período de 90 dias. O teor de matéria seca após 24 horas aumenta pela adição de doses crescentes de cal.

A resistência à compressão adquirida pelos peletes ao fim de um período de cura de 28 dias é similar à dos fertilizantes granulados usuais, tal como verificado por ensaios de compressão uniaxial não confinada em provetes com diferentes misturas de lama+cal. Pode, por isso, antever-se dureza suficiente dos peletes para o seu acondicionamento sem problemas de geração de pó ou segregação de partículas.

A resistência é significativamente influenciada pelo período de cura, não se verificando diferenças significativas de resistência à compressão com a dosagem de cal na massa. Contudo, doses de 10 e 12% de cal viva em massa/massa lama fresca reduzem a geração de odores e a actividade fúngica à superfície dos granulados após 7, 14 e 28 dias.

A análise química comparativa entre os peletes e a lama, demonstrou que a adição de cal favorece a libertação de N, através da sua volatilização sob a forma de amoníaco (NH_3). As principais razões apontadas são o aumento do pH e o aumento da temperatura ocorrido durante o processo de mistura.

Os resultados demonstram uma diminuição significativa dos restantes parâmetros avaliados, à excepção do cálcio e da condutividade eléctrica, após a adição de cal às lamas, porém, fundamentalmente pelo efeito de diluição devido à adição de cal. No caso da matéria orgânica, a sua diminuição poderá dever-se igualmente, à perda de orgânicos voláteis para a atmosfera pelo aumento da temperatura e à intensificação do processo de mineralização e humificação pelo aumento do pH.

No caso do cálcio e da condutividade eléctrica há aumento significativo dos valores nos peletes comparativamente com os da lama. A principal razão é que a cal viva, que contém 71% de cálcio em massa, eleva a quantidade do ião Ca^{2+} resultante, com efeito directo sobre a condutividade eléctrica.

Ambos os resíduos orgânicos podem ser utilizados como correctivo orgânico, visto no teste de fitotoxicidade com a cultura da cevada não se ter notado diminuição significativa da produção de biomassa para a proporção 25% quando comparada com a testemunha. Contudo, não devem ser utilizados como componente de suportes para culturas, uma vez há um decréscimo significativo da produção para a proporção de 50%. Este decréscimo de produção observado em ambos os resíduos orgânicos testados poderá atribuir-se aos níveis sub-tóxicos dos diversos metais pesados que ambos veiculam e que interagindo entre si poderão ter provocado redução de crescimento, em especial o zinco (1327 mg/kg m.s) presente na lama e (524 mg/kg m.s.) nos peletes. Por sua vez, o elevado teor em azoto amoniacal presente na lama, poderá ter também actuado como agente de fitotoxicidade para este tratamento. No caso dos peletes aponta-se igualmente o pH elevado como agente de fitotoxicidade ao atrasar os principais metabolismos celulares.

Para ambas as proporções testadas (12,5%, 25% e 50%), não se verificaram diferenças significativas de produção de biomassa entre os resíduos orgânicos testados, mas a maior produção foi obtida para a proporção 12,5% de peletes.

Ambos os resíduos orgânicos demonstram ser importantes fontes de nutrientes e matéria orgânica indispensáveis à nutrição vegetal e à fertilidade física e química dos solos. Para a dose

máxima que foi aplicada nos ensaios com a cultura da alface, a lama veicula 1918 g/m² de matéria orgânica, 82,5 g/m² de azoto total, 210 g/m² de fósforo, 1,16 g/m² de magnésio e 135 g/m² de cálcio. Os peletes introduzem valores inferiores, embora igualmente significativos: 875 g/m² de matéria orgânica; 60 g/m² de azoto total; 60 g/m² de fósforo e 0,816 g/m² de magnésio. No caso do cálcio, os peletes contribuem com valores significativamente mais elevados que a lama desidratada, isto é, 552 g/m², devido ao processo de estabilização com a cal viva.

A cultura da alface com estes fertilizantes gera repolhos com maior peso seco do que sem eles. As diferenças devem-se sobretudo ao azoto complementar com que contribuem ambos os resíduos orgânicos.

Entre os dois resíduos orgânicos testados, a produção de biomassa é maior para o tratamento com a lama, a qual dá a produção máxima, em matéria seca, de 14,13 g/repolho para a dose máxima de lama aplicada de 36 t/ha. No caso dos peletes, a produção máxima de 9,3 g/repolho é atingida para a dose 12 t/ha. Parece que o fósforo é o elemento limitativo e o principal responsável pelas diferentes respostas da alface aos dois resíduos orgânicos. Suspeita-se, contudo, que esse efeito seja mais visível em solos neutros ou básicos, visto em solos ácidos ocorrer a solubilização dos fosfatos de cálcio, tornando o fósforo biodisponível.

Não parece haver variações significativas pela adição de doses crescentes de K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ cedidos pelos peletes e pela lama, sobre os seus teores na alface.

No caso do boro parece já não ser assim, havendo maior absorção deste elemento pela alface no tratamento com peletes em doses de 12 e 36 t/ha comparativamente com as mesmas dosagens de lama.

O zinco é tanto mais absorvido pela cultura quanto maior for a dose de lama aplicada. Este efeito não se verifica na aplicação de peletes. Estas ilações devem ter alguma prudência, pois o ensaio testemunha originou maior concentração de zinco na alface, comparativamente com as doses de lama ensaiadas e com 12 t/ha de peletes. A principal razão apontada foi a necessidade de se utilizar pesticida com vestígios de Zn para o combate ao míldio das alfaces.

No que toca à fertilidade dos solos, a adição de qualquer dos resíduos orgânicos conduz ao aumento da matéria orgânica no solo, aumentando a sua fertilidade física e química, não se verificando diferenças significativas entre os tratamentos.

O azoto mineral aumenta significativamente para as doses mais elevadas de 12 e 36 t/ha de lamas e de peletes.

A adição de lama causa um acréscimo significativo de fósforo no solo, contrariamente ao que sucede com os peletes. Tal facto poderá derivar de o fósforo precipitar em presença de cálcio (presente em teores mais elevados nos peletes) formando fosfatos bicálcicos CaHPO₄ e tricálcicos, Ca₃(PO₄)₂, que sendo formas insolúveis, não são detectados no extracto aquoso analisado.

Não se observaram acréscimos significativos nos seguintes parâmetros do solo, pela adição de doses crescentes dos resíduos orgânicos: K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, condutividade eléctrica e pH. As principais razões apontadas são o período curto do ensaio e a dissolução lenta, no caso dos peletes, que retardaram o seu efeito, não o tornando significativo.

A lama parece poluir os solos com cobre e zinco, pois é possível constatar o seu aumento com a dosagem de lamas. O mesmo não se passa quanto ao ferro e manganês, nem com a adição de peletes. Provavelmente, neste caso, a ausência de efeito poluidor deve-se à dissolução lenta dos peletes na matriz solo-planta, a que corresponde uma baixa taxa de mobilização de metais que em ambiente alcalino formam hidróxidos muito estáveis.

Podem, por isso, apresentar-se algumas características favoráveis e desfavoráveis no processo idealizado que a seguir se referem:

Vantagens:

- O esquema de tratamento desenvolvido permite melhorias das características físicas da lama com consequentes facilidades no seu embalamento, manuseio, transporte e dispersão nos solos;
- Os grânulos podem ser obtidos com dimensões e consistência idênticas às dos fertilizantes usualmente empregues na fertilização dos solos, o que se traduz numa fácil adaptação às práticas de aplicação em uso corrente;
- A aplicação de 12% de cal na mistura revela-se suficiente para garantir o cumprimento dos critérios de higienização, ao manter o pH superior a 12 durante pelo menos 3 meses e elimina os odores indesejáveis, resultantes da decomposição da matéria orgânica;
- O processo aumenta a capacidade alcalinizante dos resíduos orgânicos, abrindo a possibilidade dos peletes poderem ser utilizados simultaneamente como correctivo/condicionador do solo de modo a aumentar o seu teor de matéria orgânica e pH.
- O produto obtido é uma importante fonte de nutrientes para as plantas, nomeadamente os macronutrientes principais (sobretudo azoto), macronutrientes secundários (cálcio e magnésio) e outros elementos benéficos para a planta (boro e micronutrientes);
- O processo reduz a mobilização dos metais pesados no solo ao imobilizá-los sob formas insolúveis na matriz lama+cal, reduzindo o risco de poluição dos solos e das águas superficiais e subterrâneas;
- Trata-se duma forma de reciclagem das lamas de ETAR que é atractiva e segura para os agricultores, sem os habituais problemas no espalhamento das lamas e dos odores libertados para a vizinhança. Sob a forma granulada é mais fácil cumprir as doses a aplicar anualmente nos solos, reduzindo-se os riscos de contaminação e poluição das águas superficiais e subterrâneas pelos nitratos por fertilizações azotadas excessivas;
- O processo permite ainda que sejam estudadas novas formulações para os peletes, permitindo complementá-los com outros elementos fertilizantes em deficiência na lama original.
- Na impossibilidade da sua aplicação na agricultura, os peletes poderão ser utilizados para outros destinos finais, com consequentes vantagens de manuseio, transporte e redução de volume.

Limitações do processo de tratamento:

- Há perdas de alguns elementos fertilizantes e de matéria orgânica, pelo que nos solos e culturas com maiores necessidades destes elementos é necessário aplicar doses de granulados superiores às das lamas.
- O fósforo presente nos peletes e a sua capacidade de mobilização podem ter efeitos limitativos na produção de biomassa, sendo, por isso, necessário complementar a sua utilização com a adubação fosfatada.

9 Perspectivas futuras

Tendo em mente a melhoria da qualidade da sua utilização na agricultura, existem algumas perspectivas que se colocam, de imediato, para melhorar o carácter fertilizante dos peletes.

Para minimizar as perdas de azoto por volatilização, à semelhança do que se faz nos estrumes naturais, sugere-se que, durante o processo de mistura das lamas com cal, se adicione também superfosfato, de preferência superfosfato normal (18% P_2O_5). Esta adição pode ter ainda outras vantagens: melhor acção desinfectante e desodorizante e correcção das deficiências em fósforo.

Tirando partido do processo de mistura e do processo de extrusão, pode colocar-se igualmente a perspectiva da adição de um sal bruto ou concentrado potássico, dado o baixo teor deste elemento normalmente presente nas lamas de ETAR e a sua importância como macronutriente principal na nutrição vegetal.

Ou seja, poder-se-ia acrescentar ao diagrama processual testado, novas outras possibilidades de obter diferentes combinações de nutrientes, permitindo obter diferentes qualidades de correctivos orgânicos, consoante as necessidades de macronutrientes.

Igualmente, como perspectiva para estudos futuros, sugere-se a realização de ensaios em campo com diferentes culturas de forma a avaliar, para períodos mais longos, os principais efeitos sobre a reacção e a qualidade do solo e sobre o estado nutritivo das culturas.

Sugere-se também a realização de ensaios para avaliar a solubilização dos peletes, de forma a aferir da viabilidade da sua utilização na fertirrigação, assim como compreender melhor o seu comportamento no solo.

Um aspecto não menos importante, sobretudo de índole prática, é o da avaliação do coeficiente de higroscopicidade dos peletes. A higroscopicidade, definida como a maior ou menor extensão em que a absorção da água ocorre, apresenta bastante interesse, sobretudo ao nível do acondicionamento dos peletes, nomeadamente para a escolha das embalagens onde estes devem ser contidos.

Por último sugere-se testar a viabilidade da incorporação de cinzas resultantes da queima de biomassa, ricas em carbono, durante o processo, como um possível substituto parcial da cal utilizada.

Como se depreende, são, portanto, diversas as perspectivas que se colocam para melhorar o esquema de tratamento testado e as características do produto obtido, tendo em mente a sua aplicação na agricultura.

Contudo, convém referir que o escoamento dos bio sólidos só será possível se o produto tiver credibilidade baseada na qualidade, transparência e segurança de utilização. Os agricultores devem passar a encarar a utilização dos bio sólidos na agricultura, com confiança, valorizando-os como um produto muito valioso, não perigoso e amigo do ambiente, quando correctamente utilizado.

10 Referências bibliográficas

1. Comissão Europeia- RTD info 21, Revista da Investigação Europeia, Acedido em Março de 2005, em <http://europa.eu.int/comm/research/rtdinf21/etoc.html>
2. Akrivos, J., Manais, D., Katsara K. e Andreadakis, A.D.- Agricultural utilization of lime treated sewage sludge, Water Science of Technology, Vol. 42(9), 2000, p. 203-210.
3. Du Preez, L.A., Vande Merwe, W. e Terblance J.S.- Biossolid management at 18 wastewater treatment plants in South Africa – optimisation strategies, Water Science of Technology, Vol. 42(9), 2000, p. 7-12.
4. Vasseur, L., Shipley, W. e Ansseau, C.- Potencial for municipal sewage sludge application on agricultural lands in Quebec, J. Can., Vol. 34(3), 1999, p. 469-480.
5. Dolgen, D., Alpaslan, M.N. e Delen N.- Use of an agro-industry treatment plant Sludge on iceberg lettuce growth, Ecological Engineering, Vol. 23, 2004, p. 117-125.
6. Evans, T.- A perspective of attitudes to use and disposal of sewage sludge in Europe, now and in the future, *Comunicação apresentada no Encontro Gestão e Valorização de Lamas de ETA e ETAR's em Portugal*, Forum Lisboa, Lisboa, 27-28 Junho, 2002, 10 p.
7. Malta T.S.- **Aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos na agricultura: Estudo do caso do município de Rio de Ostras – RJ**, Rio de Janeiro, Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, 2001. Dissertação de mestrado, 67 p.
8. Directiva Comunitária n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de Junho, relativa à protecção do ambiente, em especial dos solos, na utilização de lamas de depuração. Conselho Europeu. (*JO L 181/6 de 4.07.1986*)
9. Comissão da Comunidade Europeia (CCE): Report from the Commission to the Council and the European Parliament on the implementation of community waste legislation for the period 1995-1997. COM (1999), 752 final. Brussels.
10. Decreto-Lei n.º 446/91 de 22 de Novembro. *Diário da República n.º268 – I Série A*. Resulta da transposição da Directiva Comunitária n.º 86/278/CEE e estabelece o regime de utilização na agricultura de certas lamas provenientes de estações de tratamento de águas residuais. Ministério do Ambiente e Recursos Naturais.
11. Portaria n.º 176/96 (2ª Série), de 3 de Outubro. *Diário da República n.º230/96 – II Série*, fixa os valores permitidos para a concentração de metais pesados nas lamas utilizadas na agricultura. Ministérios da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente.
12. Portaria n.º 177/96 (2ª Série), de 3 de Outubro. *Diário da República n.º230/96 – II Série*, fixa as regras sobre a análise das lamas utilizadas na agricultura. Ministérios da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente.
13. Directiva Comunitária n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio, relativa ao tratamento de águas residuais urbanas. Conselho Europeu. (*JO L 135/40 de 30.05.1991*)
14. Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de Junho. *Diário da República n.º 145/97 – I Série*. Resulta da transposição da Directiva Comunitária n.º 91/271/CEE. Ministério do Ambiente.

15. Soveral Dias J.C.- **Guia de Boas Práticas – Aplicação de lamas na agricultura**, Lisboa, Reciclamas – Multigestão Ambiental S.A, 2004, 53p + 16 anexos.
16. Agência Europeia do Ambiente (AEA) - Sludge Treatment and Disposal, Management Approaches and Experiences, Environmental Issues Series n.º. 7, ISWA'S working group on sewage & Waterworks sludge, 1997, 53 p.
17. Ministério do Planeamento (MP)- Plano de Desenvolvimento Regional (2000-2006), Lisboa, 1999, ISBN 972-601-100-0.
18. Comissão Europeia, Direcção Geral (DG) do Ambiente- Ambiente 2010: o nosso futuro, a nossa escolha: Sexto programa de acção comunitário em matéria de ambiente 2001-2010, Luxemburgo, SPOCE, 2001. Acessível em <http://europa.eu.int/comm/environment/newprg/index.htm>
19. Decreto-Lei n.º 348/98, de 9 de Novembro. *Diário da República n.º259/98 – I Série A*. Altera o Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho (transpõe para o direito interno a Directiva n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio, relativo ao tratamento de águas residuais urbanas), transpondo para o direito interno a Directiva n.º 98/15/CE, da Comissão. Ministério do Ambiente.
20. Directiva Comunitária n.º 98/15/CEE, da Comissão, de 21 de Fevereiro, revê a Directiva Comunitária n.º 91/271/CEE, do Conselho.Comissão Europeia. (*JO L 67/29 de 7.03.1998*)
21. Decreto-Lei n.º 261/99 de 7 de Julho. *Diário da República n.º 156/99 – I Série A*. Altera o Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho, com a redacção que lhe foi dada pelo Decreto-Lei n.º 348/98, de 9 de Novembro, que transpõe para o direito interno, respectivamente, as Directivas n.ºs. 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de maio, e 98/15/CE, da Comissão. Ministério do Ambiente.
22. Decreto-Lei n.º 172/2001 de 26 de Maio. *Diário da República n.º122/2001 – I Série A*. Altera parcialmente o anexo II do Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho (transpõe para o direito interno a Directiva n.º 91/271/CC, do Conselho, de 21 de Maio, relativamente ao tratamento de águas residuais urbanas). Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território.
23. Decreto-Lei n.º 149/2004 de 22 de Junho. *Diário da República n.º 145/2004 – I Série A*. Altera o Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho, que transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio, relativamente ao tratamento de águas residuais urbanas. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.
24. Despacho Conjunto n.º 309 - G/2005, de 19 de Abril. *Diário da República n.º76/2005 – II Série*. Estabelece o procedimento do processo de licenciamento das operações de valorização agrícola de lamas. Ministérios das Cidades, Administração Local, Habitação e Desenvolvimento Regional, da Agricultura, Pescas e Florestas e do Ambiente e do Ordenamento do Território.
25. Decreto-Lei n.º 235/97 de 3 de Setembro. *Diário da República n.º203/97 – I Série A*. Transpõe para o direito interno a Directiva 91/676/CEE do Conselho, de 12/12/1991, relativa à protecção das águas contra a poluição causada por nitratos de origem agrícola. Ministério do Ambiente.

26. Directiva Comunitária n.º 91/676/CEE, do Conselho, de 12 de Dezembro, relativa à protecção das águas contra a poluição causada por nitratos de origem agrícola. Conselho Europeu. (*JO L 375 de 31.12.1991*).
27. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas (MADRP)- Código de Boas Práticas Agrícolas para a protecção da água contra a poluição com nitratos de origem agrícola, Lisboa, 1997, 52 p. + 12 anexos.
28. Comissão da Comunidade Europeia (CCE)- Working Document on sludge, 3rd Draft, Brussels, 27 April, 2000. ENV.E.3/LM., 2000, 19p.
29. Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março. *Diário da República n.º 53/2004 – I Série B*. Aprova a Lista Europeia de Resíduos. Ministérios da Economia, da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas, da Saúde e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.
30. Decisão n.º 2000/532/CE, da Comissão, de 3 de Maio, substitui a Decisão 94/3/CE, que estabelece uma lista de resíduos em conformidade com a alínea a) do artigo 1.º da Directiva 75/442/CEE do Conselho relativa aos resíduos, e a Decisão 94/904/CE do Conselho, que estabelece uma lista de resíduos perigosos em conformidade com o n.º 4 do artigo 1.º da Directiva 91/689/CEE do Conselho relativa aos resíduos perigosos. Comissão Europeia. (*JO L 226 de 6.09.2000*)
31. Decisão n.º 2001/112/CE, de Comissão de 16 de Janeiro. Comissão Europeia.
32. Decisão n.º 2001/119/CE, da Comissão, de 22 de Janeiro, altera a Decisão 2000/532/CE que substitui a Decisão 94/3/CE, que estabelece uma lista de resíduos em conformidade com a alínea a) do artigo 1.º da Directiva 75/442/CEE do Conselho relativa aos resíduos, e a Decisão 94/904/CE do Conselho que estabelece uma lista de resíduos perigosos em aplicação do n.º 4 do artigo 1.º da Directiva 91/689/CEE relativa aos resíduos perigosos. Comissão Europeia. (*JO L 47 de 16.02.2001*).
33. Decisão n.º 2001/573/CE, do Conselho de 23 de Julho, altera a Decisão 2000/532/CE da Comissão no que respeita à lista de resíduos. Conselho Europeu. (*JO L 203 de 28.7.2001*).
34. Decreto-Lei n.º 488/85, de 25 de Novembro. *Diário da República n.º 271/85 – I Série*. Estabelece normas sobre resíduos sólidos. Presidência do Conselho de Ministros.
35. Decreto-Lei n.º 310/95, de 20 de Novembro. *Diário da República n.º 268/95 – I Série A*, estabelece as regras a que fica sujeita a gestão de resíduos. Ministério do Ambiente e dos Recursos Naturais.
36. Directiva Comunitária n.º. 91/156/CEE, do Conselho, de 18 de Março, altera a Directiva 75/442/CEE relativa aos resíduos. Conselho Europeu. (*JO L 78/32 de 26.03.1991*).
37. Directiva Comunitária n.º 91/689/CEE, do Conselho, de 12 de Dezembro, relativa aos resíduos perigosos. (*JO L 377/20 de 31.12.1991*).
38. Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 Setembro. *Diário da República n.º 208/97 – I Série A*. Estabelece as regras a que fica sujeita a gestão de resíduos. Ministério do Ambiente.
39. Portaria n.º 961/98 de 10 de Novembro. *Diário da República n.º 260/98 – I Série B*. Estabelece os requisitos sobre a gestão dos resíduos. Ministério do Ambiente.

40. Portaria n.º 335/97, de 16 de Maio. *Diário da República* n.º113/97 – I Série B. Relativa ao transporte de resíduos no território nacional. Ministérios da Administração Interna, do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território, da Saúde e do Ambiente.
41. Despacho n.º 8943/97, do Instituto dos Resíduos, de 9 de Outubro (II Série), identifica os guias a utilizar para o transporte de resíduos, em conformidade com o artigo 7º da Portaria n.º 335/97, de 16 de Maio. Instituto dos Resíduos.
42. Directiva Comunitária n.º 94/31/CEE, do Conselho, de 27 de Junho, altera a Directiva 91/689/CEE, relativa aos resíduos perigosos. Conselho Europeu. (*JO L 168/28 de 02.07.1994*).
43. Directiva Comunitária n.º 1999/31/CEE, do Conselho, de 26 de Abril, relativa à deposição de resíduos em aterros. Conselho Europeu. (*JO L 182 de 16.07.1999*).
44. Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio. *Diário da República* n.º119/2002 – I Série A. Estabelece o regime jurídico a que fica sujeito o procedimento para a emissão de licença, instalação, exploração, encerramento e manutenção pós-encerramento de aterros destinados à deposição de resíduos e procede à transposição para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 1999/31/CE, do Conselho de 26 de Abril. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
45. Directiva Comunitária n.º 89/369/CEE, do Conselho de 8 de Junho, relativa à prevenção da poluição atmosférica proveniente de novas instalações de incineração de resíduos urbanos. Conselho Europeu. (*JO L 163/32 de 14.06.1989*).
46. Directiva Comunitária n.º 89/429/CEE, do Conselho de 21 de Junho, relativa à redução da poluição atmosférica proveniente das instalações existentes de incineração de resíduos urbanos. Conselho Europeu. (*JO L 203/50 de 15.07.1989*).
47. Decreto-Lei n.º 352/90, de 9 de Novembro. *Diário da República* 259/90 – I Série. Estabelece o regime de protecção e controlo da qualidade do ar. Ministério do Ambiente e Recursos Naturais.
48. Portaria n.º 286/93, de 12 de Março. *Diário da República* n.º60/93 – I Série. Estabelece valores limite de concentração de poluentes na atmosfera. Ministério da Indústria e Energia e do Ambiente e Recursos Naturais.
49. Portaria n.º 125/97, de 21 de Fevereiro. *Diário da República* n.º44/97 – I SérieB. Fixa os valores de poluentes na atmosfera. Ministérios da Economia e do Ambiente.
50. Directiva Comunitária n.º 94/67/CE, do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa a incineração de resíduos perigosos. Conselho Europeu. (*JO L 365/34 de 31.12.1994*).
51. Directiva Comunitária n.º 2000/76/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro, relativa à incineração de resíduos. Parlamento Europeu e Conselho Europeu. (*JO L 327/1 de 22.12.2000*).
52. Decreto-Lei n.º 273/98, de 22 de Setembro. *Diário da República* n.º202 – I SérieA. Transpõe para o direito interno as disposições constantes da Directiva n.º 94/67/CE, do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa à incineração de resíduos perigosos. Ministério do Ambiente.

53. Decreto-Lei n.º 85/2005 de 28 de Abril. *Diário da República* n.º82/2005 - I Série A. Estabelece o regime legal da incineração e co-incineração de resíduos, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2000/76/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro. Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território.
54. Tchobanoglous, G.- **Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and Reuse**, 3rd ed./revista por George Tchobanoglous e Frank Burton, Metcalf & Eddy, Inc., McGraw-Hill International Editions, 1991, ISBN 0-07-462247-1.
55. Gonçalves, J., Leitão J.- **Tratamento, Transporte e Destino final de lamas de ETAR**, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2001. Trabalho final de curso – Licenciatura em Engenharia de Ambiente.
56. Agência Europeia do Ambiente (AEA)- Review of the selected waste streams: Sewage sludge, construction and demolition waste, waste oil, waste from coal-fired power plants and biodegradable municipal waste, Technical report n.º. 69, 2002.
57. Oliveira, M.J.S.- **Co-compostagem de lamas de estações de tratamento de águas residuais da indústria têxtil com suportes orgânicos residuais: avaliação da qualidade do composto. Qualidade dos compostos orgânicos comercializados no Entre Douro e Minho**, Porto, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Secção Autónoma de Ciências Agrárias, 2004. Relatório de Final de Curso.
58. Gonçalves, J., Leitão, J., Carvalho, M. e Matos J.S.- Produção e destino final das lamas de ETAR em Portugal. Situação Actual e Perspectivas de Evolução, *Comunicação apresentada no Encontro Nacional de Entidades Gestoras de Água e Saneamento*, ENEG, Lisboa, 2001.
59. Instituto Nacional da Água – INAG - (2005). *Inventário Nacional dos Sistemas de Abastecimento e de Águas Residuais*. Acedido em 10 de Julho de 2005, em <http://insaar.inag.pt>.
60. Krogmann, U., Boyles, L.S., Bamka, W.J., Chaiprapat, S. e Martel, C.J.- Water Environment research, Water Environmental Federation (WEF), August, 1999, p. 692-714.
61. Agência Europeia do Ambiente (AEA)- **Sistemas de Águas Residuais Urbanas – Um guia para não especialistas**, Agência Europeia do Ambiente em colaboração com a Associação Europeia da Água (EWA), Copenhaga, 1998, 117 p. + 3 anexos.
62. Russo, M.A.T.- **Tratamentos de Resíduos Sólidos**, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2003, 196p. Apontamentos das aulas.
63. Papavasiliopoulos, E.N. e Markantonatos, P.G.- Managing organic polymers in the mechanical dewatering of sludges, *Communications in 7th International Conference on Environmental Science e Technology*, Ermoupolis, Ilha de Syros, Grécia, 2001, p. 386-395.
64. Novak, J.T. e Bandak, N.- Chemical conditioning and the resistance of sludges to shear, *J. WPCF*, Vol. 61 (3), Mar, 1989, p. 327 – 332.
65. Novak, J.T. e Lynch, D.P.- The effect of shear on conditioning: Chemical requirements during mechanical sludge dewatering, Water Science of Techonology, Vol. 22 (12), 1990, p. 117 – 124.

66. Papavasiliopoulos, E.N. e Bache, D.H.- On the role of aluminium hydroxide en the conditioning of an alum sludge, Water Science of Techonology, Vol. 38 (2), 1998, p33-40. Apresentado no 19th IAWQ Biennial International Conference and Exhibition on June 24th 1998 (Sludge Management and solid waste disposal group), Vancouver, Canada, 1998.
67. Mendez, J.M., Jimenez, B. e Maya C.- Disinfection kinetics of pathogens in physicochemical sludge treated with ammonia, Water Science of Technology, Vol. 50 (9), 2004, p 67-74.
68. Catálogo RDP Technologies Inc®. “Envessel Pasteurization®”.
69. Pikaev, A.K.- Contribution of Radiation Technology to Environmental Protection, High Energy Chemistry, MAIK Nauka Interperiodica, Vol. 36 (3), May, 2002, p. 135-146.
70. Andreoli, C., Ferreira, A.C.; França, M. e Tamanini C.- Uso do biogás na secagem e higienização de lodo de esgoto em leito de secagem. *I Simpósio Latino-americano de Biossólidos*, São Paulo, 2003.
71. Catálogo Alfa-Laval®.
72. American Society of Civil Engineers (ASCE) - **Design of municipal wastewater treatment plants, Water Environment Federation (WEF)**, Volume II, WEF Manual of practice n. 8, Alexandria, 1992.
73. Catálogo Sernagiotto® BPF WR “Greenland”.
74. Catálogo Komline-Anderson®.
75. Andreoli, A.C.- **Secagem térmica de lodos de Esgoto. Determinação da humidade de equilíbrio**, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2002. Dissertação de mestrado.
76. Farinha, J.A.M.- Secagem térmica de lamas de ETAR”, *Comunicação apresentada no Encontro Gestão e Valorização de Lamas de ETA e ETAR's em Portugal*, Forum Lisboa, Lisboa, 27-28 Junho, 2003, 13 p.
77. Santos, A.D.- **Estudo das possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo**, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2003. Dissertação de mestrado.
78. Carteiro, P.- Estratégia para a valorização agrícola orgânica das lamas de ETAR's, *Comunicação apresentada no encontro “Gestão e Valorização de Lamas de ETA e ETAR's em Portugal*, Forum Lisboa, Lisboa, 27-28 Junho, 2002, 8 p.
79. Santos, J.Q.- **Fertilização – Fundamentos da utilização dos adubos e correctivos**, Mem Martins, Publicações Europa-América, Coleção Euroagro, 1991, 442 p.
80. Costa, M.M., Ferreira, M.E. e Leandro, E.M.- Fertilização Orgânica e Poluição in Solo, Água e Agricultura – A problemática em Zonas vulneráveis e em explorações pecuárias intensivas, Suplemento II da Revista “O Minho, a terra e o homem”, nº 46, 26 de Fevereiro, 2002.
81. Sullivan, D.- Fertilizing with biosolids, Oregon State University, 1998, 12 p.

82. ICON (IC Consultants Ltd) - Pollutants in urban waste water and sewage sludge, Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2001.
83. Sanepar - Companhia de Saneamento do Paraná- **Manual Técnico para Utilização Agrícola do lodo de esgoto no Paraná**, Brasil, 1997, 96p.
84. Mattigod, S.V., Sposito, G. e Page, A.L.- Factors affecting the solubility of trace metals in soils. Chemistry in the soil environment, Madison; ASA, Vol. 40, Special Publication, 1981, p202-221.
85. Marta, V.M.- **Nitrogénio e Metais Pesados em Latossolo e Eucalipto cinquenta e cinco meses após a aplicação do bio sólidos**, São Paulo, Universidade de São Paulo, Julho, 2004. Dissertação de mestrado.
86. Chagas, W.F.- **Estudo dos patogénicos e metais em lodo digerido e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da ilha do governador e da penha no estado do Rio de Janeiro**, Brasil, Fundação Oswaldo Cruz/Escola Nacional de Saúde Público, Fevereiro, 2000. Dissertação de mestrado.
87. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e Pescas (MADRP)- **Manual de fertilização das culturas**, Laboratório Químico Agrícola Rebelo de Silva, Lisboa, 2000.
88. Reg. CEE nº 2092/91 do Conselho, de 24 de Junho, relativo ao modo de produção biológico de produtos agrícolas e à sua indicação nos produtos agrícolas e nos géneros alimentícios. Conselho Europeu. (*JO L 198 de 22.7.1991*).
89. Reg. CE nº 2381/94 da Comissão, de 30 de Setembro, que altera o Regulamento (CEE) nº 2092/91 do Conselho, relativo ao modo de produção biológico de produtos agrícolas e à sua indicação nos produtos agrícolas e nos géneros alimentícios. Comissão Europeia. (*JO L 255 de 01.10.1994*).
90. Reg. CE nº 1488/97 da Comissão, de 29 de Julho, que altera o Regulamento (CEE) nº 2092/91 do Conselho relativo ao modo de produção biológico de produtos agrícolas e à sua indicação nos produtos agrícolas e nos géneros alimentícios (Anexo II). Comissão Europeia. (*JO L 202 de 30.07.1997*).
91. Decreto-Lei nº 468/71, de 5 de Novembro. *Diário da República nº 260/71 – I Série*. Revê, actualiza e unifica o regime jurídico dos terrenos incluídos no que se convencionou chamar o domínio público hídrico. Ministérios da Marinha e das Obras Públicas.
92. Domingues, H., Monteiro, O.R., Pedra, F., Amaro, J.T. e Gusmão, M.R.- Aplicação de lamas residuais urbanas em solos agrícolas. Síntese dos estudos desenvolvidos no Departamento de Ciências do Solo, da Estação agronómica Nacional – INIA, Revista das Ciências Agrárias, Vol. XXV, N.os 3 e 4, 2003, p 341-352.
93. Direcção Geral do Ambiente (DGA) - Relatório do Estado do Ambiente 1999, 2000, ISN 972-8419-49-X.
94. Andreadakis, A.D.- Treatment and disinfection of sludge using quicklime, *Proceedings of the Workshop on “Problems around sludge”*, 18-19 Novembro, Stresa, Itália 1999, 7 p.

95. Keller, P., Passamani-França, R.F., Cassini, S.T. e Gonçalves, F.R.- Disinfection of sludge using lime stabilisation and pasteurisation in a small wastewater treatment plant, Water Science of Technology, IWA Publishing, Vol. 50 N°1, 2004, p 13-17.
96. Duarte, E.C.N.F.A. e Reis, I.B.- A calagem como processo de estabilização e higienização de lamas de ETAR, *Comunicação apresentada no Encontro Gestão e Valorização de lamas de ETA's e ETAR's em Portugal*, Fórum Lisboa, Lisboa, 27-28 Junho, Portugal, 2002, 7 p.
97. Mignotte-Cadiergues, B., Maul A., Huyard A., Capizzi S. e Schwartzbrod L.- The effect of liming on the microbiological quality of urban sludge, Water Science of Technology, IWA Publishing, Vol. 43, nº 12, 2001, pp 195-200.
98. Christy, R.W.- Process and Mechanical Design considerations for sludge/lime mixing, RDP Company, Norristown, Pennsylvania, presented at the *Water Environment Federation conference "The Future Direction of Municipal Sludge Management, where we are and where we're going"*, June, 1992, 9 p.
99. Andreoli, C.V. e Carneiro, C.- Avaliação do comportamento vertical de nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal e pH em leiras de lodo de esgoto caçado, SANARE - Revista Técnica da Sanepar, Vol. 18, n 18, 2002, p 63-70.
100. Hradzira, J., Kusá, H. e Kadlcik, J.- Hygienization of Sewage Sludges by liming, *Proceedings of the 10th International Conference of the Ramiran Network, General Theme: Hygiene Safety*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovak Republic, 14-18 May, 2002 p 67-69.
101. Krogstad, T., Sogn, T.A., Asdal, A. e Sæbø A.- Influence of chemically and biologically stabilized sewage sludge on plant-available phosphorous in soil, Ecological Engineering Vol. 25, 2005, p. 51-60.
102. Instituto Superior Técnico (IST) (2005) – Mestrado em Engenharia de Conceção. Acedido em Março, em <http://in3.dem.ist.utl.pt/mscdesign/02ed/01tecmecc/file6.pdf>
103. Setor 1 (2005). *Extrusão*. Acedido em Março de 2005, em www.setor1.com.br.
104. Equipar Tecnologia Industrial (2005). *Calibras*. Acedido em Março de 2005, em www.equipartecnologia.com.br
105. George M.S.- Concrete aggregate from wastewater sludge, Concrete International Design & Construction, Vol. 8, n. 11, 1986, p. 27-30.
106. Calcidrata S.A. (2005). Acedido em 10 Agosto de 2005, em www.calcidrata.pt
107. Walker, G.M., Magee, T.R.A., Holland, C.R., Ahmad, M.N., Fox, N. e Moffatt, N.A.- Compression testing of granular NPK Fertilizers, Nutrient Cycling in Agroecosystems, Vol. 48, 1997, p 231-234.
108. NP EN 12390-1,2,3,4 (2003) *Norma Portuguesa para Ensaaios de Betão Endurecido*. Instituto Português da Qualidade.
109. Costa, M., Oliveira, J., Vasconcelos, C., Fernandes, A., Leandro E., Cunha, M. e Russo, M.- Efeito da aplicação de lama de ETAR da indústria têxtil e dos respectivos compostados na fertilidade do solo e avaliação da fitotoxicidade, a aguardar publicação na Revista de Ciências Agrárias, 2005.

110. Römcke, J.; Bauer, C. e Marschner, A.- Hazard assessment of chemical in soil. Proposed Ecotoxicological Test Strategy, Environment Science & Pollution research, 1996, pp 78-82.
111. Souteiro, M.e Baptista, M.- Proposta de Regulamentação sobre a Qualidade do Composto para Utilização na Agricultura, Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva (LQARS), Lisboa, 2001.
112. Santos, R.H.S., Silva, F., Casali V.W.D e Conde A.R.- Efeito Residual da adubação com composto orgânico sobre o crescimento e produção de alface, Pesquisa Agropecuária brasileira, Brasil, Vol. 36, n.11, Novembro, 2001, p 1395-1398.
113. Costa M.- Comunicação pessoal. Direcção Regional da Agricultura de Entre Douro e Minho, 2005.
114. Simões, A.P.- Comunicação pessoal. Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva, Lisboa (LQARS), 1997.
115. Miller, R.O.- Nitro-perchloric acid wet digestion in a open vessel, Reference Methods for Plant Analysis, Kalra, Y.E. (ed), CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA, 1998, p. 57-61.
116. Tinsley, J.- The determination of organic carbon in soil by dichromate mixture. *IV International Congress of Soil Science*, 1950, p.161-164.
117. Lucas, M.D. e Sequeira, E.M.- Determinação do boro nas águas de rega, Pedologia, 1967, p. 201-204.
118. Ryser, J.P., Gysi, Ch. e Heller, W.- Analyse de terre et interpretation en cultures speciales, Revue Suisse Viticulture et Arboriculture, 1995, p. 365-372.
119. Payot, J.M. - Methodes d'analyses de Terre, Substrats et Vegetaux. Document interne de la Station Federale de Changins, Changins, Nyon, France, 1983.
120. Silva, A.A.- Determinação do teor de água da terra a dada sucção matriz, Pedologia, 1967, p. 75-82.
121. Silva, A.A.- Método da pipeta, Pedologia, 1967, p. 120-139.
122. Allison, L.- Organic Carbon in Methods of Soils Analysis, Part 2, Chemical and Microbiologic Properties. Black, C., Evans, D., White, J., Ensminger, L.E. e Clark, F.E. (eds), American Society of Agronomy, inc., Publisher, Madison, Wisconsin, USA, 1965, p. 1367-1378.
123. Lakanen, E. e Erviö R.- A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils, Acta Agralia Fennica, 1971, p 223-232.
124. Decisão 2001/688/CE, da Comissão, de 28 de Agosto de 2001, que estabelece os critérios ecológicos para atribuição do rótulo ecológico comunitário aos correctivos de solos e aos suportes de cultura. Comissão Europeia. (*JO L 242 de 12.09.2001*).
125. NP 4396 (2002). *Norma Portuguesa para Microbiologia alimentar. Regras Gerais para contagem de Escherichia Coli. Método Corrente*. Instituto Português da Qualidade.

126. NP 870 (1988). *Norma Portuguesa para Microbiologia alimentar. Alimentos para animais. Pesquisa de Salmonella*. Instituto Português da Qualidade.
127. *SPSS for Windows Release 11.5.0* Copyright © SPSS Inc., 1989 -2002.
128. Tedesco G.M. e Gianello C.- Escolha do Correctivo de acidez do solo. Anais do 2º Seminário sobre correctivos de acidez do solo, Santa Maria, Brasil, 1989, p 108-127.
129. Delorit R., Greub L. e Ahlgrem H- Crop production, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 1984.
130. Rovira, J.S. e Pérez, B.P.- Efecto de un compost utilizado en agricultura ecológica sobre la germinación, *Proceedings II Congresso Iberoamericano e II Congresso Ibérico de Ciencias Hortícolas, Actas de horticultura*, 1997, 17 A.
131. Nouri, J., Peterson, P.J. e Alloway, B.J.- Effect of variation in harvest time on the uptake of metals by barley plants from soil amended with sludge and compost. Online Journal of Biological Sciences, Vol. 1(11), 2002, p.1056-1059.
132. Costa, M.M. & Fernandes, A.- Valorização agronómica de resíduos da Indústria Têxtil: lamas e fibras de algodão, *3as Jornadas Técnicas Internacionais de resíduos*, 24 a 26 de Outubro, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Associação Portuguesa para Estudos de Saneamento Básico, auditório do IPVC, Viana de Castelo, 2001.
133. Marschner, H.- Mineral nutrition in higher plants, Academia Press – Hacourt Brace Jovanovich Publishers, Londres, 1986.

Anexo I – Acerca *Working Document on Sludge 3rd Draft*

- **Acerca da revisão da Directiva 86/278/CEE do Conselho, de 12 de Junho de 1986, relativa à protecção do ambiente, em especial dos solos, na utilização agrícola de lamas de depuração**

Tendo em vista “regulamentar a utilização agrícola das lamas de depuração de forma a evitar efeitos nocivos sobre os solos, a vegetação, os animais e o homem, incentivando ao mesmo tempo a sua correcta utilização”, o Conselho das Comunidades Europeias adoptou a Directiva 86/278/CEE, a qual foi transposta para as legislações nacionais dos diversos países membros, o que em Portugal se fez através do Decreto-lei n.º 446/91, de 22 de Novembro, e das Portarias n.º 176/96 e 177/96 de 3 de Outubro.

Contudo, o progresso científico e tecnológico, assim como a experiência acumulada, conduziu à necessidade das autoridades comunitárias procederem à revisão da Directiva supracitada, tendo em vista a sua adequação e aperfeiçoamento.

Nesse seguimento, foi elaborado o documento “*Working Document on Sludge 3rd Draft*”, tendo em vista o estabelecimento de orientações e principais alterações a incluir numa futura revisão da Directiva actual.

Apresentam-se, sumariamente, as principais alterações propostas por este último documento de trabalho disponível sobre a matéria, nos seguintes domínios:

1 – Definições

- Lamas
- Lamas de depuração
- Lamas tratadas. A alteração desta definição é função da apresentação de um anexo onde se enumeram e descrevem sumariamente treze processos de tratamento a que as lamas devem ser submetidas para que possam ser utilizadas na agricultura (lato senso). Sete desses tratamentos são considerados convencionais e os restantes são definidos como tratamentos avançados. Estes últimos visam atingir um elevado grau de higienização das lamas.

2 – Campo de aplicação

Visando manter ou ampliar a taxa de reciclagem de lamas como matérias fertilizantes fornecedoras de matéria orgânica e de nutrientes, promove-se a ampliação do seu campo de aplicação, abrangendo as seguintes áreas:

- Silvicultura;
- Zonas verdes;
- Recuperação de solos degradados.

Por outro lado, defende que as lamas não devem ser aplicadas nas florestas, propondo-se, para estas, a introdução de várias definições. Contudo, é colocado ao critério dos diversos Estados-Membros poderem permitir a sua utilização em plantações de espécies florestais de rápido crescimento, produção de árvores de natal e outras similares, bem como na reflorestação de terrenos carenciados em nutrientes.

No caso concreto de Portugal, o flagelo dos fogos que devastam todos os anos algumas centenas de milhares de hectares de terrenos cuja única vocação é a floresta e que importa reflorestar, abre um potencial campo para aplicação dos biossólidos gerados.

Segundo o documento, os biossólidos devem ser espalhados e enterrados com as lavouras durante os trabalhos de armação dos terrenos declivosos pelo sistema de vala e cômaro ou com as gradagens com grades de discos dos terrenos mais ou menos planos que não necessitem de trabalhos especiais de defesa contra a erosão. Quando não se verifique a necessidade de realizar lavouras ou gradagens, os biossólidos deverão ser aplicados nas covas abertas para a plantação das árvores, misturados com a terra em quantidades apropriadas. Os biossólidos poderão, também, ser utilizados nos viveiros florestais, na preparação de substratos de cultura misturados, com terra e ou com outros materiais em proporções adequadas.

3 – Valores – limite

É neste domínio que se processam as principais alterações.

Na actual Directiva os valores-limite são estabelecidos em função dos metais pesados, tanto no que toca à sua concentração nas lamas como nos solos e ainda em função das quantidades a introduzir anualmente nos solos através das lamas na base de uma média de dez anos. No presente documento, para além de alterações nos valores neste mesmo âmbito, propõem-se igualmente valores-limite para micropoluentes orgânicos e para agentes patogénicos.

3.1. – Valores limite respeitantes a metais pesados nas lamas e nos solos

No quadro AI.1, AI.2 e AI.3 apresentam-se os novos valores-limite propostos para as concentrações de metais pesados nas lamas de utilização agrícola e nos solos receptores, assim como os valores-limite para as quantidades de metais pesados que é permitido incorporar anualmente nos solos, tendo como base uma média de dez anos. Apresentam-se igualmente os correspondentes valores-limite fixados pela Directiva em vigor e pela Portaria n.º 176/96 de 3 de Outubro, exceptuando o caso do crómio para a Directiva, já que não é feita a sua definição nesse documento.

Quadro AI.1 – Valores-limite das concentrações de metais pesados nas lamas de utilização agrícola (mg/kg ms)

Elementos	Portaria 176/96 (2ª Série)	Directiva 86/278/CEE	Propostos
Cádmio (Cd)	20	20 -40	10
Crómio (Cr)	1000	-	1000
Cobre (Cu)	1000	1 000 – 1750	1000
Mercúrio (Hg)	16	16 -25	10
Níquel (Ni)	300	300 – 400	300
Chumbo (Pb)	750	750 – 1200	750
Zinco (Zn)	2500	2500 – 4000	2500

Quadro AI.2 – Valores-limite das concentrações de metais pesados nos solos (mg/kg ms)

Elementos	Portaria 176/96 (2ª Série)			Directiva 86/278/CEE	Propostos		
	pH≤5.5	5.5<pH≤7.0	pH>7.0		pH≤5.5	5.5<pH≤7.0	pH>7.0
Cádmio (Cd)	1	3	4	1 – 3	0.5	1	1.5
Crómio (Cr)	50	200	300	-	30	60	100
Cobre (Cu)	50	100	200	50 – 140	20	50	100
Mercúrio (Hg)	1	1.5	2.0	1 – 1.5	0.1	0.5	1
Níquel (Ni)	30	75	110	30 – 75	15	50	70
Chumbo (Pb)	50	300	450	50 – 300	70	70	100
Zinco (Zn)	150	300	450	150 – 300	60	150	200

Quadro AI.3– Valores-limite das quantidades de metais pesados que anualmente será permitido aplicar no solo na base de uma média de dez anos (g/ha/ano)

Elementos	Portaria 176/96 (2ª Série)	Directiva 86/278/CEE	Propostos
Cádmio (Cd)	150	150	30
Crómio (Cr)	4 500	-	3 000
Cobre (Cu)	12 000	12 000	3 000
Mercúrio (Hg)	100	100	30
Níquel (Ni)	3 000	3 000	900
Chumbo (Pb)	15 000	15 000	2 250
Zinco (Zn)	30 000	30 000	7 500

No quadro AI.4 apresentam-se os valores-limite das concentrações de metais pesados nas lamas e das quantidades desses metais que serão permitidos aplicar anualmente no solo na base de uma média de dez anos, propostos para médio prazo (cerca de 2015) e para o longo prazo (cerca de 2025).

Quadro AI.4 – Valores-limite das concentrações de metais pesados nas lamas de utilização agrícola (V.L. Lamas) e das quantidades desses metais que anualmente será permitido aplicar ao solo na base de uma média de dez anos (Q.max. Lama), propostos para vigorarem a médio prazo (cerca de 2015) e a longo prazo (cerca de 2025)

Elementos	Médio Prazo (cerca de 2015)		Longo Prazo (cerca de 2025)	
	V.L. Lama (mg/kg ms)	Q.máx.Lama (g/ha/ano)	V.L. Lama (mg/kg ms)	Q.máx.Lama (g/ha/ano)
Cd	5	15	2	6
Cr	800	2 400	600	1 800
Cu	800	2 400	600	1 800
Hg	5	15	2	6
Ni	200	600	100	300
Pb	500	1 500	200	600
Zn	2 000	6 000	1 500	4 500

As elevadas reduções que são propostas para estes valores inserem-se numa estratégia global de prevenção da poluição que inclui a criação de medidas tendentes a reduzir progressivamente a quantidade de substâncias poluentes que são actualmente descarregadas na rede de esgotos urbanos e que acabam por ser retidas nas lamas.

3.2. – Valores-limite da concentração de poluentes orgânicos nas lamas de utilização agrícola

Propõem-se valores para alguns poluentes pertencentes a diversas famílias de compostos orgânicos dos quais os considerados mais perigosos incluem-se nas famílias dos hidrocarbonetos aromáticos (PAH), dos policlorobifenilos (PCB), das dioxinas e dos furanos.

3.3 – Valores-limite para os agentes patogénicos

São definidos valores para a *Salmonella* e para a *Escherichia Coli*.

4 – Outras disposições propostas

4.1. – Não poderão ter utilização agrícola, lamas que não tenham sido tratadas de acordo com qualquer um dos processos enumerados no Anexo I do documento. Como tal, deixará de ser aplicável a disposição da legislação em vigor, que permite aplicar lamas não tratadas, desde que injectadas ou enterradas no solo.

4.2 – Poderá ser dispensado, pela devida autoridade competente, o tratamento de lamas provenientes de indústrias agro-alimentares, da celulose, fibras e outras que potencialmente não contenham microorganismos patogénicos.

4.3 – Estabelece uma tabela a que deve obedecer a utilização das lamas em função do tratamento recebido (avançado ou convencional) e do tipo de cultura ou de uso do solo.

4.4 – Propõe-se uma disposição em que aos produtores de lamas seja definida a responsabilidade sobre:

- Quantidade de lamas fornecidas e a garantia da sua adequação para uso agrícola;
- A análise das lamas, envolvendo parâmetros agronómicos, metais pesados, poluentes orgânicos e microorganismos patogénicos, bem como a análise dos solos, respeitando, num caso e noutro, a frequência e as metodologias prescritas, devendo as análises serem realizadas em laboratórios acreditados;
- A implementação de um sistema que assegura a qualidade para todo o processo, envolvendo o controlo dos poluentes na fonte, o tratamento das lamas, o planeamento dos trabalhos inerentes à sua utilização agrícola, incluindo a avaliação da aptidão dos solos, o fornecimento das lamas, a sua aplicação e a prestação ao utilizador de toda a informação relevante sobre as lamas.

Anexo II – Simulação de um plano de fertilização

- **Aplicação dos resíduos orgânicos em zonas não vulneráveis à poluição com nitratos de origem agrícola**

Determinação das quantidades a aplicar na cultura da alface

Considera-se uma parcela de terreno com solo de textura média, com boa espessura efectiva e características idênticas ao solo utilizado no ensaio em vaso (Quadro AII.1), onde se pretende cultivar alface romana, prevendo-se uma dotação total de água de rega de 6 000 m³/ha, a qual se considera estar isenta de nitratos. Não tendo sido determinados os metais pesados no solo inicial, considera-se que os seus teores se encontram bastante abaixo dos valores-limite fixados pela Portaria n.º 176/96.

As características gerais do terreno, a variedade da alface a cultivar, a disponibilidade de água de rega e a possibilidade de realizar na devida oportunidade e adequadamente as diversas operações culturais permite considerar como realista a produção de 20 toneladas por hectare. No quadro AII.2 apresenta-se os valores referência de nutrientes no solo expressos em kg/ha recomendados para a cultura da alface.

Quadro AII.1 - Características do solo

Parâmetro		Valor
Densidade do solo	g/cm ³	1,53
pH (H ₂ O)		7,6
Matéria orgânica	% m.s.	0,7
Azoto mineral	ppm N m.s.	14
Fósforo assimilável	ppm P ₂ O ₅ m.s.	2
Potássio assimilável	ppm K ₂ O m.s.	9

Quadro AII.2 - Valores de referência de nutrientes no solo, para a cultura da alface, expressos em kg/ha¹⁴

Cultura	Produção t/ha	N (N _{ref.})	P ₂ O ₅ (P _{ref.})	K ₂ O (K _{ref.})
Alface	20	60	20	100

Dado os valores extremamente baixos de nutrientes existentes no solo, considerou-se para efeitos de fertilização recomendada para a produção esperada, os valores referidos no quadro anterior, ou seja, para os nutrientes principais e por hectare, 60 kg de N, 20 kg de P (P₂O₅), 100 de K (K₂O).

Para fazer face às necessidades de nutrientes da cultura da alface, recorrendo aos dois tipos de resíduos orgânicos testados (Quadro AII.3 e Quadro AII.4), faz-se em seguida uma determinação comparativa das quantidades a aplicar de cada um deles na cultura da alface

Quadro AII.3 - Características dos resíduos orgânicos utilizados no plano de fertilização da cultura da alface, expressos na matéria seca a 105 °C

Parâmetro		Peletes	Lama
Matéria seca	%	68,73	42,5
Matéria orgânica	%	24,3	53,3
pH		12,3	6,2
Azoto total	% m.s.	1,67	2,29
Azoto nítrico ^a	% N	0,0096	2,3088
Azoto amoniacal	% N	0,0184	0,0212
Fósforo total	% P	1,7	5,9
Potássio total	% K	0,032	0,104
Cálcio Total	% Ca	15,3	3,7
Magnésio total	% Mg	2,3	3,2

^a O valor foi estimado segundo a seguinte expressão:
Azoto nítrico= Azoto mineral – Azoto amoniacal

Quadro AII.4 - Teor de metais pesados (expresso em ppm na matéria seca a 105 °C) presentes nos resíduos orgânicos considerados

Metais pesados			
Cádmio (Cd)	ppm	(a)	(a)
Crómio (Cr)	ppm	14,6	90,7
Cobre (Cu)	ppm	132,5	309,3
Mercúrio (Hg)	ppm	5,3	12,0
Níquel (Ni)	ppm	19,0	39,4
Chumbo (Pb)	ppm	97,5	135,1
Zinco (Zn)	ppm	524,2	1326,7

^a inferior ao valor de limite de detecção do elemento pelo espectrofotómetro de absorção atómica (<0,032 mg/l)

Para ambos os resíduos orgânicos, os teores de metais pesados (Quadro AII.4) estão abaixo dos valores-limite estabelecidos pela Portaria 176/96, permitindo a sua utilização na fertilização do solo.

Tendo todo o interesse em tirar proveito máximo do bio-sólido/lama como fertilizante fornecedor de azoto, a máxima quantidade que poderá aplicar-se será igual ao menor dos valores, Q_x , em t/ha de matéria seca, calculado pela seguinte expressão:

$$Q_x = 1000 \times VL / C_{mp}$$

sendo que,

Q_x – quantidade máxima de resíduo orgânico que poderá aplicar-se no solo, expressa em t/ha de matéria seca.

VL – valor limite da quantidade de metal pesado que poderá ser introduzida no solo em kg/ha/ano, definido pela Portaria 176/96 (2ª Série).

C_{mp} – concentração no metal pesado no resíduo orgânico, expressa em ppm m.s.

Efectuando esse cálculo para os diversos metais pesados, obtêm-se os valores que figuram nas duas últimas colunas para os peletes e para a lama (Quadro AII.5).

Quadro AII.5 - Valores-limite e quantidades máximas de resíduo orgânico a aplicar, expressos na matéria seca a 105 °C

Metais Pesados	VL	Q_x peletes	Q_x lama
	(kg/ha/ano)	(t/ha m.s.)	(t/ha m.s.)
Cádmio	0,15	(a)	(a)
Crómio	4,5	308,2	49,6
Cobre	12	90,6	38,8
Mercúrio	0,10	18,9	8,3
Níquel	3	157,9	76,1
Chumbo	15	153,8	111,0
Zinco	30	57,2	22,6

O metal pesado mais limitante para ambos os resíduos orgânicos é o mercúrio, cujo valor limite de 0,10 kg/ha/ano é atingido com 18,9 t/ha m.s. peletes e 8,3 t/ha lama m.s.

Aplicando a seguinte expressão:

$$Q = Q_s / F_H$$

Sendo,

Q – quantidade de resíduo orgânico expresso em produto fresco

Q_s – quantidade de resíduo orgânico, expresso em matéria seca

F_H – factor de humidade, expresso em massa kg matéria seca / kg produto fresco.

Temos: 27,5 t/ha peletes húmido e 19,5 t/ha lama húmida que convirá arredondar para 27 t/ha e 19 t/ha, respectivamente.

Agora, vejamos se é suficiente para satisfazer as necessidades da cultura em azoto, fósforo e potássio

Fertilização azotada:

A quantidade de N_x , de azoto disponibilizado pelo resíduo orgânico no primeiro ano, em kg/ha, será dado pela seguinte expressão:

$$N_x = Q \times F_H \times N_d$$

Em que:

Q – quantidade de azoto presente no resíduo orgânico, expressa em t/ha.

F_H – factor de humidade, expresso em massa kg matéria seca / kg resíduo orgânico fresco.

N_d – azoto do resíduo orgânico, expresso em kg/t m.s., utilizável pela cultura no primeiro ano da sua aplicação.

O azoto utilizável pela cultura no primeiro ano, N_d , determina-se pela seguinte expressão:

$$N_d = N_{nit} + k_1 \times N_{am} + k_2 \times k_3 \times N_{org}$$

Em que:

N_{nit} – azoto nítrico ($N-NO_3$), expresso em kg/t m.s. do resíduo orgânico a aplicar

k_1 – coeficiente de utilização do azoto amoniacal do resíduo orgânico. Para o efeito poderá ser considerado igual a 0,5 para ambos os resíduos orgânicos.

N_{am} – azoto amoniacal ($N-NH_4$), expresso em kg de N/t m.s. do resíduo orgânico.

k_2 – taxa de mineralização do bio sólido no primeiro ano de aplicação. Para o efeito considerou-se 0,3 para ambos os resíduos orgânicos.

k_3 – fracção do azoto orgânico mineralizado durante o ano, que se estima ficar disponível durante o período vegetativo da cultura (podemos admitir que cerca de dois terços do azoto orgânico mineralizado durante o ano ocorra no período primavera-estival em que se desenvolve a cultura).

N_{org} – azoto orgânico ($N_t - (N_{nit} + N_{am})$), expresso em kg de N/t m.s. do bio sólido.

No quadro AII.6, apresentam-se os cálculos efectuados para os dois resíduos orgânicos considerados:

Quadro AII.6 - Fertilização azotada

Parâmetro	Peletes	Lama
Azoto utilizável pela cultura no primeiro ano, N_d , expresso em kg/t m.s	$N_d = 0,096 + 0,5 \times 0,18 + 0,3 \times 2/3 \times 16,52 = 3,49$	$N_d = 2,31 + 0,5 \times 0,212 + 0,3 \times 2/3 \times 13,713 = 6,53$
Azoto disponibilizado pelo resíduo orgânico no primeiro ano, N_x , em kg/ha de N	$N_x = 27 \times 0,6873 \times 3,49 = 64,76 \approx 65$	$N_x = 19 \times 0,425 \times 6,53 = 52,72 \approx 53$
Défice ($N_{ref} - N_x$) no primeiro ano, expresso em kg/ha de N	$N_{ref} - N_x = 60 - 65 = -5$	$N_{ref} - N_x = 60 - 53 = 7$

Pela análise do quadro depreende-se que não existe um défice significativo de N pela aplicação de ambos os resíduos orgânicos, observando-se no caso dos peletes um excedente de 5 kg/ha de N. Como tal não existe necessidade de utilizar outras matérias fertilizantes para correcção do teor deste elemento no solo.

Fertilização fosfatada

A quantidade de fósforo do resíduo orgânico utilizável pela cultura, P_d , em kg/ha de P_2O_5 é, dada pela expressão:

$$P_d = 0,5 \times P_t \times (1 + t \times f)$$

Em que,

P_d – fósforo fornecido pelo resíduo orgânico em condições de poder ser facilmente utilizado pela cultura, expresso em kg/ha de P_2O_5

P_t – fósforo total do biossólido, expresso em kg/ha de P_2O_5

t – taxa de mineralização do fósforo orgânico no ano de aplicação do resíduo orgânico, em percentagem expressa como fracção

f – fracção do fósforo orgânico, mineralizado durante um ano, que se estima ficar disponível para a cultura durante o seu período vegetativo.

O fósforo total do resíduo orgânico, P_t , é dado pela seguinte expressão:

$$P_t = 10 \times Q \times F_H \times C_P$$

Em que,

P_t – fósforo total, expresso em kg/ha de P_2O_5

Q – biossólido húmido aplicado ao solo, expresso em t/ha

F_H – factor de humidade, expresso em massa kg matéria seca / kg resíduo orgânico fresco

C_P – teor de fósforo total do resíduo orgânico, expresso em % P_2O_5 na m.s.

Sendo a fracção do fósforo orgânico mineralizado durante o período vegetativo da cultura diminuta relativamente à fracção mineral que desde o início está presente nos biossólidos, poderemos, com alguma segurança, simplificar a expressão, ficando apenas:

$$P_d = 0,5 \times P_t$$

para efeitos de contabilização do fósforo do resíduo orgânico no plano de fertilização.

No caso dos peletes, e para contabilizar a precipitação do fósforo pela existência de cálcio em quantidades suficientes, promovendo a sua precipitação sobre sais insolúveis, e, como tal, sob formas não assimiláveis pela planta, considerou-se que apenas 50% do fósforo passível de ser utilizável pela planta, P_d é efectivamente assimilado por esta:

$$P_d = 0,5 \times 0,5 \times P_t$$

No quadro AII.7, apresentam-se os cálculos efectuados para os dois resíduos orgânicos considerados:

Quadro AII.7 - Fertilização fosfatada

Parâmetro	Peletes	Lama
Fósforo disponibilizado pelo resíduo orgânico, P_t , em kg/ha de P_2O_5	$P_t = 10 \times 27 \times 0,687 \times 3,85 = 714,14$	$P_t = 10 \times 19 \times 0,425 \times 13,5 = 1090,13$
Fósforo utilizável pela cultura no primeiro ano, P_d , expresso em kg/ha de P_2O_5	$P_d = 0,5 \times 0,5 \times 714,14 = 178,5 \approx 179$	$P_d = 0,5 \times 1090,13 = 545,06 \approx 545$
Défice ($P_{ref} - P_d$) expresso em kg/ha de P_2O_5	$P_{ref} - P_d = 20 - 179 = -159$	$P_{ref} - P_d = 20 - 545 = -525$

Verifica-se que a quantidade de fósforo utilizável pela cultura, fornecida quer pelos peletes, quer pela lama, ultrapassa substancialmente a dose recomendada. Haverá, pois, um excedente que irá aumentar as reservas de fósforo do solo com reflexo nas doses recomendadas deste nutriente nos anos seguintes, que decrescerão significativamente.

Contrariamente ao azoto que é extremamente solúvel, o fósforo apresenta baixa mobilidade em grande maioria dos solos, sendo menores os riscos de contaminação e eutrofização das águas subterrâneas e superficiais com este elemento.

Fertilização potássica:

O potássio presente nos resíduos orgânicos encontra-se, na sua totalidade, em formas assimiláveis pelas plantas, sendo a mesma definida pela seguinte expressão:

$$K = 10 \times Q \times F_H \times C_K$$

Em que,

K –potássio total, imediatamente assimilável, em kg/ha de K₂O;

Q –quantidade de resíduo orgânico húmido, aplicado ao solo, em t/ha;

F_H – factor de humidade, expresso em % matéria seca

C_K – teor de potássio total do biossólido, expresso em % de K₂O na m.s.

No quadro AII.8, apresentam-se os cálculos efectuados para os dois resíduos orgânicos considerados:

Quadro AII.8 - Fertilização potássica

Parâmetro	Peletes	Lama
Potássio utilizável pela cultura no primeiro ano, K, expresso em kg/ha de K ₂ O	$K = 10 \times 27 \times 0.687 \times 0.08 = 0,15$	$K = 10 \times 19 \times 0.425 \times 0.25 = 20,19 \approx 20$
Défice (K _{ref.} – K) expresso em kg/ha de K ₂ O	$K_{ref} - K = 100 - 0,15 = 99,75$	$K_{ref} - K = 100 - 20 = 80$

Do quadro AII.8, depreende-se existir um défice para ambos os resíduos orgânicos, que deverá ser coberto recorrendo a adubos potássicos nas quantidades em falta.

Anexo III – Resultados obtidos para o ensaio P6/4 (outlier)

Nos quadros AIII.1, AIII.2 e AIII.3 apresentam-se os valores dos parâmetros avaliados na cultura da alface para o ensaio P6/4, os valores médios do tratamento com os peletes (6 t/ha) e o intervalo considerado para validar o ensaio P6/4. Uma vez que, à exceção do zinco, todos os parâmetros analisados estão fora do intervalo adoptado optou-se por anular este ensaio, para cálculo dos valores representativos deste tratamento (ensaio P6).

Na figura AIII.1 apresenta-se o desenvolvimento radicular do ensaio P6/4 e o desenvolvimento radicular característico deste tratamento (P6). O atrofiamento radicular observado no ensaio P6/4 reforça-o como sendo não representativo deste tratamento (P6).

Quadro AIII.1 - Peso fresco e peso seco (105°C) referentes ao ensaio P6/4, valores médios [média+desvio padrão (DP) + coeficiente de variação de Pearson (CVP); n=3 (sem o ensaio P6/4)] e intervalo considerado (média ± 1,5 DP)

Tratamento	Dose t/ha	Parâmetros							
		Peso fresco				Peso Seco			
		g				g			
		Média		DP	CVP(%)	Média		DP	CVP(%)
Ensaio	(n=1)	38,6		n.a.	n.a.	2,6		n.a.	n.a.
Peletes 6 t/ha	(n=3)	62,4	±	5,7	9,1	7,4	±	0,7	9,0
Intervalo considerado (Média ± 1,5 DP)		Limite Inferior		Limite Superior		Limite Inferior		Limite Superior	
		53,9		70,9		6,4		8,4	

Quadro AIII.2 - Teores foliares do ensaio P6/4, valores médios (valores expressos na matéria seca a 105°C) [média+desvio padrão (DP) + coeficiente de variação de Pearson (CVP); n=3 (sem o ensaio P6/4)] e intervalo considerado (média ± 1,5 DP)

Tratamento	Dose	Parâmetros															
		N total			P			K			Ca						
	t/ha	mg/g			µg/g			mg/g			mg/g						
		Média		DP	CVP (%)	Média		DP	CVP (%)	Média		DP	CVP (%)				
Ensaio	(n=1)	40,7		n.a.	n.a.	4,3		n.a.	n.a.	17,5		n.a.	n.a.				
Peletes 6 t/ha	(n=3)	16,8	±	1,06	6,3	2,3	±	0,2	8,7	37,1	±	0,2	0,5	10,4	±	1,18	11,3
Intervalo considerado (Média ± 1,5 DP)		Limite Inferior		Limite Superior		Limite Inferior		Limite Superior		Limite Inferior		Limite Superior		Limite Inferior		Limite Superior	
		15,21		18,39		2		2,6		36,8		37,4		8,63		12,17	
Ref ¹¹⁴		42-112				4-9				39-98				8,8-20			
		Mg				Fe				Mn				B			
		mg/g				µg/g				µg/g				µg/g			
		Média		DP	CVP (%)	Média		DP	CVP (%)	Média		DP	CVP (%)	Média		DP	CVP (%)
Ensaio	(n=1)	4		n.a.	n.a.	123,2		n.a.	n.a.	82,1		n.a.	n.a.	60,2		n.a.	n.a.
Peletes 6 t/ha	(n=3)	2,4	±	0,12	5	75,2	±	6,04	8	44,1	±	2,66	6	39,1	±	7,24	18,5
Intervalo considerado (Média ± 1,5 DP)		Limite Inferior		Limite Superior		Limite Inferior		Limite Superior		Limite Inferior		Limite Superior		Limite Inferior		Limite Superior	
		2,22		2,58		66,14		84,26		40,11		48,09		28,24		49,96	
Ref ¹¹⁴		3,6-8,8				56-580				30-198				21,6-65			

Quadro AIII.3 - Teores de metais pesados presentes na alfaca para o ensaio P6/4, valores médios (valores expressos na matéria seca [média+desvio padrão (DP) + coeficiente de variação de Pearson (CVP) n=3 (sem o ensaio P6/4)]) e o intervalo considerado (média ± 1,5 DP)

Tratamento	Dose	Parâmetros								
		Zinco		Cu	Pb	Cr	Ni	Cd		
	<i>t/ha</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>		<i>mg.kg⁻¹</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>	<i>mg.kg⁻¹</i>		
		Média		DP	CVP(%)					
Ensaio	(n=1)	95,3				a)	b)	c)	d)	e)
Peletes 6 t/ha	(n=3)	58,8	±	24,9	42,3	a)	b)	c)	d)	e)
Intervalo considerado (Média ± 1,5 DP)		Limite inferior		Limite Superior		a) inferior ao limite de detecção (<0,041 mg/l) b) inferior ao limite de detecção (<0,10 mg/l) c) inferior ao limite de detecção (<0,05 mg/l) d) inferior ao limite de detecção (<0,063 mg/l) e) inferior ao limite de detecção (<0,032 mg/l)				
		21,5		96,2						
Ref ¹⁴		32,5-195								



Figura AIII.1 – Diferenças entre o desenvolvimento radicular do ensaio P6/4 e um exemplo característico do tratamento com peletes (6 t/ha)