

Co-Compostagem de Lamas e Biorresíduos em Unidade Piloto: Avaliação Técnica e Ambiental para Aplicação Agroflorestal

Beatriz Bettencourt^a, José Gomes-Laranjo^{a,b}, Teresa Pinto^{a,b}, Isabel Bentes^{a,c}, Luís Teixeira^d, Paulo Praça^d, Rafael Vaz^d, Carlos Afonso Teixeira^{a,b}*

^a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801, Vila Real, Portugal

^b CITAB - Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas, Quinta de Prados, 5000-801, Vila Real, Portugal

^c C-MADE - Centro de Materiais e Tecnologias de Construção, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

^d Resíduos do Nordeste, EIM, S.A., Rua Fundação Calouste Gulbenkian, 5370-340 Mirandela, Portugal

RESUMO

A co-compostagem de lamas e biorresíduos para obtenção de biofertilizantes, explorada no projeto GREENValue, teve por objetivo otimizar processos através de estratégias inovadoras de estruturação e monitorização. No desenvolvimento da unidade piloto, foram implementados instrumentos de integração de dados para potencializar a eficiência operacional. Adotando uma estruturação alternada de camadas de lamas com materiais de revestimento, duas proporções de “lamas: biorresíduos” foram avaliadas. A monitorização incluiu parâmetros essenciais, com destaque para temperatura, humidade e relação C/N (carbono/azoto). Os resultados preliminares, representados por variações de temperatura, sugerem distintos padrões termofílicos nas proporções de lamas e resíduos avaliadas, com a pilha 1:2 a demonstrar uma possível maturação prematura. Os dados preliminares obtidos nas análises físico-químicas e microbiológicas sugerem que os compostos cumprem os requisitos legais aplicáveis e demonstram potencial para utilização em contextos agroflorestais. Estas conclusões contribuirão para a produção de compostos em conformidade com a legislação nacional e com potencial agronómico comprovado, destinados à revitalização de áreas desertificadas, contribuindo para a economia circular.

Palavras-Chave: Co-compostagem, biofertilizantes, desertificação, economia circular

doi: 10.22181/aer.2025.0203

*Autor para correspondência
E-mail: cafonso@utad.pt

Co-Composting of Sludge and Organic-Waste in a Pilot Unit: Technical and Environmental Assessment for Agroforestry Application

Beatriz Bettencourt^a, José Gomes-Laranjo^{a,b}, Teresa Pinto^{a,b}, Isabel Bentes^{a,c}, Luís Teixeira^d, Paulo Praça^d, Rafael Vaz^d, Carlos Afonso Teixeira^{a,b}*

^a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801, Vila Real, Portugal

^b CITAB - Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas, Quinta de Prados, 5000-801, Vila Real, Portugal

^c C-MADE - Centro de Materiais e Tecnologias de Construção, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

^d Resíduos do Nordeste, EIM, S.A., Rua Fundação Calouste Gulbenkian, 5370-340 Mirandela, Portugal

ABSTRACT

The co-composting of sludge and organic-waste for the production of biofertilizers, explored in the GREENValue project, aimed to optimize processes through innovative structuring and monitoring strategies. In the development of the pilot unit, tools for efficient data integration were implemented to enhance operational efficiency. Adopting an alternating layering structure with covering materials, two “sludge:organic waste” ratios were evaluated. Monitoring included essential parameters, with a focus on temperature, humidity, and C/N ratio (carbon/nitrogen ratio). Preliminary results, represented by temperature variations, suggest distinct thermophilic patterns in the evaluated sludge and organic waste ratios, with the 1:2 pile indicating a possible premature maturation. Preliminary data from physicochemical and microbiological analyses suggest that the compost meet applicable legal requirements and show potential for use in agroforestry contexts. These conclusions will contribute to the production of compost compliant with national legislation and with proven agronomic potential in the revitalization of desertified areas, furthering the circular economy.

Keywords: Co-composting, biofertilizers, desertification, circular economy.

doi: 10.22181/aer.2025.0203

* Corresponding author
E-mail: cafonso@utad.pt

1 Introdução

A gestão sustentável das lamas provenientes de estações de tratamento de águas residuais (ETAR), bem como dos resíduos orgânicos urbanos, constitui um dos principais desafios para a transição para a economia circular em Portugal. Estes fluxos, frequentemente tratados como resíduos de difícil valorização, possuem, no entanto, um potencial significativo enquanto recursos para a regeneração de solos e substituição parcial de fertilizantes sintéticos. A valorização material destas matérias orgânicas alinha-se com os princípios da economia circular definidos pelas políticas europeias de resíduos, contribuindo para a redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), a conservação de nutrientes e a melhoria da qualidade dos solos (Nordahl et al., 2020).

A co-compostagem, entendida como o processamento conjunto de lamas de ETAR com biorresíduos urbanos, tem vindo a afirmar-se como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente benéfica. Este processo biológico aeróbio promove a degradação controlada da matéria orgânica, conduzindo à produção de um composto higienizado e estabilizado, com potencial de aplicação agrícola e florestal (Nguyen et al., 2020). A combinação sinérgica entre lamas, geralmente ricas em azoto e humidade, e biorresíduos, com elevado teor de carbono, permite ajustar a relação C/N da mistura, otimizando as condições microbiológicas para o processo e melhorando a qualidade do composto final (Anwar et al., 2015; Mortula et al., 2016; Grgas et al., 2023).

Apesar do crescente corpo de evidência científica internacional, a aplicação sistemática da co-compostagem em contexto operacional português permanece limitada, com a maioria dos estudos confinados a ensaios laboratoriais ou a pequenas experiências agrícolas. Faltam ainda dados empíricos que demonstrem a exequibilidade técnica da co-compostagem em instalações existentes, bem como o seu impacto ambiental efetivo - nomeadamente ao nível da mitigação das emissões de GEE associadas ao desvio de resíduos orgânicos do aterro (Gao et al., 2022; Pereira e Silva, 2023).

O presente estudo procura colmatar essa lacuna, explorando a co-compostagem de lamas de ETAR com biorresíduos urbanos em escala piloto e sob condições operacionais reais, utilizando infraestruturas existentes na região do Nordeste Transmontano, Portugal. A abordagem visa testar diferentes proporções de mistura e analisar o desempenho do processo em termos técnicos, ambientais e agronómicos, contribuindo para a valorização de fluxos urbanos e agroindustriais e para a recuperação de solos empobrecidos - em consonância com as estratégias nacionais e europeias de descarbonização, economia circular e combate à desertificação (Resíduos do Nordeste, 2021; Bettencourt et al., 2023; Teixeira et al., 2024).

2 Objetivos

O presente estudo teve como principais objetivos avaliar a viabilidade técnica, ambiental e agronómica da co-compostagem de lamas de ETAR com biorresíduos urbanos, em escala piloto e em condições reais de operação. Pretendeu-se, ainda, analisar a conformidade legal e a qualidade final dos compostos para aplicação em solos degradados, estimar o potencial de mitigação de emissões de gases com efeito de estufa (GEE), face ao cenário convencional de deposição em aterro, e avaliar a viabilidade operacional da solução na Unidade de Tratamento Mecânico e Biológico (UTMB) da empresa Resíduos do Nordeste.

3 Materiais e Métodos

A metodologia adotada foi estruturada de forma a garantir rigor técnico, coerência com os objetivos propostos e possibilidade de replicação em contextos operacionais semelhantes. A avaliação inicial das instalações foi essencial para otimizar os sistemas de tratamento. Foram abordadas questões logísticas relativas ao encaminhamento e receção das lamas da ETAR de Mirandela, caracterização físico-química e microbiológica das matérias-primas, estruturação e monitorização das pilhas de compostagem, bem como o refinamento e análise do composto maturado, proporcionando uma visão integrada do protocolo adotado.

3.1 Modelo conceptual do processo operacional da co-compostagem

O projecto-piloto de co-compostagem decorreu na UTMB do Parque Ambiental do Nordeste Transmontano, explorada pela empresa intermunicipal Resíduos do Nordeste. Esta infraestrutura (Figura 1) foi selecionada como unidade piloto pelas suas características físicas e capacidade instalada, permitindo integrar fluxos de resíduos urbanos indiferenciados e lamas de depuração. Inicialmente, procedeu-se a uma análise técnica da UTMB, avaliando-se as condições físicas das zonas de receção, processamento e armazenamento, bem como a logística de transporte de lamas entre a ETAR de Mirandela e a UTMB (Bettencourt et al., 2023; Teixeira et al., 2024).

Na ETAR, as lamas (primárias e secundárias) passam por espessamento e digestão anaeróbia, reduzindo volume, carga orgânica e patogénicos. Posteriormente, são desidratadas por filtro-prensa, diminuindo o teor de água e facilitando o transporte. Apesar da desidratação, preservam elevado teor de humidade e potencial biodegradável, exigindo cuidados no transporte para evitar odores e derrames. O transporte é efetuado em camiões herméticos, assegurando segurança ambiental e preservação das características do material.

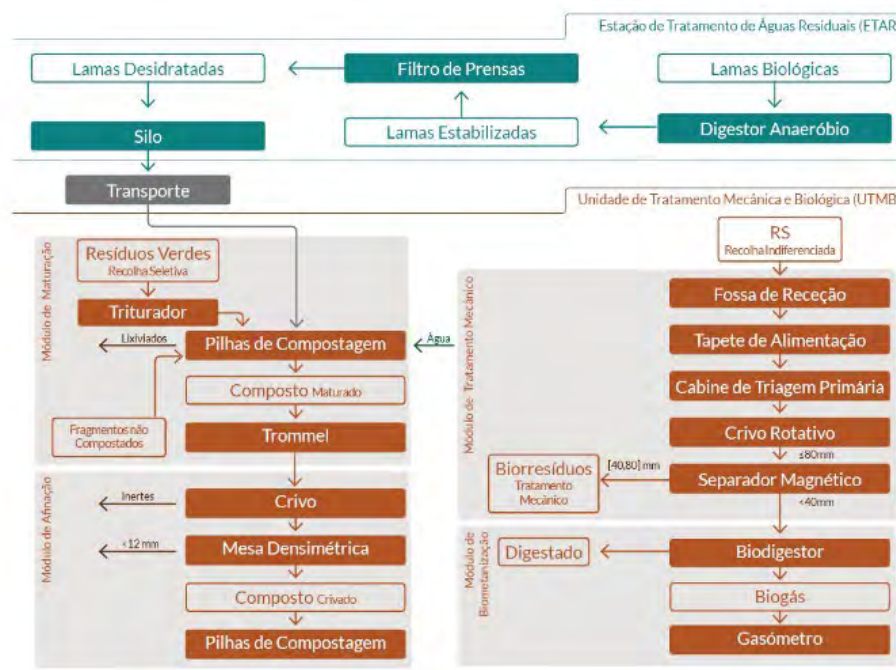


Figura 1. Fluxograma logístico das operações

À chegada à UTMB, as lamas são pesadas, registadas e acondicionadas temporariamente. São recolhidas amostras representativas para análises laboratoriais na Universidade de Trás-os-

Montes e Alto Douro (UTAD), verificando-se parâmetros de segurança e conformidade legal. Confirmada a sua adequação, as lamas seguem para co-compostagem com biorresíduos.

Os biorresíduos consistiram na fração orgânica proveniente da triagem mecânica e manual dos resíduos urbanos indiferenciados (restos alimentares e resíduos verdes), recolhidos na própria UTMB. Este material, com elevado teor de carbono, funcionou como estruturante, equilibrando a relação C/N da mistura.

3.2 Estratégias de estruturação e monitorização da co-compostagem

A seleção das proporções de mistura foi crítica, dado o impacto direto sobre a eficiência da compostagem e a qualidade do produto final. Com base em análises laboratoriais prévias, determinaram-se duas proporções experimentais: 1:2 e 1:3 (lamas: biorresíduos, em peso fresco). As lamas, ricas em azoto, apresentavam baixa relação C/N, ao passo que os biorresíduos tinham teor elevado de carbono.

Os materiais foram previamente preparados: homogeneização das lamas e trituração dos biorresíduos. A humidade inicial foi mantida entre 50–85%, valores adequados para início da compostagem. As misturas preparadas garantiram uma relação C/N global entre 25:1 e 30:1, considerada ótima.

3.3 Ensaio piloto: estruturação e monitorização

O ensaio decorreu entre março e dezembro de 2023, em duas pilhas estáticas ao ar livre (1:2 e 1:3), correspondentes à segunda fase do processo, posterior à compostagem inicial em túneis com arejamento forçado. As pilhas tinham cerca de 2 × 2 × 1,5 m e foram estruturadas em camadas alternadas, com quantidades proporcionais de lamas e biorresíduos (Figura 2), conforme caracterizado na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização das pilhas experimentais de co-compostagem: proporções de mistura e massas

Pilha	Proporção (lamas: biorresíduos)	Massa inicial (lamas + biorresíduos)
Pilha 1:2	1:2 (1 parte de lamas : 2 partes de biorresíduo)	~750 kg (cerca de 250 kg de lamas + 500 kg de biorresíduos)
Pilha 1:3	1:3 (1 parte de lamas : 3 partes de biorresíduo)	~1000 kg (cerca de 250 kg de lamas + 750 kg de biorresíduos)

A monitorização incluiu temperatura (com sondas centrais e superficiais), humidade gravimétrica, e avaliação indireta da oxigenação. Foram realizados volteios quinzenais (cerca de 18 no total), ajustando-se humidade e aeração sempre que necessário.

A pilha 1:2 registou um pico térmico mais rápido e arrefeceu mais cedo. Já a pilha 1:3 manteve temperaturas elevadas por mais tempo. Estas dinâmicas térmicas serão analisadas detalhadamente na secção de Resultados.



Figura 2. (A) Estruturação de pilhas; (B) Estrutura final das pilhas

3.4 Afinação e análise laboratorial

Após 60 dias de compostagem ativa, seguiu-se uma fase de maturação de cerca de sete meses, com reviramentos mensais. No final, o volume reduziu-se em aproximadamente dois terços. O composto maturado foi peneirado com malha de 20 mm e submetido a separação densimétrica, permitindo a remoção de contaminantes inorgânicos (Figura 3). Os materiais inertes recuperados foram encaminhados para utilização como material de cobertura em aterro.



Figura 3. Afinação e crivagem do composto: (A) Trommel; (B) Crivo; (C) Mesa densimétrica; (D) Armazenamento

As amostras do composto final foram analisadas segundo metodologias normalizadas, com avaliação de parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, macro e micronutrientes), metais pesados e indicadores sanitários (*Escherichia coli*, *Salmonella* spp.). Os

resultados confirmaram que ambos os compostos cumpriram os critérios legais de qualidade, sendo classificados como corretivos orgânicos de Classe II A, de acordo com o Decreto-Lei n.º 30/2022, que estabelece o regime jurídico de matérias fertilizantes, e com a Portaria n.º 185/2022, que define os tipos de matérias fertilizantes não harmonizadas.

4 Discussão de Resultados Preliminares

Os resultados obtidos na experiência piloto de co-compostagem mostram-se promissores e permitem avaliar a eficácia inicial do processo. A caracterização microbiológica e físico-química das lamas (Tabela 2) indica a sua adequação para co-compostagem, graças à sua rica matéria orgânica e equilíbrio de nutrientes. Contudo, o alto teor de humidade e a presença de metais pesados requerem atenções específicas. Consequentemente, as proporções 1:2 e 1:3 de lamas: biorresíduos foram adotadas para ajustar a humidade, aprimorar a relação C/N e diluir possíveis contaminantes, garantindo assim uma decomposição adequada e a produção de compostos nutritivos e não tóxicos.

Tabela 2. Caracterização microbiológica e físico-química das lamas

Parâmetros	Resultados
<i>Escherichia coli</i>	< 1000 células/g
<i>Salmonella</i> sp.	ausente em 25 g
valor de pH**	5,5
condutividade eléctrica (1:5)**	0,37 dS m ⁻¹
teor de humidade	880,7 g kg ⁻¹
teor de matéria orgânica*	768,2 g MO kg ⁻¹
teor de carbono orgânico*	445,6 g C kg ⁻¹
teor de azoto*	70,6 g N kg ⁻¹
teor de fósforo*	11,94 g P kg ⁻¹
teor de potássio*	5,2 g K kg ⁻¹
teor de cálcio*	11,0 g Ca kg ⁻¹
teor de magnésio*	3,77 g Mg kg ⁻¹
teor de enxofre*	11,4 g S kg ⁻¹
teor de boro*	20,2 mg B kg ⁻¹
teor de cobre*	302,1 mg Cu kg ⁻¹
teor de zinco*	1081,1 mg Zn kg ⁻¹
teor de ferro*	11213 mg Fe kg ⁻¹
teor de manganês*	347 mg Mn kg ⁻¹
teor de níquel*	22,2 mg Ni kg ⁻¹
teor de cádmio*	1,55 mg Cd kg ⁻¹
teor de chumbo*	32,3 mg Pb kg ⁻¹
teor de crómio*	29 mg Cr kg ⁻¹
teor de mercúrio*	378 mg Hg kg ⁻¹
relação C/N	6.3
azoto amoniacal*	14 mg N kg ⁻¹
azoto nítrico*	7 mg N kg ⁻¹

*valores referidos à matéria seca; **valores referidos ao material original

Após a construção das pilhas, a temperatura e humidade foram monitorizadas ao longo do processo. A análise dos dados de temperatura (Figura 4) das pilhas 1:2 e 1:3 evidencia distintos

padrões termofílicos durante a compostagem. A pilha 1:2 demonstrou uma fase termofílica mais breve e uma transição mais rápida para temperaturas mais baixas, indicando uma potencial estabilização e maturação prematura do composto. Esta tendência sugere que a proporção de lamas e resíduos na pilha 1:2 favorece uma rápida atividade microbiana inicial, mas talvez não sustente uma decomposição prolongada, levando a uma finalização precoce do processo.

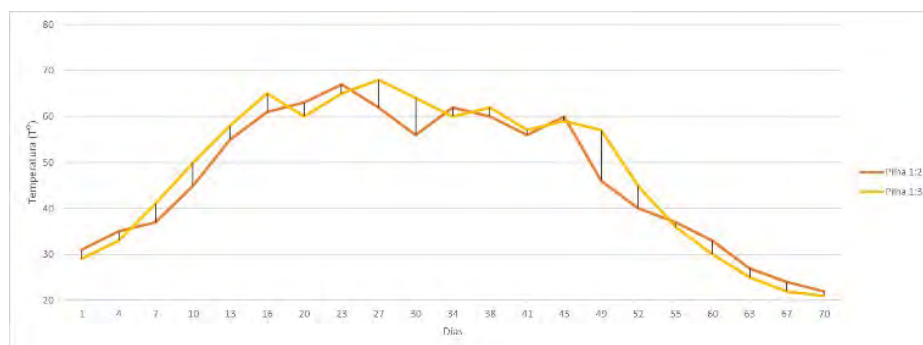


Figura 4. Evolução da temperatura nas pilhas de compostagem

Por outro lado, a pilha 1:3 revelou uma persistência mais prolongada na fase termofílica, com temperaturas elevadas no seu núcleo por um período mais extenso, implicando uma atividade microbiana robusta e contínua. Contudo, essa intensidade prolongada pode também indicar que o equilíbrio entre os resíduos verdes e as lamas na pilha 1:3 não seja o ideal, resultando numa compostagem mais demorada. Essa demora, embora possa produzir um composto mais maturado, pode também implicar custos operacionais adicionais e exigir monitorização mais extensiva para evitar problemas como emissões excessivas de odores ou perda de nutrientes.

Durante o processo de compostagem, que teve uma duração aproximada de 60 dias, observou-se uma redução significativa no volume da pilha, registando perdas de cerca de dois terços do volume inicial.

Os resultados da humidade das pilhas (Figura 5) evidenciam diferenças significativas entre as proporções de mistura testadas. A pilha 1:2 apresentou valores médios de humidade mais elevados e maior variabilidade ao longo do processo. Esta oscilação poderá estar relacionada com a menor quantidade de biorresíduos na mistura, o que reduz a capacidade de absorção e regulação da humidade proveniente das lamas. Em contraste, a pilha 1:3 demonstrou maior estabilidade, com valores mais baixos e consistentes de humidade, o que implicou menor necessidade de volteios e otimização da gestão operacional.

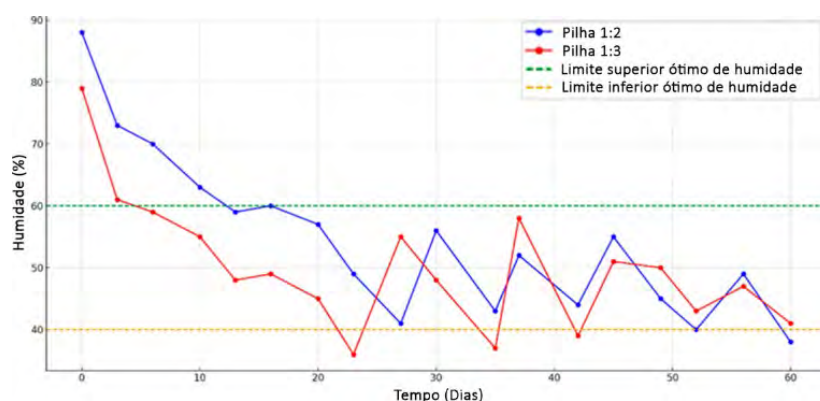


Figura 5. Evolução da humidade nas pilhas de compostagem

Ambos os compostos produzidos nas proporções 1:2 e 1:3 demonstraram viabilidade para aplicação no solo, sendo classificados como matérias fertilizantes não harmonizadas de Classe

II A, conforme o disposto no Decreto-Lei n.º 30/2022, de 11 de abril, e na Portaria n.º 185/2022, de 21 de julho. A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização físico-química e microbiológica dos compostos. As relações C/N situaram-se entre 14,74 (traço 1:2) e 12,45 (traço 1:3), evidenciando compostos estabilizados, com boa capacidade de mineralização e aptidão para uso agrícola.

Tabela 3. Caracterização físico-química e microbiológica dos compostos

Teste	Parâmetro	Unidade	LoQ	Composto 1:2	Composto 1:3
Substância Seca (105 °C) Composto	Humidade	Ma.-% Produto Bruto	0,01	17,60	20,20
	Matéria seca	Ma.-% Produto Bruto	0,01	82,40	79,80
Condutividade/Conteúdo de Sal Composto	Conteúdo de sal	g/L Produto Bruto	1,00	8,40	11,50
	Condutividade	µS/cm	1	3 188	4 368
Valor de pH Composto	pH		0,03	7,90	8,30
Grau de decomposição (I-V) Composto	Temperatura máxima	°C		22	22
	Grau de decomposição			5	5
Azoto Total Composto - Kjeldahl Modificado	Azoto total	% (p/p) dm	0,03	1,04	1,62
	Azoto total	mg/kg dm		10 400	16 200
Azoto Amoniacal e Nítrico CaCl₂ Composto	Azoto amoniacal (NH ₄ -N) - [CaCl ₂]	mg/L Produto Bruto	0,20	158,10	71,90
	Azoto amoniacal (NH ₄ -N) - [CaCl ₂]	mg/kg dm		257,50	126,90
	Azoto nítrico (NO ₃ -N) - [CaCl ₂]	mg/L Produto Bruto	0,30	259,20	417,10
	Azoto nítrico (NO ₃ -N) - [CaCl ₂]	mg/kg dm		422	736,10
Fósforo Composto	Fósforo P ₂ O ₅ (calculado)	% (p/p) dm		0,53	1,04
	Fósforo P ₂ O ₅ (calculado)	mg/kg dm		5 271	10 360
Potássio Composto	Potássio K ₂ O (calculado)	% (p/p) dm		0,76	1,45
	Potássio K ₂ O (calculado)	mg/kg dm		7 639	14 490
Magnésio Composto	Magnésio MgO (calculado)	% (p/p) dm		0,77	1,01
	Magnésio MgO (calculado)	mg/kg dm		7 662	10 090
Cálcio Composto	Cálcio CaO (calculado)	% (p/p) dm		3,28	4,81
	Cálcio CaO (calculado)	mg/kg dm		32 840	48 140
Chumbo Composto	Chumbo (Pb)	mg/kg dm	0,66	60,50	81,50
Boro Composto	Boro (B)	mg/kg dm	0,33	36,90	67,80
Cádmio Composto	Cádmio (Cd)	mg/kg dm	0,33	1,0	1,3
Crómio Composto	Crómio (Cr)	mg/kg dm	0,33	58,80	76,70
Cobre Composto	Cobre (Cu)	mg/kg dm	0,33	121,10	122,40
Níquel Composto	Níquel (Ni)	mg/kg dm	0,33	26,60	36,20
Zinco Composto	Zinco (Zn)	mg/kg dm	1,33	215,90	387,40
Enxofre Composto	Enxofre (S)	mg/kg dm	3,33	20621	4 081
Mercúrio Composto	Mercúrio (Hg)	mg/kg dm	0,03	0,18	0,28
Cobalto Composto	Cobalto (Co)	mg/kg dm	0,33	4,90	6,50
Selénio Composto	Selénio (Se)	mg/kg dm	0,002	0,20	0,40
Molibdénio Composto	Molibdénio (Mo)	mg/kg dm	2	< 2	2,40
Matéria orgânica Composto	Matéria orgânica (450°C)	% (p/p) dm	0,1	27,6	36,30
Cálculo C/N	Método de Cálculo	%		14,74	12,45
	Teste de Cálculo a ser adicionado	%		15,33	20,17
Sementes Germináveis Composto	semente germinável e partes de vegetais	Número/L Produto Bruto		0	0
Análises de Peneiração (1-25mm)	Partícula (> 25 mm)	% (p/p) dm	0,1	< 0,1	< 0,1
	Partícula (20 - 25 mm)	% (p/p) dm	0,1	< 0,1	< 0,1
	Partícula (10-20 mm)	% (p/p) dm	0,1	1,2	0,6
	Partícula (5-10 mm)	% (p/p) dm	0,1	14,1	12,5
	Partícula (2-5 mm)	% (p/p) dm	0,1	25,2	25,2
	Partícula (1-2 mm)	% (p/p) dm	0,1	21,3	21,9
	Partícula (< 1 mm)	% (p/p) dm	0,1	38,3	39,8

A análise nutricional revelou um perfil equilibrado de macronutrientes, com destaque para os teores de azoto, fósforo e potássio. O composto 1:3 evidenciou teores superiores de matéria orgânica e azoto total, o que favorece a retenção de água e a capacidade de troca catiônica - propriedades vantajosas para solos degradados ou suscetíveis à desertificação.

Os valores de metais pesados mantiveram-se abaixo dos limites legais, garantindo a segurança ambiental dos compostos. A ausência de sementes germináveis e de patogênicos como *Salmonella* spp. e *E. coli* comprova a eficiência higiênica do processo (Tabela 4).

Do ponto de vista granulométrico, o composto 1:2 apresentou ligeiras limitações, como menor teor de matéria orgânica e maior proporção de partículas entre 10–20 mm, sugerindo a necessidade de otimização da crivagem.

Tabela 4. Parâmetros microbiológicos dos compostos

Teste	Parâmetro	Unidade	Composto 1:2	Composto 1:3
<i>Salmonella</i> spp 25g	<i>Salmonella</i> spp.	ufc/25 g	Negativo	Negativo
<i>Escherichia coli</i> Composto	<i>Escherichia coli</i>	cfu/g	<1.0E1	<1.0E1

A avaliação da sustentabilidade ambiental da solução proposta, baseada na mitigação de emissões de gases com efeito de estufa (GEE), foi realizada através de uma abordagem de Análise de Ciclo de Vida (ACV). Para tal, considerou-se todo o percurso das lamas desde a sua saída da ETAR de Mirandela até ao seu destino final - a UTMB da Resíduos do Nordeste - e a subsequente deposição em aterro anexo. A unidade funcional adotada para a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) foi "1 tonelada de lama tratada", permitindo quantificar comparativamente os impactos associados ao destino final convencional (aterro) e à solução proposta. Os processos considerados incluíram o transporte das lamas, a co-compostagem com biorresíduos urbanos e, no cenário convencional, a deposição direta em aterro.

A mitigação de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) estimada situa-se entre 1,16 e 1,56 toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e) evitadas por cada tonelada de lamas estabilizada através da co-compostagem com biorresíduos. Esses valores resultam da comparação com o cenário de deposição em aterro, considerando o ciclo completo desde a saída da ETAR até ao destino final dos materiais. Quando considerada a produção final de composto - resultante da valorização conjunta de lamas e biorresíduos-, a mitigação situa-se entre 1,75 e 2,07 t CO₂e evitadas por tonelada de composto produzido, refletindo a eficiência climática global do processo.

Na ETAR de Mirandela, com uma produção anual de aproximadamente 550 toneladas de lamas, estima-se que o seu desvio do aterro permita evitar cerca de 196 t CO₂e /ano. A co-compostagem dessas lamas, envolvendo entre 1.100 e 1.650 toneladas anuais de biorresíduos, resultaria numa mitigação adicional de 440 a 660 t CO₂e /ano. No total, estima-se uma redução de emissões na ordem dos 640 a 860 t CO₂e /ano, com a produção estimada de 367 a 489 toneladas de composto orgânico por ano.

Estes resultados confirmam o potencial técnico e ambiental da solução testada, embora se reconheça a necessidade de estudos complementares para avaliar a eficácia agronómica em campo e a viabilidade económica da sua implementação em larga escala. Do ponto de vista económico e operacional, a escalabilidade da solução dependerá de análises adicionais relacionadas com logística, custos de implementação, retorno da valorização e aceitação do composto pelo mercado. Estes aspetos deverão ser contemplados em estudos futuros, juntamente com avaliações de ciclo de vida mais abrangentes e análises comparativas com outras tecnologias de valorização orgânica, como a digestão anaeróbia.

5 Conclusões

O presente estudo demonstrou, em condições operacionais reais, a viabilidade técnica e ambiental da co-compostagem de lamas de ETAR com biorresíduos urbanos, resultando na produção de um composto orgânico higienizado, estabilizado e legalmente enquadrado como fertilizante de Classe II A. As duas proporções testadas (1:2 e 1:3, lamas: biorresíduos) evidenciaram comportamentos distintos, tendo a proporção 1:3 revelado melhor desempenho em termos de estabilização da matéria orgânica e qualidade agronômica do composto final.

A análise do ciclo de vida indicou um potencial de mitigação entre 1,16 e 1,56 t CO₂e por tonelada de lamas tratada, e entre 1,75 e 2,07 t CO₂e por tonelada de composto produzido. Aplicada à ETAR de Mirandela, esta solução permitiria evitar anualmente entre 640 e 860 t CO₂e, com a valorização de até 489 toneladas de composto por ano.

Os resultados obtidos validam a eficácia técnica e ambiental da solução testada, recomendando-se a sua aplicação em ensaios de campo e a realização de estudos complementares sobre a viabilidade económica da implementação em larga escala. A co-compostagem revela-se, assim, uma via promissora para a valorização de resíduos orgânicos, contribuindo de forma efetiva para os objetivos da economia circular, neutralidade carbónica e regeneração de solos degradados.

Agradecimentos

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto GREENValue – Valorização da Geração de Recursos em Espaço Natural (POCI-07-62G4-FEDER-181589), e da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no contexto do projeto UIDB/04033/2020.

Os autores expressam o seu reconhecimento às entidades Águas do Norte e Resíduos do Nordeste, cuja colaboração foi determinante para a execução deste estudo. O apoio logístico, a disponibilização de infraestruturas e recursos técnicos, bem como a competência e profissionalismo evidenciados, constituíram um contributo essencial para a qualidade científica e relevância aplicada da investigação realizada.

Referências Bibliográficas

- Anwar, Z., Irshad, M., Fareed, I., & Saleem, A. (2015). Characterization and recycling of organic waste after co-composting – a review. *Journal of Agricultural Science*, 7(4), 68–79.
- Bettencourt, B., Gomes-Laranjo, J., Pinto, T., Bentes, I., Teixeira, L., Praça, P., Vaz, R., & Teixeira, C. (2023, novembro 15–18). Economia circular no combate à desertificação: Otimização de processos de co-compostagem. 13.^{as} Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos (JTIR), Bragança, Portugal.
- Gao, H., Zhou, K., Su, D., Zhang, B., & Cheng, F. (2022). Sludge-based baking-free brick prepared by sewage sludge with high moisture content: Influence of process parameters and environmental risk assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108576.
- Grgas, D., Štefanac, T., Barešić, M., Toromanović, M., Ibrahimpašić, J., Vukušić Pavičić, T., Habuda-Stanić, M., Herceg, Z., & Landeka Dragičević, T. (2023). Co-composting of sewage sludge, green waste, and food waste. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 11(1), 1100415.
- Mortula, M. M., Ahmad, A., & Shah, S. A. (2016). Assessment of mixing potential of sewage sludge, green waste and food waste for co-composting in Sharjah, UAE. *International Journal of Environment and Sustainability*, 5(1), 1–8.

- Nguyen, V. T., Le, T. H., Bui, X. T., Nguyen, T. N., Vo, T. D. H., Lin, C., Vu, T. M. H., Nguyen, H. H., Nguyen, D. D., Senoro, D. B., & Dang, B. T. (2020). Effects of C/N ratios and turning frequencies on the composting process of food waste and dry leaves. *Bioresource Technology Reports*, 11, 100527.
- Nordahl, S. L., Devkota, J. P., Amirebrahimi, J., Smith, S. J., Breunig, H. M., Preble, C. V., Satchwell, A. J., Jin, L., Brown, N. J., Kirchstetter, T. W., & Scown, C. D. (2020). Life-cycle greenhouse gas emissions and human health trade-offs of organic waste management strategies. *Environmental Science & Technology*, 54(15), 9200–9209.
- Pereira, F., & Silva, C. (2023). Energetic valorization of bio-waste from municipal solid waste in Porto Santo Island. *Clean Technologies*, 5(1), 233–258.
- Resíduos do Nordeste, EIM, S.A. (2021). Estudo da gestão dos biorresíduos da Resíduos do Nordeste (Relatório preliminar).
- Teixeira, C. A. (Coord.), & outros. (2024). Co-compostagem de lamas de ETAR com biorresíduos do tratamento mecânico: Uma proposta para valorização de biorresíduos da Região Norte (98 p.). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. ISBN 978-989-704-573-8