

Avaliação da aplicação de compostado no sequestro de carbono orgânico no solo e nas propriedades físico-químicas em agroecossistemas de olival no nordeste de Portugal

Evaluation of compost application on soil organic carbon sequestration and physic-chemical properties in olive grove agroecosystems of NE Portugal

Matheus Toloto^{1,2,3,*}, Arthur A. J. Lima^{1,2,3}, Ana Royer^{1,2,3}, Ana Beatriz Segatelli^{1,2,4}, Andressa Griebler Gusmão^{1,2}, Tomás de Figueiredo^{1,2} & Zulimar Hernandez^{1,2}

¹ Centro de Investigação de Montanha (CIMO), Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal

² Laboratório Associado para a Sustentabilidade e Tecnologia em Regiões de Montanha (SusTEC), Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal

³ Universidade da Coruña, Centro Interdisciplinar de Química e Biología (CICA), Elviña, 15071 A Coruña, España

⁴ Universidade de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal

(*E-mail: matheustoloto@ipb.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.38551>

Recebido/received: 2024.07.31

Aceite/accepted: 2024.10.25

RESUMO

O ciclo global do carbono e a remediação da poluição atmosférica estão diretamente relacionadas ao sequestro do C terrestre. Neste contexto, o C orgânico do solo (COS) desempenha um papel fundamental, principalmente em zonas agrícolas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os resultados da aplicação de três tipos de compostado (A, B e C) num Leptosolo, em olival de conservação e a sua relação com as propriedades físico-químicas do solo. A área de estudo apresenta um declive de 15% e resultados demonstraram não haver diferenças significativas na distribuição espacial de COS entre os diferentes patamares, não havendo perda de solo por erosão. Resultados analíticos apresentaram uma correlação direta ($r^2=0,73$) entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ e K, influenciando diretamente a mobilidade de nutrientes. Além disso, o COS teve uma correlação de 0,77 com a capacidade de troca catiónica efetiva. Ainda, resultados apresentaram ΔpH (KCl para H_2O) de 0,98, 1,15 e 0,71, respetivamente para tratamentos A, B e C, demonstrando ser originado exclusivamente da variação da qualidade de C de cada um dos compostados e não da fração mineral do solo. Em termos gerais, existe uma relação direta de causa-efeito entre a aplicação do compostado e os resultados analíticos, independentemente da dose aplicada e do tipo de compostado.

Palavras-chave: Compostagem, olival, corretivos orgânicos, química do solo, zona Mediterrânea

ABSTRACT

Global carbon cycle and atmosphere pollution remediation depended directly on C terrestrial sequestration. In this context, soil organic carbon (SOC) plays an extremely important role, especially in agricultural areas. The present research aims to evaluate the outcomes from three types of compost (A, B, and C) to a Leptosol in a conservative olive grove and its relationship with soil physic-chemical properties. The study area has a 15% slope, and results showed no significant difference in SOC concentration in spatial distribution between different levels, with no soil loss due to erosion. Analytical results presented a directed correlation ($r^2=0.73$) between $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ and K, directly influencing nutrient mobility. In addition, SOC had a 0.77 correlation with cation exchange capacity. Still, results showed ΔpH (KCl to H_2O) of 0.98, 1.15 and 0.71, respectively for treatments A, B and C, showing it originates exclusively from the variation in C quality of each of the composts and not from the mineral fraction of the soil. In general terms, there is a direct cause-effect relationship between the application of compost and analytical results, regardless the dose applied and the type of compost.

Keywords: Composting, olive grove, organic amendment, soil chemistry, Mediterranean area

INTRODUÇÃO

A emissão global de carbono evidencia-se por ter alto impacto nos fenômenos climáticos extremos (Kaushal *et al.*, 2023). O carbono orgânico do solo (COS) tem uma função fundamental no armazenamento de C e na expansão dos reservatórios terrestres (Li *et al.*, 2023), além de melhorar diretamente as propriedades físico-químicas do solo e acrescentar os serviços dos ecossistemas (Yadav *et al.*, 2022), nomeadamente o serviço de regulação climática (sequestro e armazenamento do C). É ainda mais relevante em solos degradados das regiões Mediterrânicas (Figueiredo *et al.*, 2015), devido ao risco potencial de erosão e a consequente perda de espessura do solo e a incapacidade de armazenamento de água. O declive, a cobertura de vegetação pouco densa e, acima de tudo, a gestão inadequada de práticas agrícolas, como a contínua mobilização do solo, principalmente em zonas de declive acentuado, contribui com perdas de solo por erosão, e acaba por ser o fator determinante na redução de fertilidade das terras agrícolas. A degradação do solo expõe a perda ou a incapacidade das suas funções, acabando por reduzir o rendimento agrícola e a produção alimentar (Ferreira *et al.*, 2022), especialmente nos sistemas agrícolas de maior importância socioeconómica da região Mediterrânea como o olival.

Neste sentido, a aplicação de corretivos orgânicos tem-se apresentado como uma alternativa ambientalmente correta para aumentar o COS, atuando como uma solução de base natural, como o composto orgânico e os bioestimulantes, particularmente aqueles que estão integrados na cadeia da economia circular dos olivais. Dado que, no processo de extração do azeite se produz uma grande quantidade de subproduto, o bagaço de azeitona, o qual é altamente fito tóxico (Albuquerque *et al.*, 2009; Yaşasın *et al.*, 2022) quando aplicado diretamente no solo. Por outro lado, o mesmo pode ser compostado e utilizado como fertilizante orgânico (Ameziane *et al.*, 2020; Royer *et al.*, 2023). Para isso, decidiu-se testar a aplicação de composto orgânico de bagaço de azeitona em olival com o objetivo de avaliar os efeitos da incorporação e distribuição espacial do COS, assim como o nível de erosão em diferentes patamares altimétricos. Além disso, o avaliou-se a relação direta da aplicação do composto com as propriedades físico-químicas do solo.

METODOLOGIA

Delineamento experimental – Área de estudo

A área de estudo está situada no nordeste de Portugal, no município de Vila Flor (41,343561, -7,095475), é coberta por uma cultura de olival (*Olea europaea* L.), variedade cobrançosa, o solo é classificado como Leptosolo êutrico (WRB, 2022). A zona amostral do olival abrange uma área de 9.864 m², e apresenta um declive de 15%.

Foram aplicados na área de estudo três tipos de compostados à base de bagaço de azeitona (A, B e C), os quais foram elaborados com diferentes proporções de agentes estruturantes. Foi utilizado o composto com marca corporativa Compolea® cujas características analíticas estão descritas no Quadro 1. Cada um dos compostados A, B e C foram aplicados em dosagens de 10, 20 e 40 ton ha⁻¹, de acordo com os limites estabelecidos no Decreto-Lei 30/2022 de 11 de abril, 2022. A aplicação de

Quadro 1 - Dados analíticos do composto Compolea®

Matéria Orgânica	61,3	%	1
Humidade	37,7	%	1
pH	7,9		1
Condutividade Elétrica	1,9	mS/cm	1
Densidade	885	kg/m ³	1
C/N	15,6		1
Carbono (C) total	3,2	g/kg	2
Azoto (N) total	0,21	g/kg	2
Fósforo (P ₂ O ₅) total	0,026	g/kg	3
Potássio (K ₂ O) total	0,1	g/kg	2
Cálcio (CaO) total	0,1	g/kg	2
Magnésio (MgO) total	0,03	g/kg	2
Boro (B) total	27	mg/kg	2
Chumbo (Pb) total	23,7	mg/kg	2
Cobre (Cu) total	15,7	mg/kg	3
Crómio (Cr) total	14,7	mg/kg	2
Níquel (Ni) total	23,8	mg/kg	2
Zinco (Zn) total	25,9	mg/kg	3
Fitotoxicidade	ausente		1
Granulometria < 25 mm	99	%	1
Mat. Inertes antropogénicos	0,02	%	3
<i>Salmonella</i> spp.	ausente	em 25 g	3
<i>Escherichia</i> spp.	ausente	células/g	3

Resultados (reportados à matéria seca) referentes às análises efetuadas ao composto em 2022 no: (1) Laboratório colaborativo MORE CoLab, (2) Instituto de Ciências Agrárias (CSIC, Madrid) ou (3) Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária (INIAV).

cada um dos compostados (A, B e C) foi feita com auxílio mecânico em três filas de plantio, sendo que cada fila contém uma média de 20 árvores, com espaçamento de aproximadamente 3 m entre cada uma, ainda, uma fila sem aplicação de composto foi selecionada como testemunha (controle), totalizando 10 linhas de plantio.

Amostragem de solo

Após um ano da aplicação do compostado, um total de 57 amostras de solo foram coletadas em delineamento estratificado por patamar altimétrico nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm. As amostras foram crivadas num crivo de 2 mm e secas numa estufa a 65 °C por 72 h. Foi ainda calculado o teor de humidade para eventuais correções.

As determinações de COS, pH em água e pH em KCl foram feitas nas instalações do Centro de Investigação de Montanha (CIMO), no Instituto Politécnico de Bragança (IPB). As análises físico-químicas do solo, nomeadamente a capacidade de troca catiónica efetiva (CTCe), condutividade elétrica, além de N total (por condutividade térmica), P (por espectrofotometria molecular), K extraíveis, e os cátions de troca Mg, Ca e Na (por espectrofotometria IPC) foram realizadas em um laboratório certificado do Centro de Investigações Agrárias de Mabegondo (Espanha).

Variação espacial do carbono orgânico no solo

A análise da variação espacial do COS foi elaborada através da criação de um *geodataframe* utilizando a linguagem de programação Python. Neste *geodataframe*, foram introduzidas as coordenadas de cada ponto de amostragem de campo e os respectivos valores médios de COS. Foi criada uma nuvem de pontos sobre toda a área de estudo para rasterizar os dados de C, utilizando a técnica de krigagem com a função `linearNDInterpolator` da biblioteca `scipy.interpolate`.

Análise de dados

O tratamento e análise estatística de dados foram feitos utilizando os softwares “StatPlus”. Foram

elaborados modelos de regressão linear simples entre as variáveis a fim de ilustrar possíveis relações entre cada uma das variáveis analisadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação espacial de COS na área de estudo cobriu uma distribuição geográfica uniforme em todo o olival entre todos os níveis topográficos e linhas de plantio (Figura 1), sem diferença significativa entre níveis altimétricos, indicando uma baixa ou nula perda de solo, confirmando o efeito benéfico da aplicação de compostado e a eficiência de uma gestão conservativa em um olival em área Mediterrânea (Dignac *et al.*, 2017). A constatação da distribuição uniforme de COS também sugere uma melhoria nas propriedades estruturais do solo, promovendo uma maior capacidade de retenção de água e nutrientes, fatores essenciais para a sustentabilidade dos agroecossistemas em regiões Mediterrâneas. A aplicação de compostados não apenas reforça a integridade do solo, mas também pode evidenciar melhoria das suas funcionalidades e potencial produtividade agrícola a longo prazo.

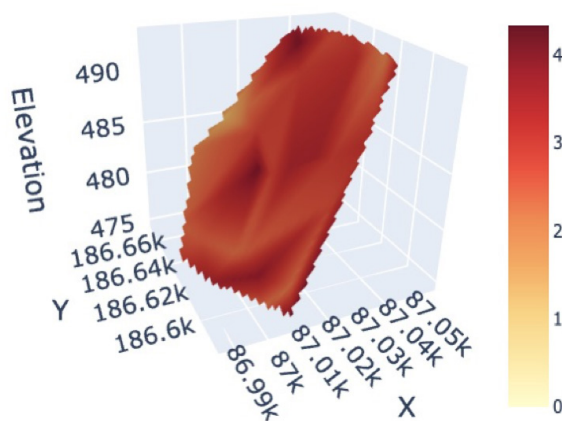


Figura 1 - Distribuição espacial de carbono orgânico no solo (g/100 g).

Estudos anteriores (Toloto *et al.*, 2023) comprovaram a importância da aplicação de compostados a base de bagaço de azeitona na incorporação do COS com diferenças significativas comparadas ao controle, o qual, por sua vez, já apresenta um

percentual de COS elevado (2,05 %) por se tratar de um olival em prática de conservação, sem mobilização do solo. Por outro lado, Yaşasın *et al.* (2022) aplicou o bagaço de azeitona diretamente no solo em vinha nas mesmas dosagens e não houve incorporação significativa de COS mesmo três anos após a aplicação, indicando a necessidade de compostagem para aumentar o SOC em campo.

Em relação as variáveis analíticas, o pH_{H_2O} apresentou uma correlação linear positiva de 0,74 com o K (Figura 2a), com os maiores valores em dosagem de 40 ton ha⁻¹, indicando a importância do K principalmente na mobilização de nutrientes no solo e conseqüentemente na biodisponibilidade dos elementos assimiláveis as plantas, primeiramente por aumentar a capacidade de crescimento radicular e na funcionalidade das raízes, intensifi-

químicas do solo, reforçando a sustentabilidade e a produtividade dos sistemas agrícolas em áreas mediterrâneas.

De uma maneira geral, os resultados de ΔpH (de KCl para H₂O) apresentados na Figura 3 demonstram diferenças significativas entre os tratamentos A e B comparados ao tratamento C. O ΔpH é um indicador sensível às mudanças na matéria orgânica do solo, sendo influenciado predominantemente pela decomposição e qualidade da matéria orgânica adicionada (Baldotto & Xavier, 2014). Tais resultados sugerem que os compostados A e B possuem matéria orgânica mais estável, com maiores quantidades de ácidos húmicos, refletindo em maiores alterações de pH, o que pode contribuir diretamente para o sequestro de C, uma vez e melhoria das propriedades físico-químicas do solo.

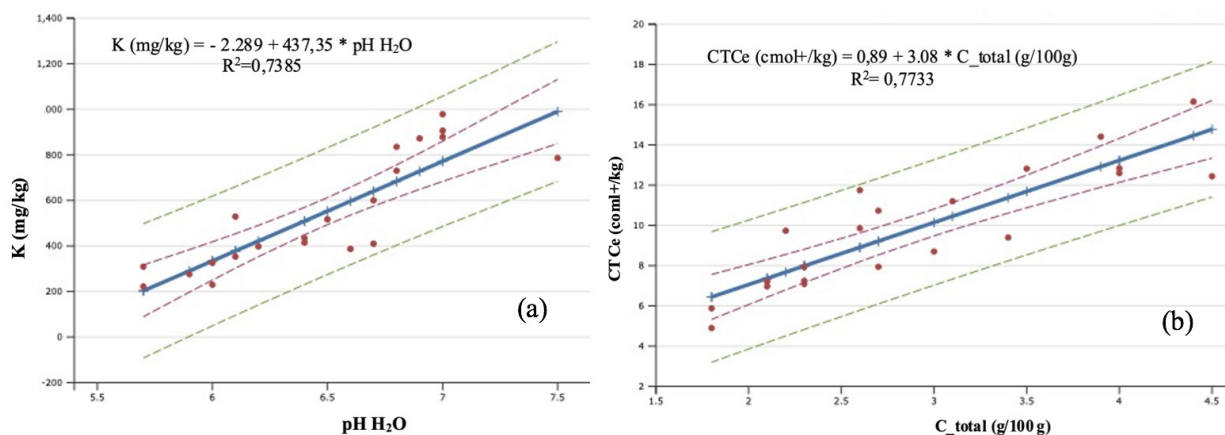


Figura 2 - (a) Corelação pH_{H_2O} com potássio **(b)** Relação carbono total (g/100 g) com capacidade de troca catiônica efetiva (cmol+/kg) em solo após aplicação de compostado.

cando a eficiência na captação de nutrientes. Esse processo não só melhora a nutrição das plantas, mas também cria um efeito sinérgico potencial, ampliando a disponibilidade de outros nutrientes essenciais (Abbas *et al.*, 2022).

Além disso, há uma correlação de 0,77 entre o COS e a CTCe (Figura 2b), demonstrando ainda o potencial positivo da incorporação de COS para a biodisponibilidade de nutrientes nos olivais. O aumento do COS contribui para uma maior capacidade do solo em reter cátions essenciais, melhorando a fertilidade e a saúde geral do solo. Esses resultados enfatizam a eficácia da aplicação de compostados orgânicos na melhoria das propriedades

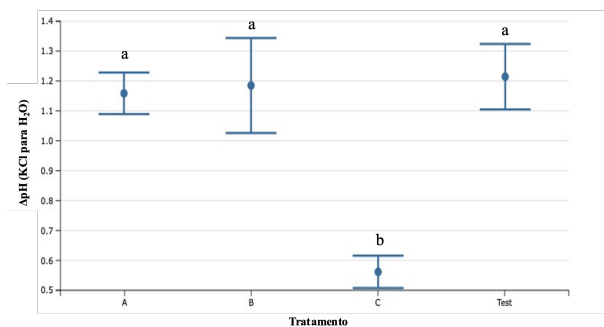


Figura 3 - Gráfico de médias ΔpH (de KCl para H₂O) em dosagem 10 ton ha⁻¹. Letras minúsculas indicam diferença estatística significativa entre tratamentos verificados pelo teste de comparação média Tukey (<=0.05). p-value ANOVA < 0.01 a nível de confiança de 95%.

CONCLUSÕES

A aplicação de compostados orgânicos em olival resultou em benefícios evidentes para a saúde do solo e armazenamento de COS, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. A análise geoespacial indicou uma distribuição uniforme do COS, sem erosão de solo evidente, demonstrando a eficácia das práticas de gestão conservacionista.

Além disso, os compostados melhoraram algumas das propriedades físico-químicas do solo. A correlação positiva entre pH e K indicou melhor mobilização de nutrientes, e a relação entre COS e CTCe destacou a importância dos compostos na biodisponibilidade de nutrientes. Os resultados mostram que o uso de compostados orgânicos é

uma estratégia eficaz para melhorar a saúde do solo, reduzir a pegada de C em zonas Mediterrâneas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Ciência e Tecnologia (FCT, Portugal) e o fundo nacional FCT/MCTES (PIDDAC) pelo suporte financeiro ao CIMO (UIDB/00690/2020 e UIDP/00690/2020) (DOI:10.54499/UIDB/00690/2020) e SusTEC (LA/P/0007/2020). Também gostariam de agradecer ao PRR HARVEST (PRR-C05-i03-I- 00157) financiamento “Plano de Recuperação e Resiliência – PRR (Nº 12/C05- i03/2021 – Projetos I&D+I – Projetos de Investigação e Inovação – Alimentação Sustentável)” ao Matheus de Oliveira Toloto.

REFERÊNCIAS

- Abbas, G.; Rehman, S.; Siddiqui, M.H.; Ali, H.M.; Farooq, M.A. & Chen, Y. (2022) - Potassium and Humic Acid Synergistically Increase Salt Tolerance and Nutrient Uptake in Contrasting Wheat Genotypes through Ionic Homeostasis and Activation of Antioxidant Enzymes. *Plants*, vol. 11, n. 3, p. 263. <https://doi.org/10.3390/plants11030263>
- Alburquerque, J.A.; González, J.; Tortosa, G.; Baddi, G.A. & Cegarra, J. (2009) - Evaluation of “alperujo” composting based on organic matter degradation, humification and compost quality. *Biodegradation*, vol. 20, n. 2, p. 257–270. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9218-y>
- Ameziane, H.; Nounah, A.; Khamar, M. & Zouahri, A. (2020) - Composting olive pomace: Evolution of organic matter and compost quality. *Agronomy Research*, vol. 18, n. 1, p. 5–17. <https://doi.org/10.15159/AR.20.004>
- Baldotto, M.A. & Xavier, A.C. (2014) - Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. *Revista Ceres*, vol. 61, n. 6, p. 1012–1021. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461060018>
- Decreto-Lei no 30/2022 de 11 de abril. *Diário da República* nº 71/2022 – Série I. Presidência do Conselho de Ministros.
- Dignac, M.-F.; Derrien, D.; Barré, P.; Barot, S.; Cécillon, L.; Chenu, C.; Chevallier, T.; Freschet, G.T.; Garnier, P.; Guenet, B.; Hedde, M.; Klumpp, K.; Lashermes, G.; Maron, P.-A.; Nunan, N.; Roumet, C. & Basile-Doelsch, I. (2017) - Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 37, n. 2, art. 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>
- Ferreira, C.S.S.; Seifollahi-Aghmiuni, S.; Destouni, G.; Ghajarnia, N. & Kalantari, Z. (2022) - Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of The Total Environment*, vol. 805, art. 150106. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150106>
- Figueiredo, T.; Fonseca, F. & Nunes, L. (2015) - *Proteção do solo e combate à desertificação: oportunidade para as regiões transfronteiriças*. Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Bragança. [https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/12212/3/Proteção do solo.pdf](https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/12212/3/Proteção%20do%20solo.pdf)
- Kaushal, S.; Sharma, N.; Singh, I. & Singh, H. (2023) - Soil Carbon Sequestration: A Step towards Sustainability. *International Journal of Plant & Soil Science*, vol. 35, n. 11, p. 160–171. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i112957>
- Li, J.; Ding, J.; Yang, S.; Zhao, L.; Li, J.; Huo, H.; Wang, M.; Tan, J.; Cao, Y.; Ren, S.; Liu, Y. & Wang, T. (2023) - Depth-dependent driver of global soil carbon turnover times. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 185, art. 109149. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2023.109149>
- Royer, A.C.; de Figueiredo, T.; Fonseca, F.; Lado, M. & Hernández, Z. (2023) - Short-Term Effects of Olive-Pomace-Based Conditioners on Soil Aggregation Stability. *Agronomy*, vol. 14, n. 1, art. 5. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010005>
- Toloto, M.; Lima, A.; de Figueiredo, D.; Fonseca, F.; Hernández, Z. & de Figueiredo, T. (2023) - Prediction of soil organic carbon using colorimetric parameters: an example in Leptosols (NE Portugal). *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 46, n. 1, p. 215–220. <https://doi.org/10.19084/rca.33468>
- WRB (2022) - *World reference base for soil resources*. IUSS Working Group.
- Yadav, V.S.; Yadav, S.S.; Gupta, S.R.; Meena, R.S.; Lal, R.; Sheoran, N.S. & Jhariya, M.K. (2022) - Carbon sequestration potential and CO₂ fluxes in a tropical forest ecosystem. *Ecological Engineering*, vol. 176, art. 106541. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2022.106541>
- Yaşasın, A.S.; Gürbüz, M.A.; Candar, S.; Aras Çınar, G. & Açıkbaz, B. (2022) - The Effect of Grape Marc and Olive Pomace Organic Wastes on Nutrition of Kalecik Karası and Narince (*Vitis vinifera* L.) Grape Varieties. *Tekirdag Viticulture Research Institute*, vol. 2, n. 1, p. 25–32. <https://doi.org/10.52001/vis.2022.8.25.32>