ARMAZENAMENTO DE CARBONO NO ECOSSISTEMA SOLO DE UM OLIVAL DE TRÁS-OS-MONTES: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DUAS TÉCNICAS DE GESTÃO DO SOLO

João Paulo Caldato

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Agroecologia no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Federal do Paraná – UTFPR (Campus Pato Branco)

Orientado por

Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca

Coorientado por

Prof. Doutor Tomás d'Aquino Freitas Rosa de Figueiredo

Professora Doutora Tangriani Simioni Assmann

Bragança

2024

ARMAZENAMENTO DE CARBONO NO ECOSSISTEMA SOLO DE UM OLIVAL DE TRÁS-OS-MONTES: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DUAS TÉCNICAS DE GESTÃO DO SOLO

João Paulo Caldato

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Agroecologia no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Federal do Paraná – UTFPR (Campus Pato Branco)

Orientado por

Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca

Coorientado por

Prof. Doutor Tomás d'Aquino Freitas Rosa de Figueiredo

Professora Doutora Tangriani Simioni Assmann

Bragança

2024

“*Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar*".

(Js 1:9)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e Nossa Senhora Aparecida por ter me dado saúde, força e sabedoria para completar esta etapa tão importante da minha vida. Sem as suas graças e proteção, nada disso seria possível.

Aos meus pais, agradeço profundamente pelo amor incondicional, apoio e ensinamentos que me prepararam como pessoa e profissional para lidar com todas as barreiras enfrentadas. Vocês são minha maior inspiração e exemplo de dedicação e perseverança e, essa conquista é tanto minha como de vocês.

Sinceramente agradeço minha namorada Camila, meu amor e minha companheira, por estar ao meu lado em cada etapa desta jornada. Seu carinho, paciência e apoio inabalável foram a força que precisei nos momentos mais difíceis. As palavras de encorajamento, cada gesto de amor e sua confiança em mim foram muito apreciadas. Você é minha maior inspiração e a luz em meus dias. Sou eternamente grato por ter você ao meu lado.

À minha família e amigos, agradeço por estarem ao meu lado, torcendo por mim e oferecendo apoio nos momentos difíceis. Vocês são um pilar essencial em minha vida, e sou imensamente grato por cada um de vocês.

A minha orientadora Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca e, aos meus co-orientadores Professor Doutor Tomás d'Aquino Freitas Rosa de Figueiredo e a Professora Doutora Tangriani Simioni Assmann, agradeço pela orientação, paciência e sabedoria compartilhada ao longo deste percurso. Seu conhecimento e incentivo foram cruciais para o desenvolvimento desta tese. Obrigado por acreditarem no meu potencial e me guiarem com tanta dedicação. E ainda ao Professor Doutor André Brugnara Soares que me auxiliou na inscrição do edital, foi uma peça fundamental para que tudo isso acontecesse.

Obrigada a UTFPR-PB e ESA-IPB pela oportunidade de intercambio de dupla diplomação no programa de mestrado em Agroecologia.

RESUMO

A oliveira (*Olea europaea* L.) é uma cultura permanente crucial em Portugal devido à sua relevância econômica e cultural relacionada principalmente com a produção de azeite. No nordeste de Portugal, 72% dos solos são Leptossolos (espessura ≤ 30 cm), apresentando apenas 12% dos solos espessura superior a um metro. Grande parte dos olivais em Trás-os-Montes ocupam topografias acidentadas, o que associado à técnica de mobilização do solo comumente utilizada tem intensificado os processos erosivos e a consequente perda de espessura e de fertilidade do solo, para além de desequilíbrios na biota edáfica. A mobilização do solo nos olivais pode apresentar vários problemas. A frequente mobilização do solo (2 a 3 vezes por ano) causa erosão, desertificação, perda de matéria orgânica do solo e degradação dos recursos naturais solo e água. Pelo que se busca práticas alternativas sustentáveis de gestão do solo a fim de promover a sustentabilidade dos ecossistemas olivícolas, o presente trabalho teve como objetivo estudar o impacto de duas técnicas de gestão do solo no armazenamento de carbono num olival de sequeiro localizado em Suções, Mirandela, NE Portugal. As técnicas de gestão do solo comparadas (tratamentos) foram a mobilização tradicional do solo com escarificador (MOB) e a não mobilização com coberturas verdes (CVE). As amostras de solo foram coletadas nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, debaixo da copa das oliveiras (DC) e na entrelinha (EL). Os resultados mostram que, as maiores quantidades de carbono por unidade de área (Mg C ha^{-1}) foram registadas no tratamento CVE, debaixo da copa e na camada 0-10 cm. No tratamento CVE verificou-se um acréscimo da quantidade de carbono armazenada no solo de 4,9 Mg ha^{-1}, comparativamente ao tratamento MOB. O aumento do carbono no solo devido ao uso de coberturas verdes sugere que, a médio/longo prazo, ocorrerá uma melhoria da qualidade do solo e da atividade biológica do solo, podendo ainda proporcionar benefícios econômicos através da venda de créditos de carbono. Estes resultados sublinham a importância de práticas sustentáveis de gestão do solo para a conservação dos recursos solo e água e da produtividade dos olivais.

Palavras-chave: Olival de sequeiro, armazenamento de carbono, gestão do solo, coberturas verdes, mobilização do solo, Nordeste de Portugal.

ABSTRACT

The olive tree (*Olea europaea* L.) is a crucial perennial crop in Portugal due to its economic and cultural significance, primarily related to olive oil production. In northeastern Portugal, 72% of the soils are Leptosols (thickness ≤ 30 cm), with only 12% of soils having a thickness greater than one meter. A large part of the olive groves in Trás-os-Montes occupies rugged topographies, which, combined with the commonly used soil tillage technique, has intensified erosion processes and the consequent loss of soil thickness and fertility, as well as imbalances in soil biota. Soil tillage in olive groves can present several problems. Frequent soil tillage (2 to 3 times a year) causes erosion, desertification, loss of soil organic matter, and degradation of natural soil and water resources, leading to the search for alternative sustainable soil management practices to promote the sustainability of olive-growing ecosystems. This study aimed to investigate the impact of two soil management techniques on carbon storage in a rainfed olive grove located in Suções, Mirandela, NE Portugal. The soil management techniques compared (treatments) were traditional soil tillage with a scarifier (MOB) and no-tillage with green covers (CVE). Soil samples were collected at depths of 0-10 and 10-20 cm, under the olive tree canopy (UC) and in the inter-row (IR). The results show that the highest amounts of carbon per unit area (Mg C ha^{-1}) were recorded in the CVE treatment, under the canopy, and in the 0-10 cm layer. In the CVE treatment, there was an increase of 4.9 Mg ha^{-1} in the amount of carbon stored in the soil compared to the MOB treatment. The increase in soil carbon due to the use of green covers suggests that, in the medium/long term, there will be an improvement in soil quality and biological activity, potentially providing economic benefits through the sale of carbon credits. These results underline the importance of sustainable soil management practices for the conservation of soil and water resources and the productivity of olive groves.

Keywords: Rainfed olive grove, carbon storage, soil management, green cover crops, soil tillage, Northeastern Portugal.

SUMÁRIO

RESUMO vi
ABSTRACT ..... **vii**
1. INTRODUÇÃO **1**
2. OBJETIVOS **3**
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **4**
3.1 Cultura da oliveira em Portugal **4**
3.2 Carbono **5**
3.3 Sequestro e armazenamento de carbono no solo **8**
3.4 Técnicas de gestão do solo em olivais de Trás-os-Montes **11**
3.5 Quantificação do carbono **13**
3.6 Mercado de créditos de carbono e possível geração de lucros **14**
4. MATERIAL E MÉTODOS **17**
4.1 Localização e caracterização da área de estudo **17**
4.2 Delineamento experimental e colheita de amostras **20**
4.3 Processamento das amostras de solos e análises laboratoriais **22**
4.4 Cálculo da quantidade de carbono no solo **23**
4.5 Tratamento estatístico **23**
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO **24**
5.1 Armazenamento de carbono no solo do olival **24**
5.2 Efeito das técnicas de gestão do solo no armazenamento de carbono **25**
5.3 Relação entre armazenamento de carbono e profundidade do solo **27**
5.4 Armazenamento de carbono no solo em relação ao local de recolha **28**
5.5 Efeitos da densidade aparente, do teor de elementos grosseiros e da concentração de carbono no cálculo do armazenamento de carbono **30**
5.6 Produção suplementar de créditos de carbono pelas coberturas verdes **32**
6. CONCLUSÕES **34**
REFERÊNCIAS **35**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo global do carbono. **7**
Figura 2 - Mapa da distribuição do carbono orgânico do solo (Mg ha^{-1}) em Portugal Continental.. ..... **10**
Figura 3 - Localização geográfica da área de estudo. **17**
Figura 4 - Média das temperaturas mínimas, médias e máximas mensais registadas na estação meteorológica de Mirandela no período 1981-2010 ..... **18**
Figura 5 - Precipitação média anual para o período 1981-2010 em Mirandela. **19**
Figura 6 - Técnicas de gestão do solo: mobilização tradicional do solo com escarificador (a) e manutenção de coberturas verdes (b). **20**
Figura 7 - Coleta de amostras de solo. **22**
Figura 8 - Carbono armazenado no solo de acordo com a técnica de gestão do solo (MOB - mobilização do solo e CVE - cobertura verde), profundidade do solo (0-10 e 10-20 cm) e local de recolha das amostras de solo (DC - debaixo da copa e EL - entrelinha). Para a mesma técnica de gestão do solo e profundidade, valores das colunas com letras diferentes diferem significativamente os locais de colheita das amostras ($p < 0,05$). **24**
Figura 9 - Efeito da técnica de gestão do solo (MOB - mobilização do solo, CVE - cobertura verde), no armazenamento de carbono na camada 0-20 cm do solo. Valores das colunas com letras diferentes diferem significativamente ($p < 0,05$). **26**
Figura 10 - Acréscimo de carbono no solo com coberturas verdes (CVE) comparativamente ao solo mobilizado (MOB). **26**
Figura 11 - Efeito da profundidade do solo no armazenamento de carbono. Valores das colunas com letras diferentes diferem significativamente ($p < 0,05$). **27**
Figura 12 - Acréscimo de carbono na profundidade 0-10 cm do solo comparativamente à profundidade do solo 10-20 cm. **27**
Figura 13 - Efeito do local de recolha de amostras (DC - debaixo da copa e EL - entrelinha) no armazenamento de carbono na camada superficial do solo (0-20 cm). Valores das colunas com letras diferentes diferem significativamente ($p < 0,05$). **29**

Figura 14 - Acréscimo de carbono debaixo da copa (DC) comparativamente à entrelinha (EL). **29**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tratamentos estabelecidos e esquema de amostragem.....**21**
Tabela 2 - Concentração de carbono no solo, densidade aparente e teor de elementos grosseiros debaixo da copa (DC) e na entrelinha (EL) nas camadas 0-10 e 10-20 cm de solo para os tratamentos solo mobilizado (MOB) e solo com coberturas verdes (CVE) (média ± desvio padrão).....**31**
Tabela 3 - Coeficientes de correlação (r^2) entre as variáveis concentração de carbono (Cc), densidade aparente (Dap) e elementos grosseiros (EG) com a quantidade de carbono (CS) armazenada nas camadas de solo 0-10 e 10-20 cm (* 0,05>P>0,01; ** 0,01>P>0,001; *** P<0,001).....**32**

1. INTRODUÇÃO

Os olivais têm uma importância cultural significativa em Portugal. Estão profundamente enraizados no passado do país e representam uma conexão entre os métodos agrícolas atuais e antigos. O cultivo e a produção de azeite também favorecem a biodiversidade e a agricultura sustentável. Isso não apenas mantém o equilíbrio ecológico, mas também melhora a qualidade e o lucro das oliveiras (AEEC, 2022).

A produção de azeite na região de Trás-os Montes é reconhecida pela qualidade e desempenha um papel importante no contexto nacional. Embora haja uma clara necessidade de melhorar as técnicas de plantio, manejo e cultivo de olivais do ponto de vista agronômico, essas regiões são cruciais para a economia regional e a fixação das populações rurais, bem como para a definição das paisagens que sustentam (de Graaff et al., 2010).

A Comissão Europeia enfatiza a importância de práticas de gestão do solo sustentáveis para proteger a biodiversidade e mitigar as alterações climáticas. A dinâmica dos *stocks* de carbono orgânico do solo nas terras agrícolas é altamente sensível às práticas de gestão agrícola, representando uma componente crucial da fertilidade do solo e desempenhando um papel fundamental na regulação do ciclo global do carbono (Zhang et al., 2023) . Isto reforça a necessidade de incentivar os gestores de terras por meio da agricultura incrementar a quantidade de carbono nos sistemas agrícolas e promover compromissos entre a mitigação climática e a proteção ambiental. Estas ações são apoiadas pela Ação Climática por meio do financiamento da Política Agrícola Comum (PAC) da UE e de outros programas (Comissão Europeia, 2024).

A maioria das áreas de cultivo de olivais em Trás-os-Montes está localizada em terrenos rasos, pedregosos, ácidos e com grande inclinação, em locais com baixa disponibilidade de água. Então, essas regiões têm aptidão agrícola marginal ou até nula (Figueiredo et al., 2002).

A mobilização do solo nos olivais pode apresentar vários problemas. O uso intensivo de aração causa erosão, desertificação, degradação da matéria orgânica do solo e deterioração dos recursos hídricos. A mobilização do solo também pode causar

danos às raízes das oliveiras, diminuindo a estabilidade das plantas e sua capacidade de absorver nutrientes e água. Além disso, essa prática promove a mineralização do carbono, o que libera CO_2 e contribui para o fenômeno da mudança climática. Alternativas sustentáveis, como o uso de culturas de cobertura e o manejo de resíduos orgânicos, têm demonstrado melhorar a saúde do solo e aumentar a resiliência das oliveiras (Michalopoulos et al., 2020).

O solo é fundamental para a fixação de carbono nos ecossistemas terrestres. A avaliação e o monitoramento do carbono armazenado no solo ajudam na compreensão do papel atual e potencial de vários ecossistemas como reservatórios de carbono. No entanto, o conhecimento sobre a distribuição e a dinâmica do carbono no solo é muito limitado tanto em Portugal quanto a nível global, especialmente em termos de dimensões específicas, como a paisagem (Chen et al., 2014).

A neutralidade do carbono e a preservação da biodiversidade dependem da adoção de soluções naturais para o sequestro de carbono. Revitalizar áreas rústicas abandonadas e implementar planos para reduzir o risco de incêndio e transformar a paisagem são necessários. Toda área que tem usos agrícolas ou não, desempenham papel importante neste cenário. Os mercados de carbono voluntários ajudam a reduzir as emissões e o sequestro de carbono por meio do desenvolvimento de novas tecnologias e da promoção do desenvolvimento sustentável e da conservação da natureza (Decreto-Lei n.o 4/2024, de 5 de janeiro, 2005).

Tendo em vista o uso dos solos nos olivais e, sabendo das condições dos solos no NE de Portugal, objetivou-se neste trabalho, mostrar o efeito da atividade da mobilização e a utilização de coberturas verdes nos olivais e, mostrar suas vantagens para a região.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Com o presente trabalho pretende-se avaliar o efeito de duas técnicas de gestão do solo (mobilização com escarificador e coberturas verdes) na distribuição espacial e em profundidade do armazenamento de carbono no solo de um olival de Trás-os-Montes.

Objetivos Específicos

- Quantificar o carbono total armazenado por unidade de área num olival localizado em Trás-os-Montes;
- Estudar os efeitos produzidos pelas técnicas de gestão do solo no armazenamento de carbono no solo;
- Estudar a influência da copa das oliveiras na quantidade de carbono armazenada no solo;
- Quantificar os créditos de carbono adicionais gerados pelo uso de uma técnica sustentável de gestão do solo (coberturas verdes) e possível criação de lucro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cultura da oliveira em Portugal

A oliveira (*Olea europaea* L.) foi uma das primeiras frutíferas cultivadas pela humanidade, pertence à família Oleaceae, à subfamília oleóidas e apresenta espécies em várias regiões do mundo. As oliveiras são mencionadas em narrativas da mitologia grega, sendo que a mais antiga referência documentada data do século XVI, descoberta no Egito (Teramoto et al., 2010). Do ponto de vista histórico, há crenças diversas sobre a origem da oliveira, havendo algumas teorias que a associa à Síria, Líbano ou Israel, enquanto outros sugerem sua origem na Ásia Menor, Egito ou Etiópia (Bohm et al., 2013).

Em Portugal, essa cultura é uma das mais antigas, com oliveiras centenárias presentes em muitas áreas de produção. A oliveira está bem-adaptada às condições mediterrâneas, como as encontradas em Portugal, e é capaz de produzir azeites de alta qualidade (Almeida, 2002). As temperaturas ideais para o seu desenvolvimento variam entre 10°C e 30°C. Acima de 35°C, a planta inicia um processo de regulação térmica fechando os estômatos para evitar a perda excessiva de água. Para quebrar a dormência e iniciar o processo reprodutivo, as oliveiras necessitam de exposição a temperaturas baixas, embora o seu desenvolvimento seja limitado nessas condições. Avanços na pesquisa genética permitiram que as oliveiras se tornassem mais tolerantes ao frio e capazes de suportar ambientes com baixas temperaturas (Maia, 2010). A formação incompleta das flores durante a fase de floração pode ser prejudicada por temperaturas baixas, ligeiramente acima de 0° C. Quanto mais tempo as flores ficam expostas a essas temperaturas, maior é o dano. Temperaturas abaixo de 0° C podem ser prejudiciais durante o crescimento e maturação dos frutos, prejudicando a produção e a qualidade do azeite. Os pequenos danos aos brotos e ramos jovens podem causar doenças (como tuberculose) e pragas no estado de dormência vegetativa, quando as temperaturas caírem de 0 a -5° C. A morte de toda a parte aérea da planta pode ocorrer abaixo de -10° C, mas ramos jovens e brotos podem morrer abaixo de -5° C (Barranco et al., 2008). A oliveira se destaca pela sua longevidade e rusticidade, podendo-se desenvolver e frutificar mesmo em ambientes com pouca precipitação e solos pouco nutritivos, graças

à sua capacidade de rebrotação mesmo em troncos envelhecidos (Santos & Ramos, 1987).

Os olivais de sequeiro, que constituem cerca de 30% dos olivais portugueses, foram gravemente afetados por condições climáticas desfavoráveis, como secas prolongadas, o que levou a uma redução na produção, porém, Portugal ainda produziu 126.000 toneladas de azeite em 2022, uma queda de aproximadamente 40% em comparação com o recorde de produção de 210.000 toneladas em 2021 (DeAndreis, 2022).

O desenvolvimento de novas tecnologias de produção e a construção de novos olivais em sistema intensivo e superintensivo aumentaram significativamente a produtividade, fazendo com que nos ultimos 10 anos, basicamente Portugal dobrou sua produção de azeites. Além disso, a concentração e a capacidade de transformação dos lagares industriais aumentaram. O aumento dos preços do azeite português, principalmente do azeite virgem-extra e virgem, e o reconhecimento da qualidade do produto, tanto nacional quanto internacionalmente, permitiram que o país alcançasse a autossuficiência e aumentasse suas exportações. No entanto, a produção per capita tem variado, com uma queda de mais de 9% em todo o mundo nos últimos dez anos (INE, 2018).

3.2 Carbono

É inquestionável a importância do carbono e seus compostos num âmbito global. Na natureza, esses elementos (proteínas, carboidratos e gorduras) são essenciais para toda a matéria viva e são essenciais para a fotossíntese, a respiração e a regulação do clima (Martins et al., 2003).

Os oceanos, a atmosfera, os solos, as reservas geológicas e a biomassa vegetal são os cinco principais reservatórios de carbono do mundo (Lancho, 2007). O sequestro de carbono no solo é uma abordagem útil pois aumenta a produção de biomassa, restaura o solo degradado, melhora a qualidade das águas superficiais e subterrâneas e

diminui as emissões de CO_2 atmosféricas causadas pela queima de combustíveis fósseis, entre outras fontes (Lal, 2004).

Os vários compartimentos do Ciclo Global do Carbono (Figura 1) estão interligados entre si. As emissões naturais são reguladas pela respiração dos organismos, degradação de resíduos orgânicos, fotossíntese e trocas gasosas nos oceanos, sendo que as atividades humanas afetam diretamente esses compartimentos e os fluxos de carbono. As emissões resultantes da queima de combustíveis fósseis e da utilização do solo constituem as mais importantes fontes de carbono liberado para a atmosfera (Sanquetta et al., 2011).

Na natureza, as substâncias orgânicas que compõem a biosfera são feitas principalmente por ciclos de carbono e oxigénio. A fotossíntese é uma etapa importante desse processo porque as partes verdes das plantas absorvem dióxido de carbono da atmosfera e o transformam em compostos de carbono. Além de fornecer oxigénio à atmosfera, esses compostos são adequados para a formação da estrutura vegetal. A respiração usa esse oxigénio e, em seguida, ocorre o processo inverso: o oxigénio é absorvido e o dióxido de carbono é liberado, concluindo assim o ciclo (Paulilo et al., 2015).

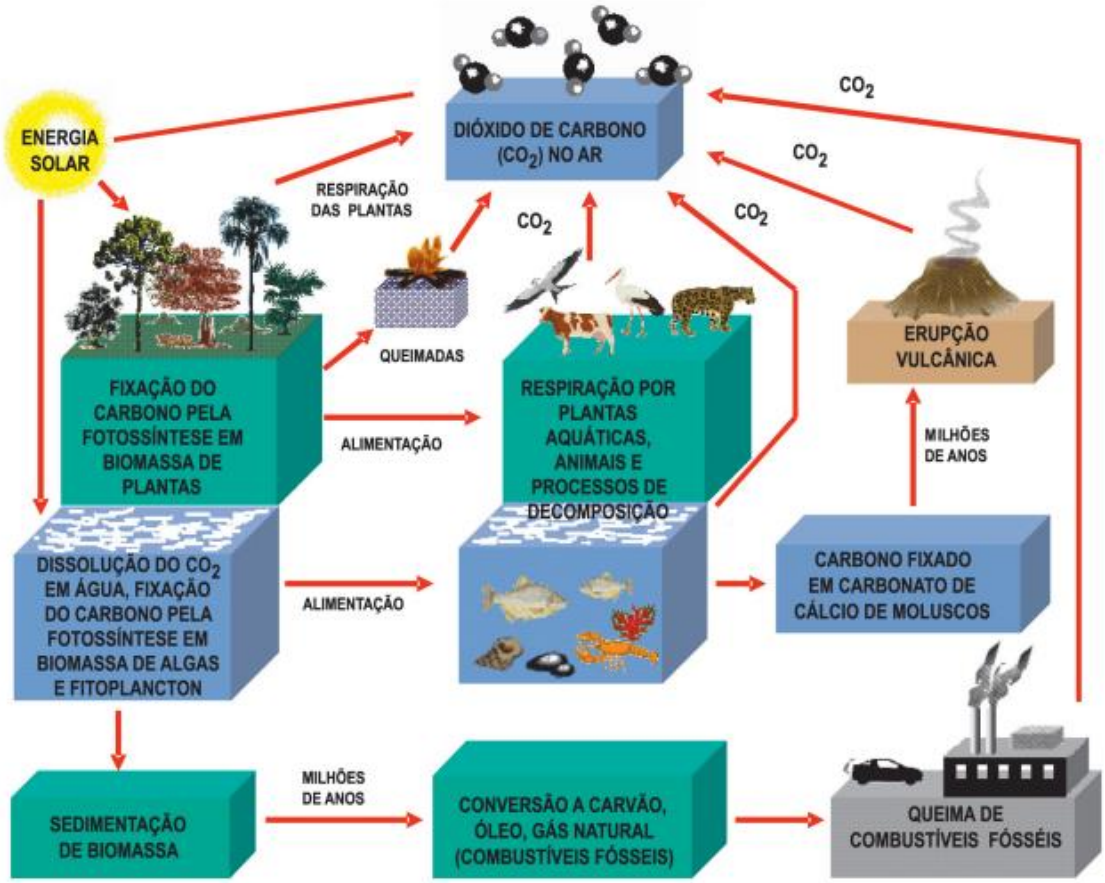

Figura 1 - Ciclo global do carbono Fonte: Adaptado de Martins et al. (2003).

O IPCC (2024) afirma que, por meio do acúmulo de carbono na matéria orgânica, o solo pode funcionar como reservatório ou emissor de CO_2 para a atmosfera. O tipo de gestão do solo utilizado e as condições ambientais locais afetam diretamente essa função (Houghton et al., 2001). Nos últimos anos, a preocupação com a sustentabilidade agrícola tem aumentado. Assim, a qualidade do solo é um componente crucial para atingir a sustentabilidade de um sistema de produção, constituindo as técnicas de gestão do solo a chave para atingir uma produção sustentável (Loss et al., 2009).

O carbono orgânico do solo, o horizonte orgânico, os sistemas radiculares e a biomassa aérea são os quatro principais componentes que compõem o carbono presente nos ecossistemas terrestres (Lancho, 2007). O carbono orgânico do solo é constituído por matéria orgânica viva (micro e macrorganismos), representa menos de 4%, e por

matéria orgânica morta (restos de plantas e animais), variando entre 96 e 98% do carbono orgânico total armazenado no solo. O solo é o principal reservatório de carbono nos ecossistemas terrestres.

O processo natural de decomposição dos resíduos orgânicos (mineralização e humificação), resulta na incorporação de carbono orgânico no solo, que é distribuído ao longo do perfil do solo principalmente por processos de translocação e pela atividade biológica do solo (Lal et al., 1997). Uma grande variedade de fatores, como temperatura, clima, cobertura vegetal, tipo de solo, práticas de uso da terra e gestão do solo, impactam a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS). As propriedades físicas e químicas da MOS são afetadas por esses fatores, controlando a quantidade e qualidade da MOS, a composição e a atividade das comunidades microbianas decompositoras, a mineralização da MOS, a translocação de compostos orgânicos e a perda de MOS por erosão (Feller & Beare, 1997). A presença de vegetação perene, o aumento de biomassa vegetal e a diminuição da temperatura potencializam o acúmulo e a estabilidade do carbono orgânico no solo, como ocorre em ecossistemas de vegetação arbustiva e florestal (Lal, 2004).

3.3 Sequestro e armazenamento de carbono no solo

A retenção de carbono no solo é o resultado de um processo dinâmico influenciado pela entrada de matéria orgânica e sua subsequente decomposição. Devido às propriedades únicas do solo, ele tem a capacidade de armazenar uma quantidade significativa de carbono, excedendo em três vezes a quantidade presente na atmosfera e em duas vezes a quantidade encontrada na vegetação. Esse papel crucial do solo como reservatório primário de carbono desempenha uma função vital no ciclo global desse elemento (Petrokofsky et al., 2012).

A perda de carbono orgânico proveniente tanto do solo quanto da vegetação (respiração, decomposição dos resíduos orgânicos), contribui para reduzir o processo de sequestro de carbono atmosférico. O sequestre de carbono é crucial na mitigação dos gases de efeito estufa e na minimização da poluição atmosférica (Njana et al., 2021). O

sequestro de carbono é basicamente conduzido por processos como humificação, agregação e sedimentação, sendo a agregação um dos principais contribuintes para esse processo no solo (Lal, 1997). A humificação é caracterizada pela formação de húmus, resultante da decomposição e transformação de material orgânico por microrganismos (Kiehl, 1979). Esses processos promovem a geração desse material fundamental para o sequestro de carbono. Por outro lado, as perdas de carbono ocorrem através de mecanismos como lixiviação, erosão, volatilização e decomposição aeróbica ou anaeróbica (Correia, 2021).

De acordo com Resk et al. (1991), os fatores que influenciam a capacidade de retenção e manutenção do estoque de carbono orgânico no solo incluem variáveis como clima, cobertura vegetal, drenagem, práticas de gestão do solo, textura, mineralogia e estrutura do solo. Além disso, a manutenção desse estoque está intimamente ligada à quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos produzidos, à atividade microbiana e à qualidade geral do solo, uma vez que esses fatores determinam o nível de proteção da matéria orgânica contra a decomposição microbiana. Um estudo conduzido por Lal (2007) demonstrou que solos com maior teor de areia tendem a apresentar maior suscetibilidade à perda de carbono, devido à sua maior propensão a processos como lixiviação, baixa agregação das partículas e reduzida atividade das argilas.

Pode-se perceber ainda que de acordo com Patrício (2019), num trabalho desenvolvido no NE Portugal, acima de 1000 metros de altitude, a concentração de carbono, em todas as camadas do solo, é substancialmente maior do que aquela observada abaixo dos 800 metros. Entre os 800 e os 1000 metros de altitude, os teores de carbono tendem a ser estatisticamente equivalentes aos registrados acima e abaixo desse intervalo altitudinal, logo é notável a influência da altitude no que se refere aos valores de armazenamento de carbono.

Isso é, em parte, resultado da influência da altitude no microclima local, onde há temperaturas mais baixas e maior disponibilidade de água no solo, o que reduz a decomposição da matéria orgânica e aumenta o estoque de carbono no solo (Smith et al., 2002). Podemos notar ainda na figura 2, os efeitos a altitude em relação aos valores de carbono nos solos de Portugal.

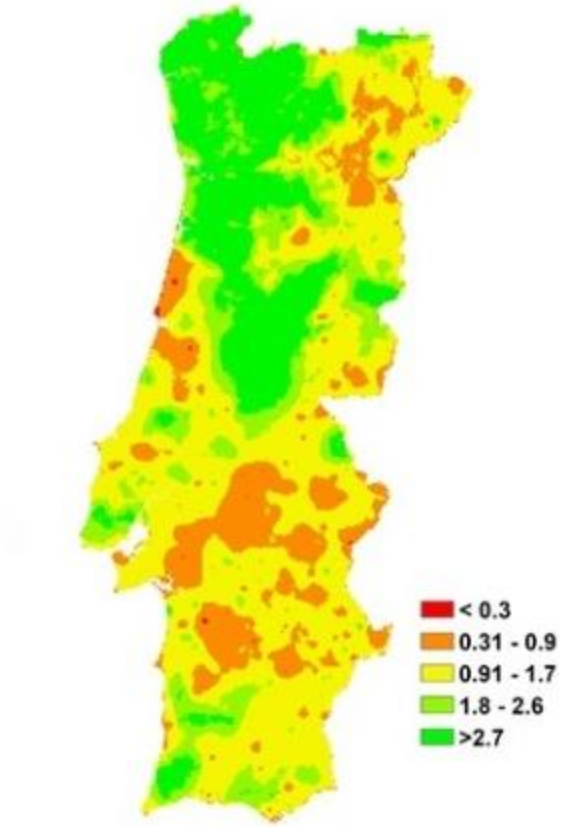

Figura 2 - Mapa da distribuição do carbono orgânico do solo (Mg ha^{-1}) em Portugal Continental. Fonte: Adaptado de (Infosolo, 2024).

As mudanças de uso da terra, particularmente a transformação de florestas em ecossistemas agrícolas influencia diversas características do solo, com um impacto significativo na concentração e reserva de carbono orgânico do solo (COS). A transição para uma utilização agrícola do solo resulta consistentemente na redução do estoque de COS num intervalo de 20-50% (Zaman et al., 2017). Esse declínio no estoque de carbono é atribuído a uma variedade de fatores, incluindo a diminuição na quantidade de biomassa retornada ao solo (tanto acima quanto abaixo da superfície), alterações na umidade e temperatura do solo interferem com as taxas de decomposição da matéria orgânica, maior decomposição de resíduos de culturas devido a diferenças na relação carbono/azoto e no teor de lignina, perturbações induzidas pelo preparação do solo, redução na agregação do solo e, consequentemente, na proteção física da matéria

orgânica do solo, e aumento dos processos erosivos. Assim, os solos agrícolas, especialmente os mais sujeitos à erosão, frequentemente apresentam um estoque de COS inferior ao seu potencial de armazenamento (Zaman et al., 2017).

3.4 Técnicas de gestão do solo em olivais de Trás-os-Montes

Para identificar as potencialidades, limitações e riscos associados ao uso atual e futuro da terra, é necessário conhecer detalhadamente o solo de um território. Sabe-se que os Leptossolos ocupam 72% da região nordeste de Portugal (Agroconsultores & Coba, 1991). Segundo Figueiredo (2013), apenas 12% da superfície do NE português tem solo com mais de 1 metro de espessura efetiva e menos de 25% do território é coberto por solo com mais de 50 centímetros até à camada limitante, que geralmente é composta por rocha dura. A região tem uma abundância de solos com grandes limitações de espessura, incluindo uma pequena parte de solos esqueléticos, com menos de 10 cm de espessura, conhecidos como Leptossolos líticos.

Estima-se que os solos em 84% da área total contenham mais de 30% de elementos grosseiros em volume, o que os torna pedregosos. Aproximadamente 7% da área é composta por solos extremamente pedregosos com mais de 50% de elementos grosseiros. Esses solos constituem um grande obstáculo para a agricultura mecanizada. Aproximadamente 17% da superfície da área é ocupada por culturas permanentes, incluindo vinhas, olivais, soutos de castanheiros, amendoais e pomares de fruteiras (Figueiredo, 2013).

Em culturas agrícolas permanentes podem ser utilizadas diversas técnicas de gestão do solo. A técnica de mobilização convencional, comumente adotada em Trás-os-Montes, geralmente envolve o reviramento das camadas do solo. A mobilização mínima restringe-se à utilização de implementos que realizam uma mobilização vertical das camadas do solo, sem reviramento. A prática de não-mobilização utiliza coberturas verdes (formadas pela vegetação adventícia ou semeadas), evitando intervenções mecanizadas ao nível do solo (Azevedo & Gomes, 2015).

A mobilização do solo é um processo que promove a oxidação da matéria orgânica, intensificando a mineralização e, consequentemente, liberando nutrientes para as plantas por meio da ação dos microrganismos presentes no solo. Contudo, dependendo do declive do terreno, a mobilização do solo resulta na degradação da camada superficial, contribuindo para uma redução da espessura do solo, da fertilidade do solo e do teor de matéria orgânica (Rodrigues & Correia, 2009). Por outro lado, as técnicas que mantêm os resíduos vegetais na camada superficial do solo (por exemplo, lenha de poda triturada) e/ou utilizam coberturas verdes, contribuem para a conservação do solo e da água, para o aumento da fertilidade do solo e do teor de matéria orgânica, o que resulta num benefício para a produtividade, para a sustentabilidade do sistema e para a mitigação de alterações climáticas. Estas técnicas permitem manter no solo carbono capturado da atmosfera por períodos mais longos (Follett, 2001).

Em Trás-os-Montes, os olivais ocupam frequentemente áreas com topografia acidentada, pelo que a mobilização do solo agrava o problema da erosão do solo e a perda de qualidade do solo. Além disso, a mobilização também afeta a biota edáfica e as interações complexas entre organismos do solo e plantas, resultando em desequilíbrios difíceis de reverter (Simoes et al., 2014).

Alexandre et al. (2007), desenvolveram um trabalho onde estudaram o comportamento da água em solos mobilizados e não mobilizados de olivais. Verificaram que o solo submetido a mobilização tradicional registou uma menor capacidade de drenagem para as camadas abaixo de 20 cm, devido à formação do calo de lavoura. Já o solo não mobilizado exibiu um perfil de umidade mais uniforme nas camadas abaixo de 20 cm, comparativamente ao solo mobilizado. O controle da vegetação, por meio de herbicidas na linha de plantio e corte na entrelinha, contribuiu para teores de umidade mais elevados na profundidade de 0 a 20 cm. Em condições mediterrânicas, a falta de água no período do verão é um dos principais fatores limitantes ao desenvolvimento e produtividade das árvores. Neste sentido, deve ser dada preferência a técnicas de gestão do solo que contribuam para minimizar as perdas de água e favoreçam a infiltração da água das chuvas (Rodrigues et al., 2001).

De acordo com Campos et al. (2023), a mobilização do solo tem impacto na diversidade e abundância de certas espécies vegetais, algumas das quais são atrativas para organismos benéficos. Assim, para a prática de uma produção mais sustentável, recomenda-se realizar a escolha das espécies que serão implantadas (no caso de coberturas verdes semeadas), para garantir uma biodiversidade sustentável e funcional.

3.5 Quantificação do carbono

"É uma característica natural das oliveiras capturar dióxido de carbono da atmosfera, absorvê-lo e posteriormente armazená-lo, inicialmente na biomassa e, em seguida, no solo de maneira duradoura", explicou o responsável pelo departamento do azeite no Conselho Oleícola Internacional (COI). Essa capacidade faz com que os olivais atuem como importantes sumidouros de carbono. De acordo com informações do COI, os olivais, que ocupam uma área de 10,5 milhões de hectares em todo o mundo, têm o potencial de retirar anualmente 47 milhões de toneladas de dióxido de carbono da atmosfera (Daibo, 2023).

Visto que tanto na biomassa das oliveiras, quanto no solo, os compostos de carbono constituem grande parte desta, o desenvolvimento de estudos quanto a métodos de quantificação nos diversos componentes da planta e solo, possibilitam entender melhor o “sequestro” e o “armazenamento” de carbono da atmosfera pelas oliveiras.

A avaliação da biomassa aérea, de acordo com Cedrola (1994), pode ser dividida em métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos envolvem medições diretas, onde as árvores são cortadas e seus componentes separados e pesados. Já nos métodos indiretos, são feitas estimativas baseadas principalmente em dados provenientes dessas medições (uso de equações alométricas), bem como em informações de inventários.

A determinação do teor de carbono envolve a conversão de todas as substâncias orgânicas presentes no resíduo em CO_2. Isso pode ser feito por meio de métodos como combustão seca ou úmida, digestão, oxidação, seguido pela medição do agente oxidante remanescente, utilizando técnicas como titulometria, volumetria, entre outros procedimentos analíticos (Gatto et al., 2009).

Quando se analisa o teor de carbono, as disparidades nos resultados podem surgir devido tanto aos métodos utilizados quanto à composição química dos materiais. Ademais, no caso de compostos, os fatores de conversão dos teores de carbono em matéria orgânica podem variar (Iglesias Jiménez & Pérez García, 1992).

De acordo com Knupp & Ferreira (2011), o emprego da espectrofotometria oferece uma precisão comparável à titrimetria na determinação do carbono presente na biomassa microbiana. Além disso, a utilização da espectrofotometria resulta em uma redução significativa, de até dez vezes, no volume de resíduos gerados durante a análise em comparação com a titrimetria. Essa abordagem torna-se particularmente atraente devido à diminuição da concentração molar do dicromato utilizado e à consequente menor produção de resíduos, o que reduz os riscos de contaminação tanto para o manipulador quanto para o ambiente.

3.6 Mercado de créditos de carbono e possível geração de lucros

É reconhecido que a questão da mudança climática tem se tornado cada vez mais polêmica, tanto em termos económicos quanto ambientais, devido aos potenciais efeitos negativos que pode gerar para as atuais e futuras gerações (Andrade & Costa, 2008).

Nos últimos anos, os países têm se empenhado em ações para enfrentar as mudanças climáticas, reconhecendo a importância desse desafio global. Essa iniciativa reflete uma crescente compreensão da urgência em proteger o planeta e as gerações futuras dos impactos adversos das mudanças climáticas. Os países estão cooperando (especialmente os membros da ONU), implementando políticas e estratégias para reduzir as emissões, promover energias renováveis e fortalecer a resiliência das comunidades diante dos impactos climáticos, visando a um futuro sustentável para nosso planeta (Barbieri & Ribeiro, 2007).

O Protocolo de Quioto, um tratado significativo para provocar grandes mudanças nos comportamentos dos países envolvidos (criado em 1997 e em vigor desde 2005), tem como objetivo estabilizar ou mitigar a emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, reconhecendo que a intensidade da atividade humana em geral sobre o

planeta estava conduzindo a direções prejudiciais em relação às mudanças climáticas (Pinto et al., 2008).

A partir desse acordo, foram estabelecidos mecanismos principalmente destinados a reduzir as emissões de GEE, incluindo o Comércio Internacional de Emissões, a Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Conforme esse acordo, os países desenvolvidos comprometeram-se a limitar suas emissões de GEE, enquanto os países em desenvolvimento assumiram esse compromisso posteriormente (Barbieri & Ribeiro, 2007). Foi através do MDL que se criou o mercado internacional de comercialização de redução de emissões de GEE.

Segundo Vargas et al. (2022), o arranjo de cooperação entre países desenvolvidos e em desenvolvimento para que os primeiros atendam às metas de redução estabelecidas foi denominado MDL. Por meio desse sistema, foi estabelecido um mercado global de créditos de carbono, no qual os países com metas de redução de emissões buscam esses créditos, enquanto os países que implementam projetos de redução de GEE fornecem esses créditos.

Considerando a necessidade de um sistema certificador, é imprescindível que os projetos sejam qualificados por meio de um sistema de registro público, confiável e aceite, desenvolvido com o propósito de garantir que os projetos sejam genuínos, verificáveis e passíveis de relato. Para alcançar a elegibilidade, os projetos devem primeiro obter a aprovação da entidade nacional designada (Designated National Authority – DNA) em cada país. No contexto do Brasil, a DNA é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC), composta por representantes de 11 ministérios (Rettmann, 2023).

De acordo com Barbieri & Ribeiro (2007), a elaboração de um MDL segue alguns passos: inicialmente, é elaborado um documento de conceção do projeto (DCP), que contém todas as informações sobre a empresa que está implantando o projeto, os métodos para medir a quantidade de carbono evitado (chamado de metodologia de linha de base) e o plano de monitoramento das atividades do projeto. Então, o projeto passa pela aprovação da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC). Após a aprovação, o DCP é enviado ao Conselho Executivo da ONU para registro do

projeto de MDL, o qual deve ser certificado e monitorado para garantir a continuidade e a geração de Reduções Certificadas (RCEs).

Após a confirmação de que a empresa está devidamente certificada e monitorada, inicia-se um novo processo denominado mercado de crédito de carbono. Como o Protocolo de Quioto ainda não está devidamente validado, ainda não há um mecanismo de certificação mundial padrão em funcionamento, logo todo crédito gerado, tem a possibilidade de ser comercializado no mercado voluntário. Conforme Alves et al. (2013), as indústrias lançam anualmente no mundo todo cerca de 35,5 bilhões de toneladas de CO_2 na atmosfera. Em teoria, esse modelo pode oferecer mais de um benefício. Para as indústrias compradoras, é mais econômico adquirir esses créditos do que alterar seu próprio processo produtivo. Para os vendedores, é uma nova fonte de renda, derivada da conservação ambiental.

É essencial notar que o mercado de carbono pode operar de duas maneiras: regulado ou voluntário. No mercado regulado, onde são negociadas as RCEs, as regras são estabelecidas pelo Protocolo de Quioto e requerem regulamentação e monitoramento rigorosos. Por outro lado, no mercado voluntário, muitas empresas enfrentaram desafios devido aos altos custos de transação e ao desenvolvimento de projetos no MDL, o que levou à criação de um mercado onde a participação é opcional e menos regulada (Souza et al., 2012).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e caracterização da área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido num olival localizado em Suções, Mirandela, NE Portugal (41º 29'N e 7º 14' W, a uma altitude média de 325 m). Trata-se de um olival de sequeiro, com 22 anos de idade e compasso das oliveiras de 7 × 7 m (Figura 3). A mobilização do solo com escarificador tem sido a prática de gestão do solo tradicionalmente aplicada ao longo dos anos (2 a 3 mobilizações anuais).

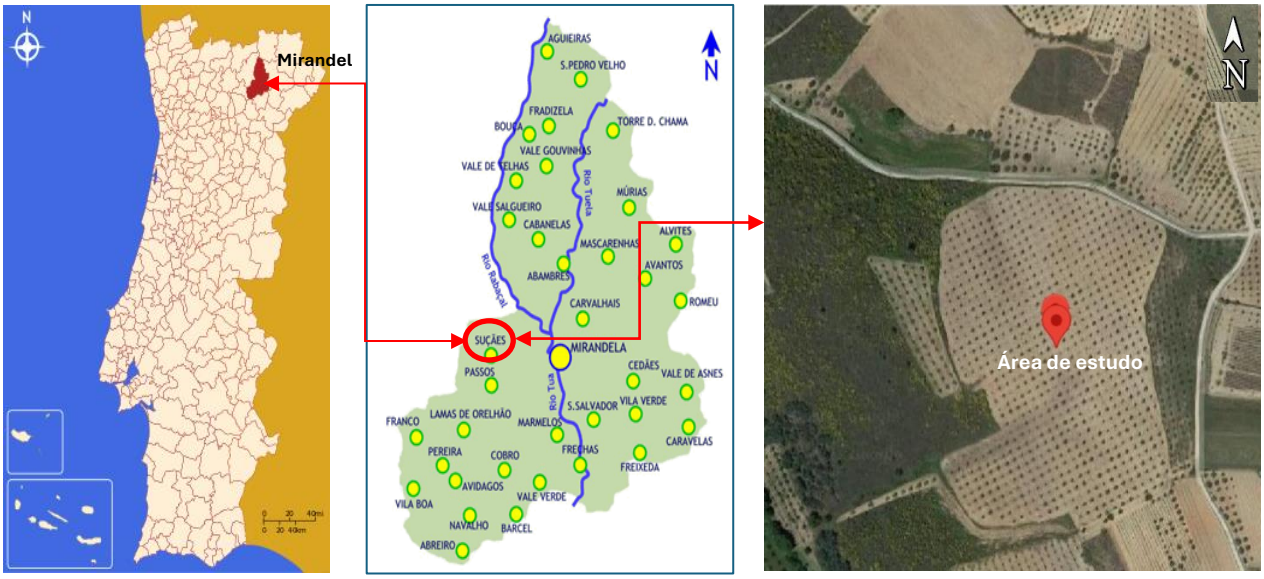

Figura 3 - Localização geográfica da área de estudo.

De acordo com os dados da Estação Meteorológica de Mirandela (Normal Climatológica 1981-2010), localizada a 6 km da área de estudo a 250 m de altitude, a temperatura média anual é de 14,6ºC com médias mensais que variam de 1,4ºC (média dos mínimos de janeiro) e 32,5ºC (média dos máximos de julho) (Figura 4) (IPMA, 2023). A probabilidade de ocorrência de geadas estende-se desde finais de novembro a princípios de março (Agroconsultores & Coba, 1991).

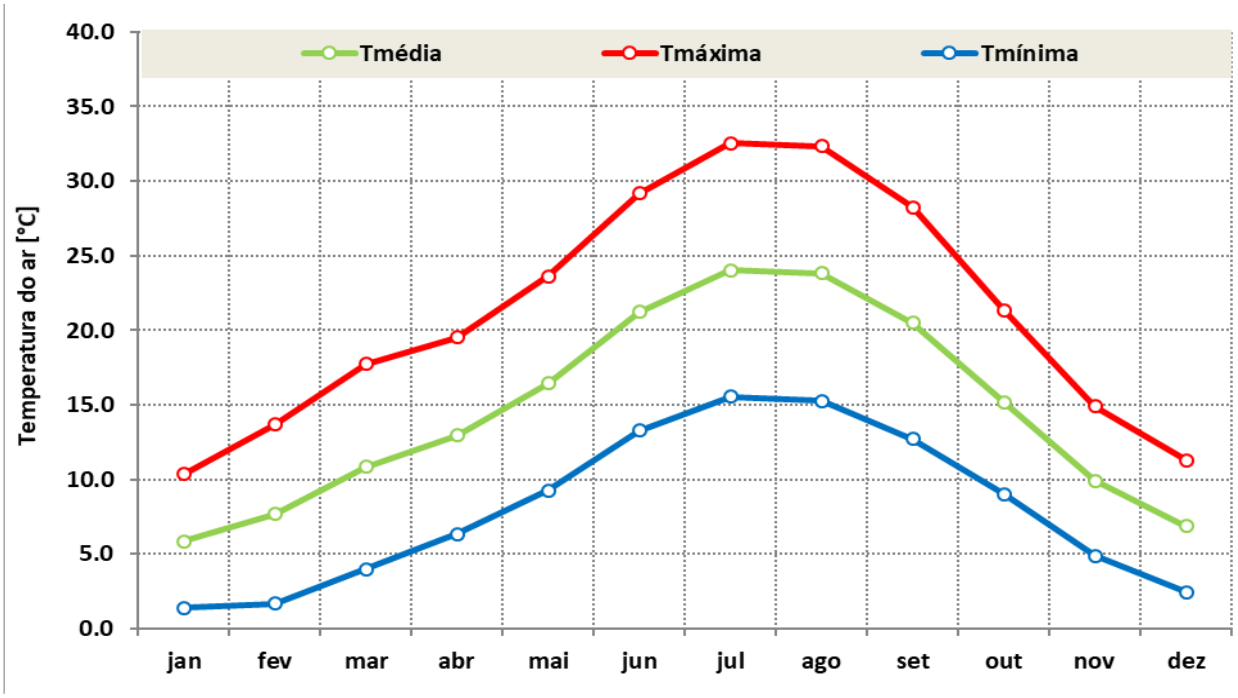

Figura 4 - Média das temperaturas mínimas, médias e máximas mensais registadas na estação meteorológica de Mirandela no período 1981-2010 (IPMA, 2023).

A precipitação média anual é de 544,6 mm, com uma distribuição tipicamente mediterrânea. Os meses de junho, julho e agosto registaram os valores de precipitação mais baixos (inferiores a 30 mm) e os meses de outubro, novembro e dezembro os mais altos (superiores a 60 mm). O mês de dezembro mostra ser o mês mais chuvoso na região com 76,9 mm e o mês de julho o mais seco com 15,1 mm (Figura 5) (IPMA, 2023). Apesar da precipitação anual apresentar um valor próximo do valor de referência do clima semiárido (500 mm), é comum ocorrerem eventos extremos de precipitação como os registados nos dias 19 de outubro de 1984 (60 mm), 18 de setembro de 2009 (53,5 mm) e 2 de março de 2001 (49,5 mm) (IPMA, 2023), apresentando estes eventos uma elevada erosividade da precipitação.

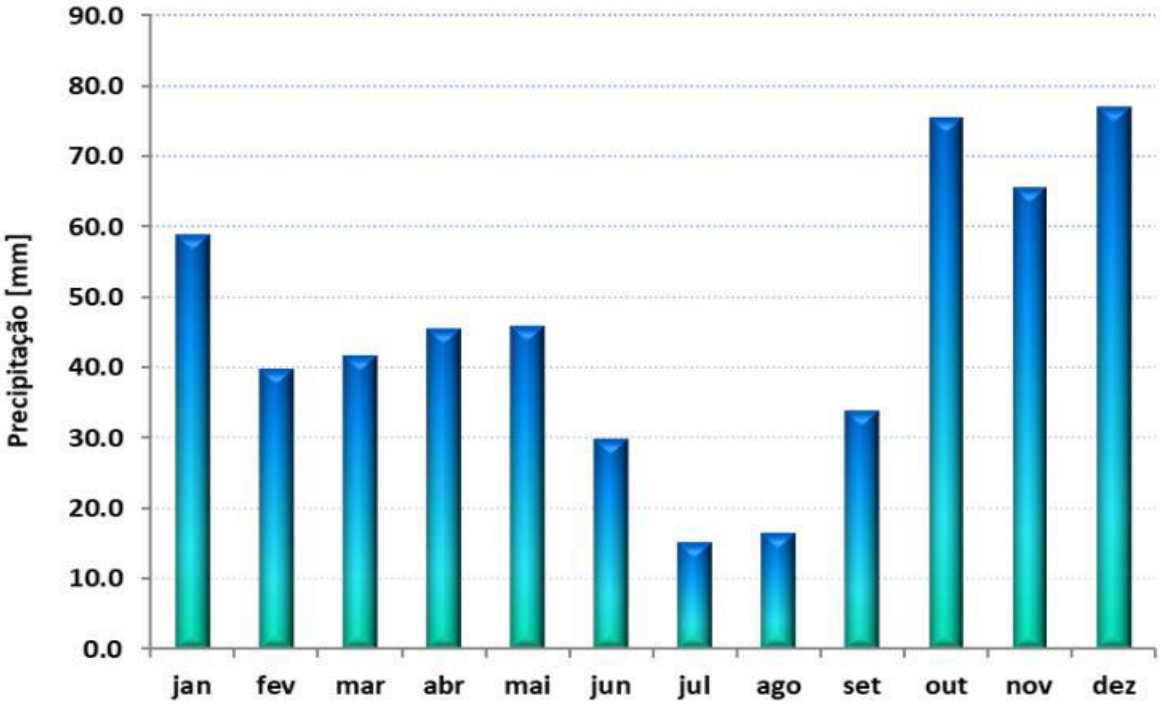

Figura 5 - Precipitação média anual para o período 1981-2010 em Mirandela (IPMA, 2023).

Os solos da área de estudo estão muito degradados, pois ao longo do tempo têm sido submetidos a mobilizações sistemáticas (2 a 3 mobilizações por ano), que associadas ao declive (> 5%), têm contribuído para acelerar os processos erosivos e consequente perda de espessura e da fertilidade do solo. Assim, a unidade solo predominante são os Leptossolos dístricos derivados do xisto, caracterizados por serem delgados (espessura < 30 cm), pedregosos, ácidos e pobres em matéria orgânica. Os Leptossolos representam a unidade solo dominante nos olivais de Trás-os-Montes, ocupando cerca de 80% de toda a área de olival. Neste contexto, é crucial implementar técnicas sustentáveis de gestão do solo que promovam a conservação do solo e a recuperação das funções produtivas e ambientais do solo, de modo a aumentar a qualidade e a quantidade de produção de azeitonas e azeite.

4.2 Delineamento experimental e colheita de amostras

O campo experimental é constituído por duas áreas de amostragem: uma com uma área de 1,2 ha onde se realizou a mobilização tradicional do solo com escarificador (Figura 6a) e outra de área 1,5 ha onde foi deixada a cobertura verde de vegetação adventícia, formada por uma mistura de espécies de gramíneas (família Poaceae), leguminosas (família Fabaceae) e outras (Figura 6b).

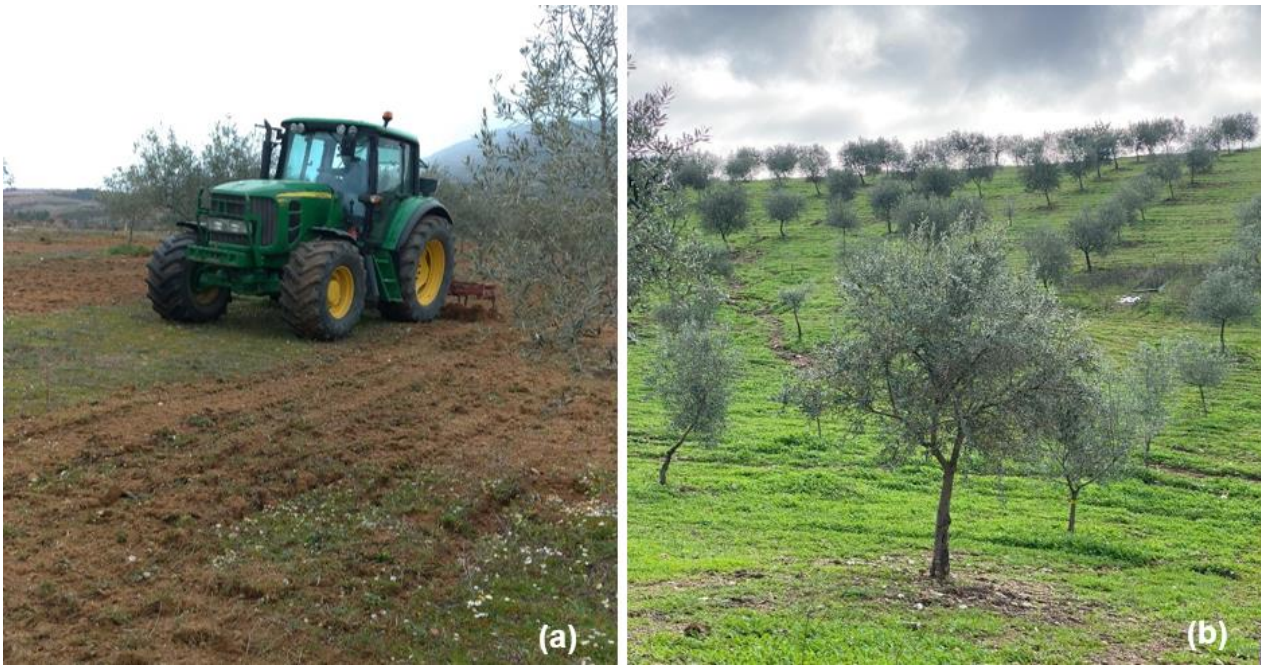

Figura 6 - Técnicas de gestão do solo: mobilização tradicional do solo com escarificador (a) e manutenção de coberturas verdes (b).

Cada área de amostragem corresponde a uma técnica de gestão do solo, tendo sido definidos dois tratamentos: (1) mobilização tradicional do solo com escarificador (MOB); (2) não mobilização, com coberturas verdes (CVE). Em cada tratamento foram estabelecidas 5 parcelas de amostragem com 12 oliveiras cada (10 parcelas de amostragem no total). Por sua vez, em cada parcela foram definidos 8 pontos de colheita de amostras de solo (4 debaixo das copas das oliveiras e 4 nas entrelinhas) (Tabela 1). As amostras de solo foram colhidas nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, sensivelmente a 50 cm da base do tronco das oliveiras (DC, debaixo da copa) e no centro da entrelinha

(EL) em linha reta com o ponto amostrado debaixo da copa (Figura 7). Em ambas as profundidades foram colhidas amostras perturbadas com vista à determinação do teor de elementos grosseiros (partículas > 2 mm) e da concentração de carbono na terra fina (partículas ≤ 2 mm) e amostras não perturbadas em cilindros de 100 cm^3 de volume para determinação da densidade aparente do solo. Em cada parcela, as 4 amostras perturbadas colhidas DC foram misturadas, por profundidade, de forma a conseguir uma boa homogeneização e retirada uma amostra compósita com cerca de 1 kg. O mesmo procedimento foi repetido para as amostras colhidas na EL. Assim, por cada tratamento obtiveram-se 5 amostras compósitas para a profundidade 0-10 cm e 5 amostras para a profundidade 10-20 cm DC e na EL, totalizando 40 amostras (20 para o tratamento MOB, 20 para o tratamento CVE). As amostras de solo foram colhidas sensivelmente um ano após a instalação das duas técnicas de gestão do solo (tratamentos).

Tabela 1 - Tratamentos estabelecidos e esquema de amostragem

TRATAMENTOS	
MOB - Mobilização do Solo	**CVE** – Cobertura Verde
5 Parcelas de amostragem	5 Parcelas de amostragem
Colheita de 2 amostras compostas (sendo 4 pontos de recolha) por parcela, 1 DC e 1 EL	
2 Profundidades: 0-10 cm e 10-20 cm	

Figura 7 - Coleta de amostras de solo.

4.3 Processamento das amostras de solos e análises laboratoriais

As amostras de solo perturbadas foram transportadas para o laboratório, colocadas numa estufa a 45ºC durante 48 h. Seguidamente foram crivadas num crivo de malha de 2 mm de modo a separar os elementos grosseiros (partículas com dimensões > 2 mm) da terra fina (partículas com dimensões ≤ 2 mm). Com base no peso total de cada amostra e do respetivo peso dos elementos grosseiros, foi possível determinar a percentagem de elementos grosseiros do solo por profundidade e tratamento. Na terra fina foi avaliada, em laboratório, a concentração de carbono por combustão a 1000ºC e determinação em analisador elementar.

As amostras não perturbadas foram secas a 105ºC durante 48 h, com vista à determinação da densidade aparente (Dap) através da razão entre a massa volúmica aparente do solo (ρs) e da água (ρ = 1g/cm³):

$$\mathrm{Dap} = \frac{\rho s}{\rho}$$

A massa volúmica aparente do solo foi calculada pela seguinte razão:

$$\rho s = \frac{\text{Massa solo seco}}{\text{Volume cilindro}}$$

Onde a massa de solo seca foi obtida por pesagem da amostra após secagem em estufa por 48h a 105°C.

4.4 Cálculo da quantidade de carbono no solo

A partir das variáveis densidade aparente, percentagem de elementos grosseiros e concentração de carbono no solo, foi possível determinar a quantidade de carbono armazenada, por unidade de área (Mg C ha^{-1}), nas camadas minerais do solo (0-10 e 10-20 cm).

A quantidade de carbono armazenada no solo (CS, Mg C ha^{-1}) foi calculada multiplicando a concentração de carbono (Cc, g kg^{-1} ou kg Mg^{-1}) pela densidade aparente (Dap, g cm^{-3} ou Mg m^{-3}) e espessura de cada camada de solo (z, m), com correção para o teor de elementos grosseiros (EG, v v^{-1}), utilizando a seguinte equação (Fonseca et al., 2022):

$$\mathrm{CS} = \mathrm{z}\ \mathrm{Cc}\ (\mathrm{Dap} - \frac{2{,}65\ \mathrm{EG}}{100})$$

4.5 Tratamento estatístico

A análise estatística dos dados compreendeu estatística descritiva (média, desvio padrão), análise de variância (ANOVA a um fator) e comparações múltiplas de médias (Tukey, $p < 0{,}05$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Armazenamento de carbono no solo do olival

As técnicas de gestão do solo, a profundidade e o local onde se procedeu à colheita de amostras de solo influenciaram a quantidade de carbono armazenado por unidade de área. Na Figura 8 é possível observar que nas duas profundidades amostradas (0-10 e 10-20 cm), a quantidade de carbono armazenada no solo é superior para a técnica de gestão que utilizou coberturas verdes (CVE) e, como seria de esperar, sempre mais elevada debaixo da copa comparativamente à entrelinha.

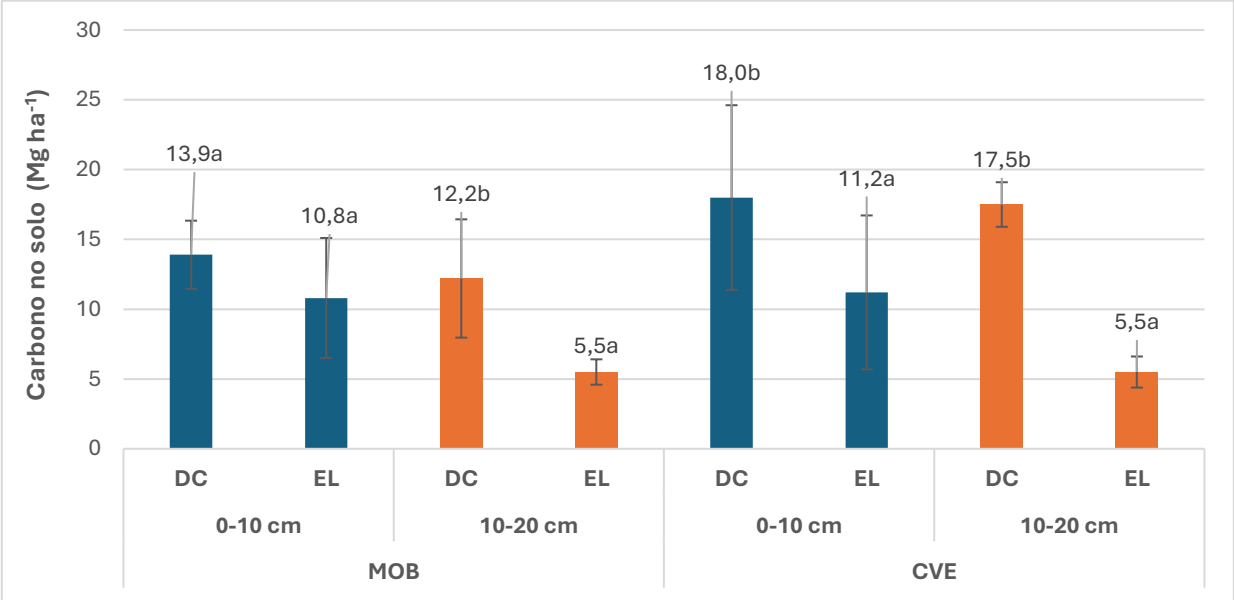

Figura 8 - Carbono armazenado no solo de acordo com a técnica de gestão do solo (MOB - mobilização do solo e CVE - cobertura verde), profundidade do solo (0-10 e 10-20 cm) e local de recolha das amostras de solo (DC - debaixo da copa e EL - entrelinha). Para a mesma técnica de gestão do solo e profundidade, valores das colunas com letras diferentes diferem significativamente os locais de colheita das amostras ($p < 0,05$).

Adicionalmente à manutenção de coberturas verdes, o teor de matéria orgânica dos solos de olival pode ser ainda incrementado através da deposição das lenhas de poda na superfície do solo após trituração (Agro.Ges, 2022). Pian et al. (2023), num trabalho desenvolvido em culturas permanentes, referem que a incorporação no solo de restos

vegetais provenientes das podas contribuiu para o aumento da quantidade de carbono armazenado no solo (com a incorporação de 5t/ha/ano, o acréscimo foi de aproximadamente 17t de CO_2eq/kg de uva), sendo esse aumento mais elevado para a poda manual quando comparada à poda mecânica.

A importância do carbono orgânico do solo, como um componente essencial da capacidade produtiva e da qualidade do solo, é largamente reconhecida. Esta importância é tanto maior quanto menor for a reserva de nutrientes e a capacidade de retenção de água do solo (Avillez & Carvalho, 2015). Ainda segundo os mesmos autores, os baixos teores de matéria orgânica (58% da matéria orgânica é carbono) da grande maioria dos solos agrícolas portugueses deve-se à conjugação de fatores ambientais e de práticas agrícolas adotadas ao longo dos tempos, pois ambos os fatores interferem com os ganhos e perdas de resíduos orgânicos que aportam matéria orgânica ao sistema (Fonseca et al., 2012).

As decisões de gestão agrícola podem exercer importantes impactos sobre o ambiente (recursos solo e água) e a produtividade. A adoção de práticas agrícolas sustentáveis pode potencializar o sequestro de carbono no sistema de produção, resultando em benefícios adicionais para a cadeia produtiva e para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas.

5.2 Efeito das técnicas de gestão do solo no armazenamento de carbono

Analisando a Figura 9, é possível perceber o efeito claro das coberturas verdes (CVE) no armazenamento de carbono na camada superficial do solo (0-20 cm), onde se registou um acréscimo de 4,9 Mg C ha^{-1}, em relação ao solo mobilizado (MOB), e na Figura 10 pode-se observar que 55% do total de carbono armazenado no solo encontra-se no tratamento com CVE e 45% na área mobilizada. De acordo com Olivonews (2024), estudos realizados em oito empresas olivícolas mostraram que o uso de coberturas verdes contribuiu para uma redução de 85,6% da perda de solo por processos erosivos e de 76,4% de perda de carbono. Sendo a matéria orgânica o fator chave da fertilidade do solo e da manutenção das funções produtivas e ambientais do solo (Fonseca et al.,

2022), as coberturas verdes podem contribuir de forma efetiva para a sustentabilidade dos olivais a curto, médio e longo prazo.

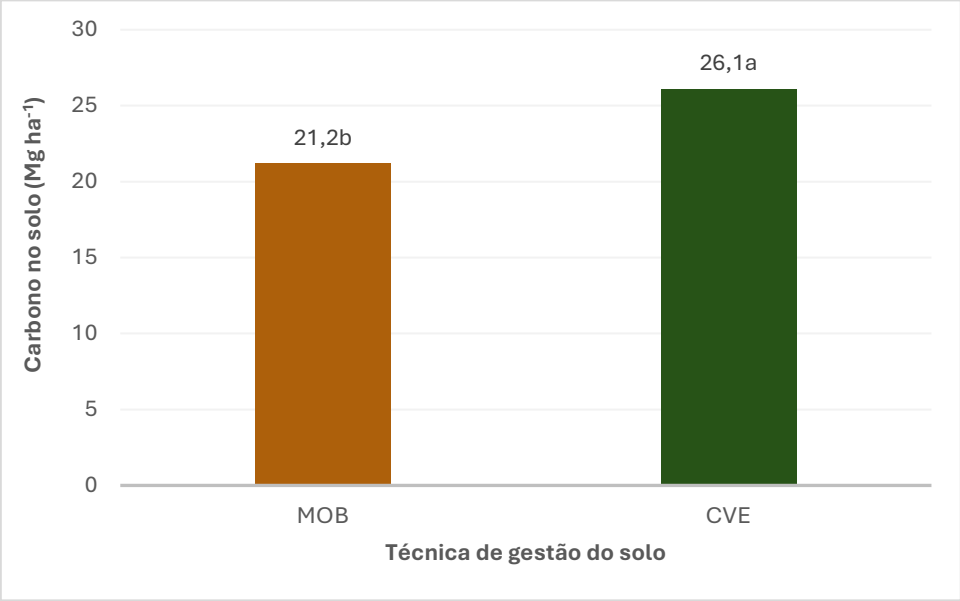

Figura 9 - Efeito da técnica de gestão do solo (MOB - mobilização do solo, CVE - cobertura verde), no armazenamento de carbono na camada 0-20 cm do solo. Valores das colunas com letras diferentes diferem significativamente ($p < 0,05$).

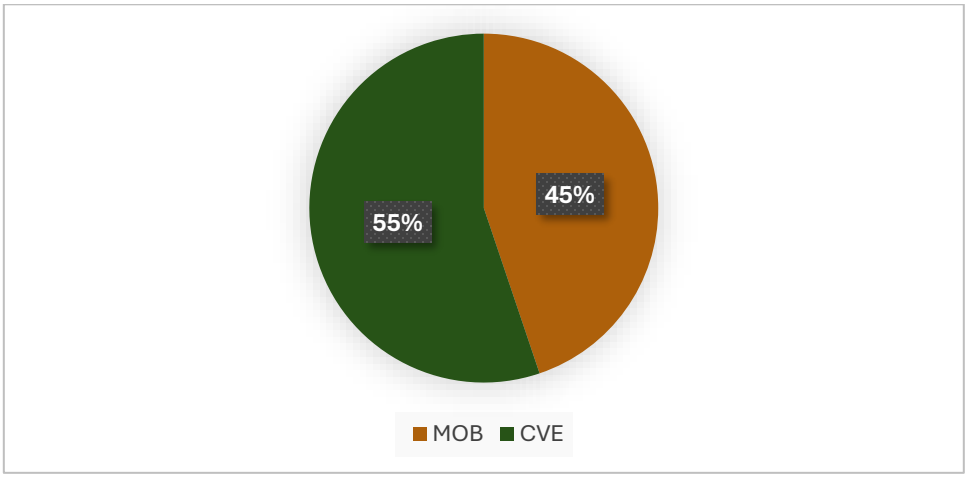

Figura 10 - Acréscimo de carbono no solo com coberturas verdes (CVE) comparativamente ao solo mobilizado (MOB).

5.3 Relação entre armazenamento de carbono e profundidade do solo

A distribuição do carbono em profundidade segue o padrão esperado, isto é, diminui com a profundidade (Figuras 11 e 12). A camada 0-10 cm (13,5 Mg C ha^{-1}) armazena 14% (3,3 Mg C ha^{-1}) carbono a mais que a camada 10-20 (10,2 Mg C ha^{-1}), traduzindo-se em diferenças estatisticamente significativas entre as profundidades.

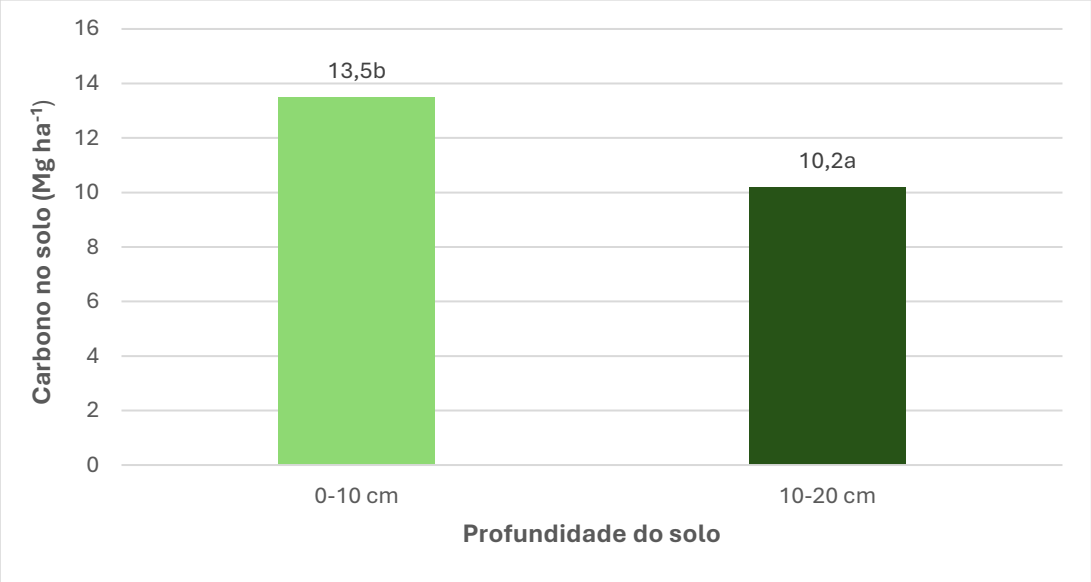

Figura 11 - Efeito da profundidade do solo no armazenamento de carbono. Valores das colunas com letras diferentes diferem significativamente ($p < 0,05$).

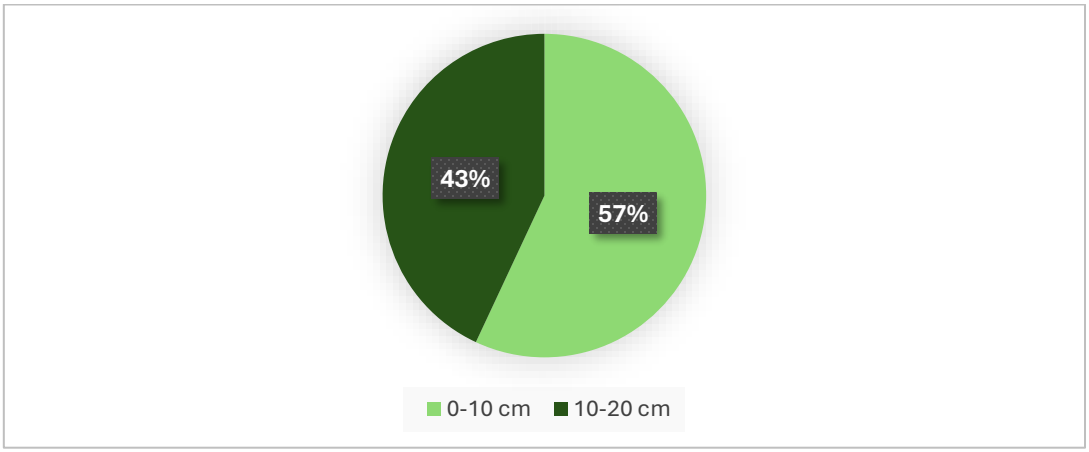

Figura 12 - Acréscimo de carbono na profundidade 0-10 cm do solo comparativamente à profundidade do solo 10-20 cm.

De acordo com Rumpel & Kögel-Knabner (2011) diversos fatores, como a decomposição da matéria orgânica, a atividade microbiana e as características do solo, influenciam a relação entre a profundidade do solo e a quantidade de carbono armazenada. O carbono orgânico do solo geralmente está concentrado nas camadas superficiais, especialmente nos primeiros 30 cm (Porta, 2003). Isso ocorre porque essa camada recebe quantidades superiores de materiais orgânicos em decomposição, como raízes, folhas e outros resíduos vegetais, que fornecem carbono.

A quantidade de carbono armazenado tende a diminuir com a profundidade do solo. Nas camadas mais profundas, a entrada de matéria orgânica é menor e, como resultado da menor disponibilidade de oxigênio e nutrientes, a atividade microbiana, que é essencial para a decomposição e incorporação do carbono, também diminui. No entanto, o carbono localizado nas camadas mais profundas é normalmente mais estável e tem a capacidade de permanecer armazenado por períodos mais longos, o que leva ao sequestro de carbono a longo prazo (Cerqueira, 2021). Portanto, devido à maior incorporação de resíduos orgânicos, as camadas superficiais do solo são geralmente mais ricas em carbono, mas as camadas mais profundas apesar de armazenarem menos carbono, esse carbono é mais estável.

5.4 Armazenamento de carbono no solo em relação ao local de recolha

Levando em consideração os resultados das Figuras 13 e 14, mostra-se evidente a diferença entre os valores de carbono armazenado no solo quando as amostras de solo são recolhidas debaixo da copa ou na entrelinha. Debaixo da copa (30,8 Mg C ha^{-1}) a quantidade de carbono registou um aumento de 30% (14,3 Mg C ha^{-1}) comparativamente à entrelinha (16,5 Mg C ha^{-1}). Assim, verifica-se uma elevada heterogeneidade espacial do armazenamento de carbono, o que está associado à maior produção de resíduos orgânicos debaixo das copas, como folhas e frutos da oliveira e restos de vegetação herbácea, que se vão acumulando ao longo do período vegetativo.

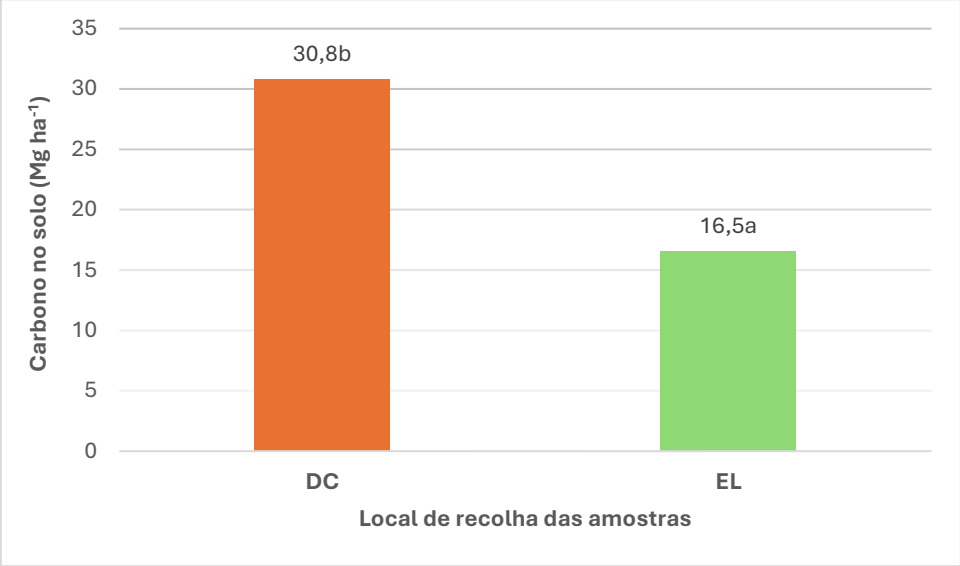

Figura 13 - Efeito do local de recolha de amostras (DC - debaixo da copa e EL - entrelinha) no armazenamento de carbono na camada superficial do solo (0-20 cm). Valores das colunas com letras diferentes diferem significativamente ($p < 0,05$).

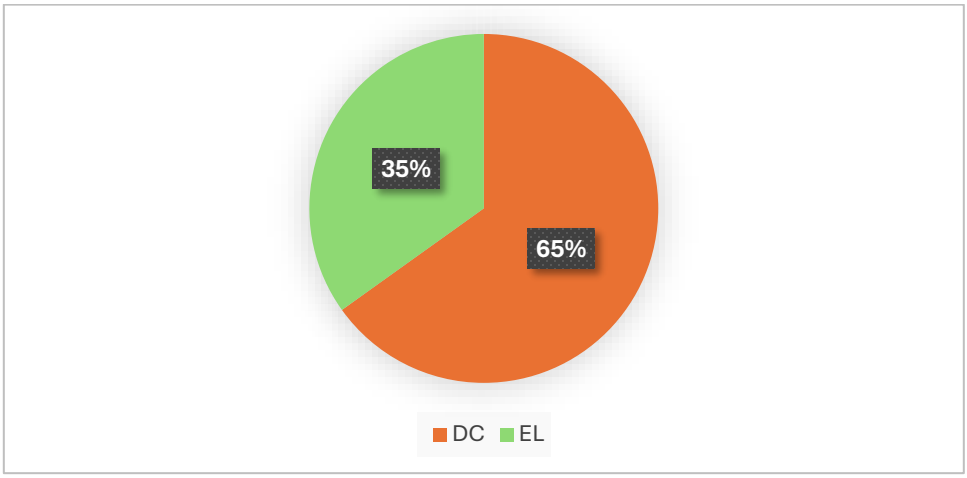

Figura 14 - Acréscimo de carbono debaixo da copa (DC) comparativamente à entrelinha (EL).

De facto, já é conhecido que os materiais orgânicos que caem das plantas e se acumulam no solo são essenciais para a manutenção da matéria orgânica do solo. A

fração dos resíduos orgânicos que se mineraliza libera nutrientes essenciais como azoto, fósforo e potássio, vitais para a saúde e o crescimento das plantas. A fração que se humifica contribui para aumentar a quantidade de matéria orgânica do solo e, consequentemente de carbono, produzindo efeitos na qualidade do solo (melhora a estrutura do solo, aumenta a capacidade de retenção de água e aeração, aumenta a fertilidade do solo) (Porta, 2003). Além disso, a camada de resíduos orgânicos depositados na superfície do solo atua como um isolante térmico, estabilizando a temperatura do solo e protegendo-o de extremos de calor e frio. Essa camada reduz ainda a erosão do solo, protegendo-o do impacto direto das gotas de chuva e diminuindo a velocidade do escoamento superficial, o que minimiza a perda de solo e nutrientes (Pou, 2021).

5.5 Efeitos da densidade aparente, do teor de elementos grosseiros e da concentração de carbono no cálculo do armazenamento de carbono

A quantidade de carbono armazenada no solo, tal como referido em Material e Métodos (Ponto 4.4), está dependente da concentração de carbono no solo, da densidade aparente e do teor de elementos grosseiros do solo (Tabela 2).

A concentração de carbono orgânico decresce com a profundidade, seguindo o padrão de variação mais comumente registado (Tabela 3). Os valores são sempre mais elevados na camada 0-10 cm, debaixo da copa no tratamento de gestão do solo com coberturas verdes (CVE), o que está relacionado com o maior aporte de resíduos orgânicos ao solo nessas condições (Fonseca et al., 2022).

A densidade aparente varia inversamente com o teor de carbono, registando aumentos em profundidade em ambos os tratamentos e local de coleta das amostras, mas com valores superiores na entrelinha (Tabela 2). Os valores variam entre 1,10 g cm^3 e 1,33 g cm^{-3}, mostrando assim boas condições para o crescimento, expansão e desenvolvimento das raízes nos primeiros 20 cm de solo (Porta, 2003). A concentração de carbono explica 60% (r^2 = 0,598) da variação da densidade aparente na camada 0-10 cm de profundidade e 40% (r^2 = 0,396) na camada 10-20 cm. Outros fatores como a

porosidade e a profundidade afetam também a densidade aparente, pois as camadas mais profundas tendem a ser mais compactas (Pádua et al., 2015).

O teor de elementos grosseiros é sempre superior a 25%, indicando que se trata de solos pedregosos (Figueiredo, 2013), atingindo valores muito próximos de 50% e, tendencialmente superiores na camada mais profunda (10-20 cm) (Tabela 2). Essa tendência pode ser explicada pela técnica de gestão do solo usada ao longo de vários anos (mobilização do solo), agravando os processos erosivos e, a consequente perda de partículas de tamanhos menores, uma vez que a perda de solo é geralmente seletiva (Morgan & Rickson, 2003).

Tabela 2 - Concentração de carbono no solo, densidade aparente e teor de elementos grosseiros debaixo da copa (DC) e na entrelinha (EL) nas camadas 0-10 e 10-20 cm de solo para os tratamentos solo mobilizado (MOB) e solo com coberturas verdes (CVE) (média ± desvio padrão).

Profundidade (cm)	Local	Técnica de gestão do solo	
		MOB	CVE
Concentração de C (g kg^{-1})			
0-10	DC	20,7 ± 2,4	28,3 ± 6,6
	EL	13,1 ± 4,2	14,5 ± 1,6
10-20	DC	17,0 ± 4,3	24,7 ± 5,5
	EL	6,1 ± 0,9	6,6 ± 1,1
Densidade aparente (g cm^{-3})			
0-10	DC	1,10 ± 0,06	1,11 ± 0,06
	EL	1,27 ± 0,04	1,25 ± 0,01
10-20	DC	1,19 ± 0,10	1,24 ± 0,05
	EL	1,33 ± 0,01	1,33 ± 0,01
Elementos grosseiros (%)			
0-10	DC	42,9 ± 5,7	47,0 ± 2,1
	EL	43,1 ± 3,3	47,5 ± 2,5
10-20	DC	47,6 ± 3,2	52,8 ± 2,8
	EL	44,2 ± 3,9	48,9 ± 1,5

Com base nas correlações efetuadas (Tabela 3), observa-se que a quantidade de carbono no solo varia diretamente com a concentração de carbono (Cc) e inversamente com a densidade aparente (Dap) e o teor de elementos grosseiros (EG). Tendência idêntica foi observada por (Dores, 2021). Em ambas as camadas de solo (0-10 e 10-20

cm), a concentração de carbono explica mais de 92% da quantidade de carbono armazenada no solo. Já a Dap e os EG, na camada 0-10 cm, contribuem com menos de 42% e 30%, respetivamente. Estas mesmas variáveis na camada 10-20 cm ainda atingem percentagem inferiores (27% para a Dap e 21% para os EG). Esta constatação pode indicar que, neste tipo de sistemas agrícolas, a concentração de carbono é decisiva para a quantidade de carbono armazenado nos primeiros 20 cm de solo.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação (r^2) entre as variáveis concentração de carbono (Cc), densidade aparente (Dap) e elementos grosseiros (EG) com a quantidade de carbono (CS) armazenada nas camadas de solo 0-10 e 10-20 cm (* 0,05>P>0,01; ** 0,01>P>0,001; *** P<0,001).

Profundidade	**Coeficiente de correlação**		
(cm)	CS vs. Cc	CS vs. Dap	CS vs. EG
0-10	0,927***	- 0,411*	- 0,298
10-20	0,972***	- 0,267	- 0,212

5.6 Produção suplementar de créditos de carbono pelas coberturas verdes

Na Figura 9 (Ponto 5.2) apresenta-se os efeitos, no armazenamento de carbono no solo, da técnica de gestão do solo com coberturas verdes (CVE) em relação à mobilização do solo. Observou-se que essa prática resultou em um acréscimo significativo de 4,9 Mg ha^{-1} de carbono no solo. Assim, é possível fazer uma estimativa de quantos créditos de carbono foram gerados com esse acréscimo de carbono no solo do olival. A pegada de carbono é medida em dióxido de carbono equivalente (CO_2e), que considera que os diversos gases com efeito de estufa (dióxido de carbono, óxidos de azoto, metano, etc.) apresentam diferentes índices de aquecimento global (Alves et al., 2013)(Cerqueira, 2021).

Um crédito de carbono geralmente representa uma tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) reduzida, evitada ou sequestrada. O carbono sequestrado no solo é contabilizado de acordo com a sua equivalência em CO_2. O fator de conversão

da quantidade de carbono do solo para CO_2 é aproximadamente 3,67 (porque 1 tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO_2) (Tito et al., 2009).

Deste modo, é possível determinar o acréscimo de créditos de carbono produzido pela introdução de coberturas verdes (CVE) comparativamente à técnica de mobilização do solo (MOB):

- 4,9 Mg ha^{-1} de Carbono × 3,67 (fator de conversão para CO_2e)
- **≅ 18 Mg ha^{-1} de CO_2e.**

Pode-se perceber que com esta prática (CVE), obtiveram-se aproximadamente 18 créditos de carbono suplementares, que podem ter diferentes interpretações e perceções. O produtor não somente está beneficiando o solo e o ecossistema como um todo, mas também pode estar a obter uma renda suplementar devido à utilização de práticas sustentáveis de gestão do solo (coberturas verdes).

6. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo quantificar o armazenamento de carbono do solo de um olival na região nordeste de Portugal e realizar uma análise comparativa entre duas técnicas de manejo do solo. Os resultados mostraram variações significativas no armazenamento de carbono dependendo da técnica de manejo do solo utilizada, colocando assim em destaque a importância do uso de práticas de gestão do solo sustentáveis.

A quantidade de carbono armazenada atingiu os maiores valores na camada superficial (0-10 cm), debaixo das copas das oliveiras (DC) no tratamento em que foi usado coberturas verdes como técnica sustentável de gestão do solo (CVE). Essa quantidade de carbono está estritamente dependente da concentração de carbono no solo, tendo a densidade aparente e o teor de elementos grosseiros do solo produzido efeitos menos percetíveis sobre o carbono por unidade de área de solo. Num período de sensivelmente um ano, comparativamente ao solo mobilizado, o tratamento com coberturas verdes resultou num acréscimo de 4,9 Mg C ha^{-1}. Além dos benefícios ambientais e de produtividade que este acréscimo de carbono traz, o uso de coberturas verdes também pode gerar vantagens econômicas a médio/longo prazo. As coberturas verdes não só melhoram a qualidade do solo, mas também têm o potencial de gerar lucros adicionais através da venda de créditos de carbono, devido ao superior armazenamento de carbono no solo.

Para trabalhos futuros, sugere-se a coleta anual de amostras de solo para monitorar o armazenamento e sequestro de carbono a longo prazo. Além disso, um estudo de caso poderia ser realizado em parceria com empresas especializadas para quantificar o carbono sequestrado e explorar a conversão desse valor em uma fonte adicional de renda para os produtores, através da venda de créditos de carbono.

REFERÊNCIAS

AEEC, A. de E. E. do C. das I. e do A. (2022, September 14). *Azeitonas para a vida: ligam a agricultura e a biodiversidade*. Comissão Europeia. https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/olives-life-connect-agriculture-and-biodiversity-2022-11-14_en?prefLang=pt&etrans=pt

Agroconsultores, & Coba. (1991). *Carta dos solos, carta do uso atual da terra e carta da aptidão da terra no nordeste de Portugal*. Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro . https://snisolos.dgadr.gov.pt/images/docs/Carta_Solos_Uso_Aptidao_Terra_do_NE_Memorias.pdf

Agro.Ges. (2022). *Sustentabilidade dos Olivais em Portugal*. Principia.

Alexandre, C., Andrade J., & Afonso, T. (2007). Efeitos da mobilização do solo e do controlo da vegetação no teor de água do solo em olivais no Alentejo. *Revista de Ciências Agrárias*, 217–232.

Almeida, A. (2002). *Avaliação e selecção de sistemas de colheita mecânica de azeitona* [Tese de Doutoramento em Engenharia Agrícola, Universidade de Évora]. https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/4218/1/Arlindo%20AlmeidaTese%20Doutoramento.pdf

Alves, R. S., Oliveira, L. A. de, & Lopes, P. de L. (2013). Crédito de carbono: O mercado de crédito de carbono no Brasil. In *Simpósio de Excelência em Gestão e Técnologia*. SEGeT. https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos13/2018412.pdf

Andrade, J. C. S., & Costa, P. (2008). Mudança climática, protocolo de Kyoto e mercado de créditos de carbono: desafios à governança ambiental global. *Organizações & Sociedade*, *15*(45), 29–45. https://doi.org/10.1590/S1984-92302008000200002

Avillez, F., & Carvalho, M. (2015). A importância de uma gestão sustentável do solo para o crescimento. *Gabinete de Planeamento, Politicas e Administração Geral, MAP*. http://hdl.handle.net/10174/16556

Azevedo, P., & Gomes, B. (2015). Effects of early mobilisation in the functional rehabilitation of critically ill patients: a systematic review. *Revista de Enfermagem Referência*, *Nº5*(IV Série), 129–138. https://doi.org/10.12707/RIV14035

Barbieri, K. S., & Ribeiro, M. de S. (2007). *Mercado de créditos de carbono: aspectos comerciais e contábeis* (Vol. 7). Congresso USP de Controladoria e Contabilidade. https://congressousp.fipecafi.org/anais/artigos72007/68.pdf

Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., & Rallo, L. (2008). *El cultivo del olivo* (6th ed.). Sevilla : Junta de Andalucia.

Bohm, J., Godinho, C., & Coelho, F. (2013). A evolução da espécie Olea europaea. In *Grande Livro Da Oliveira E Do Azeite* (1st ed., Vol. 1, pp. 34–52). Dinalivro.

Campos, C., Villa, M., Reis, C., Aguiar, C., & Baptista, P. (2023). Efeito da mobilização do solo na composição do coberto vegetal espontâneo em olival: resultados preliminares. *Revista de Ciências Agrárias*, *45*(4), 463–466. https://doi.org/https://doi.org/10.19084/rca.28565

Cedrola, S. (1994). Biomassa das florestas amazonicas brasileiras. In *Emissão x sequestro de CO2: uma nova oportunidade de negocios para o Brasil* (pp. 95–124). CVRD. https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/10D00215.pdf

Cerqueira, H. M. (2021). *Sequestro de Carbono no Solo: Mitigação das Alterações Climáticas em Ecossistemas Mediterrâneos* [Tese de defesa em Mestre de Gestão do Território, Universidade nova de Lisboa]. https://run.unl.pt/bitstream/10362/117658/1/mestrado_47910_REV_2021.pdf

Chen, J., John, R., Sun, G., McNulty, S., Noormets, A., Xiao, J., Turner, M. G., & Franklin, J. F. (2014). Carbon fluxes and storage in forests and landscapes. In *Forest Landscapes and Global Change* (pp. 139–166). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0953-7_6

Comissão Europeia. (2024). *Setor de uso da terra*. European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/land-use-sector_en#studies

Correia, B. de O. M. N. (2021). *Perda de nutrientes por lixiviação após aplicação de chorume bovino tratado em colunas de diferentes tipos de solo* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia. Universidade de Lisboa]. https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/23843/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o_BC.pdf

Daibo, O. (2023, November 1). *As oliveiras podem ajudar a vencer as mudanças climáticas*. https://pt.oliveoiltimes.com/world/olive-trees-can-help-beat-climate-change/125328

De Graaff, J., Duarte, F., Fleskens, L., & de Figueiredo, T. (2010). The future of olive groves on sloping land and ex-ante assessment of cross compliance for erosion control. *Land Use Policy*, *27*(1), 33–41. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.02.006

DeAndreis, P. (2022, March 2). *Rendimentos recordes para Portugal na safra 2021/22*. Olive Oil Times. https://www.oliveoiltimes.com/production/record-yields-for-portugal/105753

Decreto-Lei n.º 4/2024, de 5 de Janeiro, Pub. L. No. Decreto-Lei n.º 4/2024, Diário da República n.º 4/2024, Série I de 2024-01-05 47 (2005).

Dores, L. de A. (2021). *Armazenamento de carbono e produtividade de lameiros no nordeste de Portugal* [Instituto Politécnico de Bragança]. https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/24558/1/Leticia_Dores.pdf

Feller, C., & Beare, M. H. (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, *79*(1–4), 69–116. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00039-6

Figueiredo, T. de. (2013). *Uma panorâmica sobre os recursos pedológicos do Nordeste Transmontano* (E. S. A. Instituto Politécnico de Bragança, Ed.). IPB. https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/8527/1/84%20Toma%cc%81s%20de%20Figueiredo%20completo.pdf

Figueiredo, T. de, Almeida, A., & Araújo, J. P. (2002). *Edaphic characteristics of olive-tree areas in the Trás-os-Montes Region (Portugal): a map-based approach*. ISHS. https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/6483/1/586_24.pdf

Follett, R. F. (2001). Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research*, *61*(1–2), 77–92. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00180-5

Fonseca, F., Queirós, A., Buch, A., Chichorro, F., Sousa, J. P., & Santos, S. (2012). *Variação espacial de propriedades físicas e químicas do solo em olivais de Trás-os-Montes*.

Fonseca, F., Silva, D., Bueno, P., Hernández, Z., Royer, A. C., & de Figueiredo, T. (2022). Temporal dynamics of carbon storage in a Mediterranean mountain scrubland managed by prescribed fire. *CATENA*, *212*, 106107. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106107

Gatto, A., Barros, N. F. de, Novais, R. F., Silva, I. R., Mendonça, E. de S., & Villani, E. M. de A. (2009). Comparaçao de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *33*(3), 735–740. https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300026

Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., & Johnson, C. A. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press.

Iglesias Jiménez, E., & Pérez García, V. (1992). Relationships between organic carbon and total organic matter in municipal solid wastes and city refuse composts. *Bioresource Technology*, *41*(3), 265–272. https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90012-M

INE. (2018). *Estatísticas Agrícolas 2018*. Instituto Nacional de Estatística. https://www.ine.pt

Infosolo. (2024). *Mapa da distribuição do carbono orgânico do solo (Mg ha-1) em Portugal Continental*. Infosolo. https://projects.iniav.pt/infosolo/

IPCC. (2024). *Carbon Balance of World Forested Ecosystems: Toward a Global Assessment*. The Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/search/?search=carbon

IPMA. (2023). *Monitorização do clima*. Instituto Português Do Mar e Da Atmosfera. https://www.ipma.pt/pt/index.html

Kiehl, E. J. (1979). *Manual de edafologia: relações solo-planta*. https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutodebotanica/1979/01/manual-de-edafologia-relacoes-solo-planta/

Knupp, A. M., & Ferreira, E. P. B. (2011). Eficiência da quantificação do carbono da biomassa microbiana por espectrofotometria comparada ao método titrimétrico. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, *6*(4), 588–595. https://doi.org/10.5039/agraria.v6i4a1071

Lal, R. (1997). Soil Processes and Greenhouse Effect. In *Methods for Assessment of Soil Degradation* (1st ed., Vol. 1, pp. 199–212). CRC Press.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, *123*(1–2), 1–22. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032

Lal, R. (2007). Carbon Management in Agricultural Soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *12*(2), 303–322. https://doi.org/10.1007/s11027-006-9036-7

Lal, R., Kimble, J. M., Follett, R. F., & Stewart, B. A. (1997). *Soil Processes and the Carbon Cycle* (R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett, & B. A. Stewart, Eds.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203739273

Lancho, J. F. G. (2007). *La captura de carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos*. Gráficas Cervantes, S. A.

Loss, A., Pereira Gervasio, M., Schultz, N., Dos Anjos Cunha, L. H., & Da Silva Ribeiro, E. M. (2009). Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. *Ciência Rural*, *39*(4), 1067–1072. https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000036

Maia, F. de B. (2010). *Contribuição para o estudo da fenologia de quatro variedades de oliveira (Olea europaea L.): Arbequina, Cobrançosa, Galega vulgar e Picual* [Dissertação de Mestre em Engenharia Agronómica, Universidade Técnica de Lisboa]. https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/15199/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20de%20Mestrado_Frederico%20Maia.pdf

Martins, C. R., Pereira, P. A. de P., Lopes, W. A., & Andrade, J. B. (2003). Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre : a importância na química da atmosfera. *Cadernos Temáticos de Química Nova Na Escola*, 28–41.

Michalopoulos, G., Kasapi, K. A., Koubouris, G., Psarras, G., Arampatzis, G., Hatzigiannakis, E., Kavvadias, V., Xiloyannis, C., Montanaro, G., Malliaraki, S., Angelaki, A., Manolaraki, C., Giakoumaki, G., Reppas, S., Kourgialas, N., & Kokkinos, G. (2020). Adaptation of Mediterranean Olive Groves to Climate Change through Sustainable Cultivation Practices. *Climate*, *8*(4), 54. https://doi.org/10.3390/cli8040054

Morgan, R. P. C., & Rickson, R. J. (2003). *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*. Taylor & Francis. https://doi.org/10.4324/9780203362136

Njana, M. A., Mbilinyi, B., & Eliakimu, Z. (2021). The role of forests in the mitigation of global climate change: Emprical evidence from Tanzania. *Environmental Challenges*, *4*, 100170. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100170

Olivonews. (2024). *Olivais e cobertura vegetal reduzem a perda de carbono em 76,4%*. Olivo News Itália. https://olivonews.it/pt/

Pádua, E. J. de, Guerra, A. R., & Zinn, Y. L. (2015). Modelagem da Densidade do Solo em Profundidade sob Vegetação Nativa em Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *39*(3), 725–736. https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140028

Patrício, M. B. (2019). *Mapeamento do carbono armazenado nos solos da bacia hidrográfica do rio Sabor, NE Portugal* [Mestrado]. Instituto Politécnico de Bragança.

Paulilo, M. T. S., Viana, A. M., & Randi, Á. M. (2015). *Fisiologia Vegetal*. Universidade Federal de Santa Catarina.

Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S. J., Joosten, H., Holmgren, P., Lehtonen, A., Menton, M. C., Pullin, A. S., & Wattenbach, M. (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, *1*(1), 6. https://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6

Pian, L., Serra, T., Zarrouk, O., Botelho, M., Ribeiro, H., & Pinto, C. (2023, February 17). *Pegada de carbono na viticultura: o potencial das práticas agrícolas no sequestro de carbono*. Agriterra. https://www.agriterra.pt/Artigos/466099-Pegada-carbono-na-viticultura-potencial-das-praticas-agricolas-no-sequestro-carbono.html

Pinto, M. A. C., Costa, M. M. da, Martins, G. G., Costa, L. F. P. da, & Ferreira, R. de O. (2008). Modelagem econômica para análise de perspectivas no mercado de créditos de carbono. *Revista Do BNDES*, *7*, 155–156. https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7382/3/RB%2029%20Modelagem%20Econ%c3%b4mica%20para%20An%c3%a1lise%20de%20Perspectivas%20no%20Mercado%20de%20cr%c3%a9ditos%20de%20carbono_P.pdf

Porta, J. C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (M. López-Acevedo Reguerin & C. Roquero de Laburu, Eds.; 3a. ed.) [Book]. Mundi-Prensa.

Pou, A. (2021). Effects of Organic Mulches on the Soil Temperature, Humidity and CO2 Emissions. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, *29*(3). https://doi.org/10.19080/IJESNR.2021.29.556265

Resk, D. V. S., Pereira, J., & Silva, J. E. da. (1991). *Dinamica da materia organica na regiao dos cerrados* (Vol. 1). Embrapa Cerrados (CPAC).

Rettmann, R. (2023). *O que é e como funciona o mercado de carbono?* IPAM Amazônia. https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/o-que-e-e-como-funciona-o-mercado-de-carbono/

Rodrigues, M. A., Bento, A., Lopes, J., Torres, L., & Pereira, J. A. (2001). Manutenção da superfície do solo em olival. *Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal*, 20–25.

Rodrigues, M. A., & Correia, C. M. (2009). *Manual da safra e contra safra do olival* (1st ed., Vol. 1). Instituto Politécnico de Bragança. http://hdl.handle.net/10198/4191

Rumpel, C., & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, *338*(1–2), 143–158. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5

Sanquetta, C. R., Dalla Corte, A. P., & Benedet Maas, G. C. (2011). The role of forests in climate change. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, *19*(1–2), 84–96.

Santos, L., & Ramos, A. (1987). *A cultura da oliveira. 12996/86* (Castelo Branco). Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Simoes, M. P., Belo, A. F., Pinto-Cruz, C., & Pinheiro, A. C. (2014). Natural vegetation management to conserve biodiversity and soil water in olive orchards. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *12*(3), 633–643. https://doi.org/10.5424/sjar/2014123-5255

Smith, J. L., Halvorson, J. J., & Bolton, H. (2002). Soil properties and microbial activity across a 500m elevation gradient in a semi-arid environment. *Soil Biology and Biochemistry*, *34*(11), 1749–1757. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00162-1

Souza, A., Paiva, D., Andrade, J., Silva Junior, A., & Goulart, R. (2012). O Mercado Internacional de Créditos de Carbono: Estudo Comparativo entre as Vertentes Regulada e Voluntária no Brasil no Período de 2004 a 2011. *Sistemas & Gestão*, *7*(4), 526–544. https://doi.org/10.7177/sg.2012.v7.n4.a2

Teramoto, J. R. S., Bertocini, E. I., & Pantano, A. P. (2010). *Histórico da introdução da cultura da oliveira no brasil*. Infobibos. http://www.infobibos.com/Artigos/2010_4/HistoricoOliveira/index.htm

Tito, M. R., León, M. C., & Porro, R. (2009). *Guia para Determinação de Carbono em Pequenas Propriedades Rurais* (1st ed.). ICRAF.

Vargas, D. B., Delazeri, L. M. M., & Ferrera, V. H. P. (2022). O avanço do mercado voluntário de carbono no Brasil: desafios estruturais, técnicos e científicos. *Observatório de Bioeconomia*. https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/mercado_de_carbono_2.pdf

Zaman, S., Rajonee, A. A., & Imamul Huq, S. M. (2017). Arsenic in Bangladesh Soils and Its Relationship with Water Soluble Soil Organic Carbon. *Open Journal of Soil Science*, *07*(04), 77–85. https://doi.org/10.4236/ojss.2017.74006

Zhang, Z., Ding, J., Zhu, C., Wang, J., Ge, X., Li, X., Han, L., Chen, X., & Wang, J. (2023). Historical and future variation of soil organic carbon in China. *Geoderma*, *436*, 116557. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116557