Desenvolvimento de um Algoritmo de Cálculo de Sequestro de Carbono em Produções Vitícolas

Ana Isabel Gandra Azevedo
Mestrado em Ciências e Tecnologia do Ambiente
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
2026

Desenvolvimento de um Algoritmo de Cálculo de Sequestro de Carbono em Produções Vitícolas

Ana Isabel Gandra Azevedo

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Ciências e Tecnologia do Ambiente

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território

2026

Orientador
Professor Luís Pinto da Silva, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Coorientador
Professor Joaquim Esteves da Silva, Professor Catedrático, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Supervisor externo na Entidade de Acolhimento
Doutor Alexander Cornejo, Comissão de Viticultura da Região dos Vinhos Verdes



Agradecimentos

O desenvolvimento da presente dissertação não teria sido possível sem o apoio das várias pessoas que me rodeiam, às quais gostaria de expressar o meu profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, aos meus orientadores, Professor Luís Pinto da Silva, Professor Joaquim Esteves da Silva e Dr. Alexander Cornejo. A sua disponibilidade, orientação, conhecimento partilhado e acompanhamento ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho foram fundamentais para a sua concretização e para o meu crescimento académico. Agradeço igualmente todas as sugestões e o espírito crítico que contribuíram para melhorar a qualidade desta dissertação.

Aos meus pais, agradeço todo o amor, apoio incondicional e os valores que me transmitiram ao longo da vida, que me permitiram chegar até aqui. Ao meu irmão e à minha irmã, por todos os risos, pelo companheirismo e por me inspirarem, ao longo de toda a minha vida, a manter a curiosidade e a vontade de aprender sobre o mundo.

À Joana, por ter estado ao meu lado durante todo este percurso. Obrigado por levantares os meus espíritos nos momentos de maior dúvida e hesitação e por me motivares quando a motivação faltava.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa académica.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

Resumo

As alterações climáticas representam um dos principais desafios do setor agrícola, tornando necessária a adoção de estratégias que permitam reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e aumentar a capacidade de sequestro de carbono dos sistemas produtivos. No setor vitivinícola, a quantificação do carbono sequestrado constitui uma ferramenta importante para apoiar práticas de gestão mais sustentáveis e avaliar o contributo das explorações para a mitigação das alterações climáticas.

A presente dissertação teve como objetivo desenvolver um algoritmo de cálculo do sequestro de carbono aplicável às explorações vinícolas da Região dos Vinhos Verdes. Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a pegada carbónica da produção de uvas, os mecanismos de sequestro de carbono em sistemas vitícolas e o enquadramento no mercado voluntário de carbono. Com base na literatura científica e em metodologias de contabilização de carbono já existentes, foram definidos fatores de sequestro para diferentes componentes da exploração, incluindo a vinha, os matos, as árvores, os restos de poda e diversas práticas de gestão do solo. O algoritmo foi usado no desenvolvimento de uma ferramenta em Microsoft Excel, permitindo aos produtores estimar o sequestro total de carbono da sua exploração e comparar esse valor com a pegada carbónica associada à produção de uvas.

A metodologia foi aplicada numa exploração vitícola como caso de estudo. Os resultados indicaram um sequestro total de 171.13 tCO_2/ano, correspondentes a 2.59 tCO_2/ha·ano. As culturas de cobertura do solo constituíram a principal fonte de sequestro (52%), seguidas pelos matos (33%) e pela vinha (15%). A comparação com a pegada carbónica da produção de uvas demonstrou que o potencial de sequestro estimado é suficiente para compensar aproximadamente 120% das emissões consideradas, resultando num saldo líquido positivo de carbono.

Os resultados obtidos evidenciam o potencial das explorações vitivinícolas para contribuir para a mitigação das alterações climáticas através da combinação de culturas permanentes, vegetação natural e práticas adequadas de gestão do solo. O algoritmo desenvolvido constitui uma ferramenta de apoio à decisão que poderá auxiliar produtores e entidades do setor na avaliação e valorização do sequestro de carbono.

Palavras-chave: Sequestro de carbono, viticultura, pegada carbónica, gestão do solo, vinha, sustentabilidade agrícola, alterações climáticas, mercado voluntário de carbono.

Abstract

Climate change represents one of the main challenges facing the agricultural sector, making it increasingly necessary to adopt strategies that reduce greenhouse gas emissions and enhance the carbon sequestration capacity of production systems. In the wine sector, the quantification of carbon sequestration is an important tool to support more sustainable management practices and to assess the contribution of vineyards to climate change mitigation.

The aim of this dissertation was to develop a carbon sequestration calculation algorithm applicable to vineyards in the Vinho Verde Region. To achieve this, a literature review was conducted on the carbon footprint of grape production, carbon sequestration mechanisms in viticultural systems, and the voluntary carbon market framework. Based on scientific literature and existing carbon accounting methodologies, sequestration factors were defined for different vineyard components, including grapevines, shrubland, trees, pruning residues, and soil management practices. The algorithm was used to develop a tool in Microsoft Excel that allows winegrowers to estimate the total carbon sequestration of their vineyards and compare that figure with the carbon footprint associated with grape production.

The methodology was applied to a vineyard as a case study. The results indicated a total carbon sequestration of 171.13 tCO_2/year, corresponding to 2.59 tCO_2/ha·year. Soil cover crops were the main source of sequestration (52%), followed by shrubland (33%) and grapevines (15%). Comparison with the carbon footprint of grape production showed that the estimated sequestration potential was sufficient to offset approximately 120% of the emissions considered, resulting in a positive net carbon balance.

The results highlight the potential of vineyards to contribute to climate change mitigation through the combination of perennial crops, natural vegetation, and appropriate soil management practices. The developed algorithm constitutes a decision-support tool that may assist wine growers and sector stakeholders in assessing and valuing carbon sequestration.

Keywords: Carbon sequestration, viticulture, carbon footprint, soil management, vineyard, agricultural sustainability, climate change, voluntary carbon market.

Índice

Lista de Tabelas vi
Lista de Gráficos vii
Lista de Figuras viii
Lista de Abreviaturas ix
1. Introdução 1
1.1. Viticultura e vinificação e o seu papel económico 1
1.2. Região Demarcada dos Vinhos Verdes 3
1.3. A pegada carbónica 5
1.4. A pegada carbónica da produção de uvas 7
1.5. Sequestro de Carbono 12
1.6. Objetivos 14
2. Metodologia do algoritmo de cálculo do sequestro de carbono 16
2.1. Sequestro associado às culturas permanentes e vegetação natural 16
2.2. Sequestro associado às árvores 17
2.3. Sequestro associado à incorporação de restos de poda 20
2.4. Sequestro associado à gestão do solo 21
2.5. Cálculo do sequestro final da exploração 22
3. Utilização do algoritmo como ferramenta de cálculo em Excel 24
3.1. Folha “Introdução” 24
3.2. Folha “Culturas” 25
3.3. Folha “Árvores” 27
3.4. Folha “Poda” 29
3.5. Folha “Gestão do solo” 30
3.6. Folha “Sequestro Final” 31
4. Avaliação do caso de estudo e discussão dos resultados 33
5. Conclusão 38
Referências Bibliográficas 40

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Pegada carbónica da produção de uvas…….....11

Tabela 2 - Fatores de sequestro anual por espécie de árvore por ano……..…..….18

Tabela 3 - Fatores de sequestro por prática de gestão do solo……..……..21

Tabela 4 - Contributo percentual das diferentes componentes para o sequestro total de carbono da exploração……...……..33

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Distribuição percentual do sequestro de carbono pelas diferentes componentes da exploração……..……34

Lista de Figuras

Figura 1 - Folha "Introdução" da Ferramenta 24
Figura 2 - Folha "Culturas" da Ferramenta..... 26
Figura 3 - Folha "Árvores" da Ferramenta..... 27
Figura 4 – Seleção das espécies de árvores na folha “árvores”..... 28
Figura 5 – Parte da folha “Árvores” que calcula o sequestro médio das árvores na exploração. 29
Figura 6 - Folha de cálculo da incorporação dos restos de poda no solo 29
Figura 7 - Folha "Gestão do Solo"..... 30
Figura 8 - Folha "Sequestro Final".. 31

Lista de Abreviaturas

ACV	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
ADENE	AGÊNCIA PARA A ENERGIA
APA	AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE
CO_2	DIÓXIDO DE CARBONO
CO_2EQ	DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE
CVRVV	COMISSÃO DE VITICULTURA DA REGIÃO DOS VINHOS VERDES
GEE	GASES COM EFEITO DE ESTUFA
GHG	GREEN HOUSE GASES
IPCC	INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE
ISO	INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION
IVV	INSTITUTO DA VINHA E DO VINHO
KG CO_2EQ	QUILOGRAMA DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE
MITECO	MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
MVC	MERCADO VOLUNTÁRIO DE CARBONO
N_2O	ÓXIDO NITROSO
OIV	ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DA VINHA E DO VINHO
PCR	PRODUCT CATEGORY RULES
RDVV	REGIÃO DEMARCADA DOS VINHOS VERDES
RVV	REGIÃO DOS VINHOS VERDES
SOC	SOIL ORGANIC CARBON (CARBONO ORGÂNICO DO SOLO)
tCO_2	TONELADA DE DIÓXIDO DE CARBONO
tCO_2EQ	TONELADA DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE

1. Introdução

1.1. Viticultura e vinificação e o seu papel económico

A viticultura corresponde ao ramo da agricultura dedicado ao cultivo da videira, sobretudo para a produção de uvas destinadas à vinificação, constituindo a base primária de toda a fileira vitivinícola (Santini et al., 2013). Esta atividade envolve um conjunto de práticas agrícolas específicas que determinam o rendimento da vinha e a qualidade das uvas, sendo estas últimas o principal fator que condiciona as características do vinho produzido (Bartocci & Fantozzi, 2016). Assim, a viticultura assume um papel central no setor do vinho, uma vez que a composição química das uvas — incluindo açúcares, acidez e compostos fenólicos — influencia diretamente o perfil sensorial e a qualidade final do produto (Litskas et al., 2020).

À escala global, a viticultura apresenta uma dimensão territorial muito significativa, com uma área total de vinha que ronda os 7.2 a 7.3 milhões de hectares, distribuída por cerca de 90 países produtores, o que evidencia a ampla expressão geográfica desta cultura e a sua relevância no uso agrícola do solo (OIV, 2023). A produção mundial de uvas ultrapassa 75 milhões de toneladas anuais, sendo aproximadamente metade destinada à produção de vinho, enquanto o restante destina-se ao consumo em fresco e à produção de uvas secas (OIV, 2023). A produção mundial de vinho situa-se, em geral, entre 240 e 260 milhões de hectolitros por ano, refletindo a dimensão industrial do setor e a sua importância no sistema agroalimentar global (OIV, 2023).

A viticultura desempenha, então, um papel económico de elevada relevância no comércio agrícola internacional, sendo o vinho um dos produtos com maior valor acrescentado e maior grau de internacionalização (Santini et al., 2013). De 40% a 45% da produção mundial de vinho é transacionada no mercado internacional, evidenciando uma forte orientação exportadora do setor (OIV, 2023). O valor das exportações globais de vinho atinge várias dezenas de milhares de milhões de euros por ano, o que demonstra o peso económico da viticultura não apenas na produção primária, mas também em toda a cadeia de valor associada (OIV, 2023). Para além disso, o setor vitivinícola contribui significativamente para o produto interno bruto agrícola de vários países, assumindo-se como uma atividade estratégica em economias com forte tradição vinícola (Santini et al., 2013).

No contexto europeu, a viticultura assume uma posição dominante à escala mundial, sendo responsável por mais de 60% da produção global de vinho e concentrando uma

parcela substancial da área de vinha (OIV, 2023). Países como Espanha, França e Itália lideram a produção mundial, tanto em volume como em valor económico, beneficiando de sistemas produtivos altamente especializados e de uma forte valorização comercial associada a denominações de origem (Santini et al., 2013). Esta especialização contribui para que o setor vitivinícola europeu tenha um peso significativo nas exportações agroalimentares, sendo o vinho um dos principais produtos exportados pela União Europeia em termos de valor (OIV, 2023).

Em Portugal, a viticultura constitui uma atividade agrícola estruturante, com forte expressão territorial e económica (IVV, 2022). A área de vinha no país representa uma fração relevante da superfície agrícola utilizada e está distribuída por diversas regiões vitivinícolas com características distintas (IVV, 2022). A produção nacional de vinho situa-se, em média, entre 6 e 7 milhões de hectolitros por ano, posicionando Portugal como um produtor de dimensão média à escala mundial, mas com elevada relevância em termos de qualidade e diversidade (OIV, 2023). O setor vitivinícola português apresenta também uma forte vocação exportadora, sendo que uma parte significativa da produção é destinada aos mercados internacionais, contribuindo de forma relevante para a balança comercial do país (IVV, 2022).

A nível regional, a viticultura assume um papel essencial na dinamização das economias locais, particularmente em regiões demarcadas onde a produção de vinho é uma das principais atividades económicas (IVV, 2022). A Região dos Vinhos Verdes (RVV), por exemplo, destaca-se pela elevada densidade de explorações vitícolas e pela importância da produção de vinho na estrutura económica regional, contribuindo para o emprego e para a fixação da população em zonas rurais (IVV, 2022). A diversidade de castas autóctones e a especificidade dos sistemas produtivos reforçam a competitividade dos vinhos portugueses no mercado internacional (IVV, 2022).

O papel da viticultura na produção de vinho é determinante, uma vez que a quantidade e qualidade das uvas produzidas condicionam diretamente o volume de vinho disponível e as suas características finais (Bartocci & Fantozzi, 2016). A variabilidade anual da produção vitícola, influenciada por fatores climáticos, reflete-se diretamente nas oscilações da produção mundial de vinho, evidenciando a dependência da indústria vinícola da atividade agrícola (OIV, 2023). Além disso, a seleção de castas, as práticas culturais e as condições de produção na vinha são fatores fundamentais que determinam a tipicidade e a diferenciação dos vinhos, influenciando o seu posicionamento no mercado e o seu valor económico (Santini et al., 2013).

A viticultura constitui, assim, o primeiro elo de uma cadeia de valor altamente integrada e economicamente relevante, sustentando não só a produção de vinho, mas também toda a dinâmica económica associada ao setor vitivinícola, em escala global e nacional (OIV, 2023; Santini et al., 2013).

1.2. Região Demarcada dos Vinhos Verdes

A RVV, oficialmente designada como Região Demarcada dos Vinhos Verdes (RDVV), constitui uma das mais extensas e relevantes regiões vitivinícolas de Portugal, localizada no noroeste do país, abrangendo grande parte do território entre os rios Minho e Douro (IVV, 2022). Esta região caracteriza-se por condições edafoclimáticas particulares, nomeadamente por um clima de forte influência atlântica, com elevada precipitação anual, temperaturas amenas e reduzida amplitude térmica, fatores que condicionam o ciclo vegetativo da videira e contribuem para a produção de vinhos com elevada acidez natural e perfil fresco e aromático (IVV, 2022). A criação oficial da região demarcada remonta a 1908, o que reflete a importância histórica e económica da produção de vinho neste território (IVV, 2022).

Em termos de dimensão e escala produtiva, a RVV destaca-se como uma das maiores regiões demarcadas da Europa, abrangendo uma área total significativa e integrando dezenas de milhares de viticultores (IVV, 2022). A estrutura fundiária caracteriza-se por forte fragmentação, com predominância de pequenas explorações agrícolas, muitas vezes de caráter familiar, o que confere à região elevada densidade de produtores e forte ligação ao tecido rural (IVV, 2022). A área de vinha instalada representa uma parcela relevante da superfície agrícola regional, contribuindo de forma expressiva para a produção nacional de vinho (IVV, 2022). A produção anual de vinho verde situa-se em vários milhões de hectolitros, o que representa uma fração significativa do volume total produzido em Portugal (IVV, 2022).

A diversidade produtiva constitui um dos principais traços distintivos da região, sendo cultivadas diversas castas autóctones adaptadas às condições locais, como Alvarinho, Loureiro, Arinto, Avesso e Trajadura (IVV, 2022). Esta diversidade permite a produção de diferentes estilos de vinho, desde brancos leves e aromáticos até vinhos com maior estrutura, bem como rosés e tintos, o que contribui para a versatilidade e competitividade da região nos mercados (IVV, 2022). A especificidade das castas e das condições de produção confere aos vinhos verdes características únicas, reforçando a sua identidade e o seu reconhecimento internacional (IVV, 2022).

A relevância económica da RVV é particularmente expressiva no contexto nacional, sendo uma das regiões com maior volume de produção e uma das principais responsáveis pelas exportações de vinho português (IVV, 2022). Uma parte significativa da produção é destinada a mercados internacionais, com presença consolidada em países europeus e extraeuropeus, o que evidencia a forte vocação exportadora da região (IVV, 2022). O valor económico gerado pela fileira vitivinícola regional inclui não apenas a produção primária, mas também atividades associadas à transformação, à comercialização e à promoção, contribuindo de forma significativa para o rendimento regional e nacional (IVV, 2022). O setor desempenha ainda um papel relevante na criação de emprego, tanto direta quanto indiretamente, ao longo de toda a cadeia de valor (IVV, 2022).

A importância da RVV estende-se também ao desenvolvimento regional, uma vez que a viticultura constitui uma das principais atividades económicas em muitas zonas rurais do noroeste de Portugal (IVV, 2022). A presença generalizada de pequenas explorações vitícolas contribui para a manutenção da atividade agrícola, a fixação da população e a preservação da paisagem tradicional (IVV, 2022). Paralelamente, a notoriedade dos Vinhos Verdes tem impulsionado atividades complementares, como o enoturismo, reforçando a atratividade da região e a diversificação das fontes de rendimento (IVV, 2022).

A gestão, regulamentação e certificação da produção na RVV são asseguradas pela Comissão de Viticultura da Região dos Vinhos Verdes (CVRVV), entidade responsável pela denominação de origem “Vinho Verde” e pela indicação geográfica associada (IVV, 2022). Esta instituição desempenha um papel central na organização da fileira vitivinícola regional, estabelecendo normas técnicas que regulam a produção, a transformação e a comercialização dos vinhos (IVV, 2022). A CVRVV é responsável pela certificação dos produtos, garantindo que os vinhos cumprem os requisitos legais e os padrões de qualidade definidos, o que é essencial para assegurar a confiança dos consumidores e a valorização dos produtos no mercado (IVV, 2022).

Para além das funções de controlo e certificação, a CVRVV tem um papel ativo na promoção dos Vinhos Verdes a nível nacional e internacional, desenvolvendo estratégias de marketing e participando em mercados externos que visam aumentar a visibilidade e a competitividade dos vinhos da região (IVV, 2022). A instituição assegura ainda a recolha e a análise de dados estatísticos sobre a produção, a área de vinha e os agentes económicos, contribuindo para a monitorização e o planeamento do setor (IVV, 2022). Este conjunto de funções permite garantir uma gestão integrada da região

vitivinícola, promovendo simultaneamente a qualidade, a autenticidade e a valorização económica dos vinhos produzidos (IVV, 2022).

A articulação entre a dimensão produtiva da região e o enquadramento institucional proporcionado pela CVRVV constitui um elemento fundamental para a competitividade da RVV, assegurando a sua posição de destaque no panorama vitivinícola nacional e internacional (IVV, 2022).

1.3. A pegada carbónica

A pegada carbónica corresponde à quantificação total das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) associadas, direta e indiretamente, a um produto, serviço, organização ou atividade, sendo normalmente expressa em dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) (ISO, 2018; Amorim Cork, 2022). Este indicador traduz o contributo de uma determinada atividade para as alterações climáticas, agregando diferentes gases com efeito de estufa num único valor comparável através do seu potencial de aquecimento global (ISO, 2018). No contexto de produtos agroalimentares, como o vinho, a pegada carbónica constitui um indicador-chave para avaliar o impacto ambiental ao longo de toda a cadeia de produção (Rugani et al., 2013).

O cálculo da pegada carbónica baseia-se, de forma geral, na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**,** que permite contabilizar as emissões associadas a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até ao fim de vida (ISO, 2018). Esta abordagem "*cradle-to-grave*" inclui fases como a produção agrícola, a transformação, a embalagem, o transporte, a distribuição, a utilização e a eliminação final (ISO, 2018). No setor vitivinícola, esta metodologia permite identificar as principais fontes de emissão ao longo da cadeia produtiva, desde a viticultura até ao consumo do vinho (Helfer & Kissinger, 2023).

A quantificação segue princípios normalizados, sendo a norma ISO 14067 uma das principais referências internacionais, ao estabelecer requisitos e diretrizes para a medição e comunicação da pegada carbónica de produtos (ISO, 2018). Esta norma exige a definição clara dos limites do sistema, da unidade funcional e das fontes de emissão, bem como o uso de fatores de emissão baseados nas orientações do IPCC para converter diferentes gases em CO_2 equivalente (ISO, 2018). Adicionalmente, a metodologia distingue entre emissões diretas (por exemplo, consumo de combustíveis)

e indiretas (como a eletricidade ou a produção de insumos), permitindo uma análise detalhada das origens do impacto (Amorim Cork, 2022).

No setor do vinho, a aplicação de metodologias de ACV e de pegada carbónica tem sido amplamente estudada, sendo utilizadas diretrizes específicas que adaptam os princípios gerais a este contexto produtivo (Rugani et al., 2013). Estas abordagens permitem identificar etapas críticas, como a produção de uvas, o uso de energia na adega e o transporte, contribuindo para a melhoria da eficiência e redução das emissões (Bartocci & Fantozzi, 2016). A utilização de normas como a ISO 14067, bem como de quadros de referência complementares, como o "*GHG Protocol"* ou regras específicas de categoria de produto (PCR – "*Product Category Rules"*), tem permitido aumentar a comparabilidade e a credibilidade dos estudos no setor vitivinícola (Rugani et al., 2013; ISO, 2018).

A relevância da pegada carbónica tem aumentado significativamente no contexto atual de combate às alterações climáticas, estando alinhada com os objetivos internacionais definidos no âmbito do Acordo de Paris e com as metas europeias de neutralidade carbónica até 2050 (European Commission, 2021; IPCC, 2021). A União Europeia tem vindo a promover a quantificação das emissões ao nível dos produtos como forma de apoiar a transição para uma economia de baixo carbono, incentivando a transparência e a redução de impactos ao longo das cadeias de valor (European Commission, 2021). Neste contexto, iniciativas como o "*Digital Product Passport*" visam integrar informação ambiental detalhada, incluindo a pegada carbónica, facilitando o acesso dos consumidores a dados sobre o desempenho ambiental dos produtos (European Commission, 2021).

A nível empresarial, a pegada carbónica tornou-se uma ferramenta fundamental para relatórios de sustentabilidade e divulgação de informação não financeira, sendo frequentemente integrada em estratégias de responsabilidade corporativa (ISO, 2018). Empresas do setor vitivinícola utilizam este indicador para identificar oportunidades de redução de emissões, melhorar a eficiência dos processos e demonstrar compromisso com práticas sustentáveis (Rugani et al., 2013). Esta tendência é reforçada pela crescente exigência de investidores e partes interessadas relativamente à transparência climática e ao desempenho ambiental das organizações (ISO, 2018).

Paralelamente, a procura por produtos com menor impacte ambiental tem aumentado, refletindo uma maior sensibilização dos consumidores para as questões climáticas

(Santini et al., 2013). A disponibilização de informação sobre a pegada carbónica pode influenciar decisões de compra, atuando como um elemento diferenciador no mercado e incentivando práticas produtivas mais sustentáveis (Rugani et al., 2013). No setor do vinho, esta tendência tem contribuído para a valorização de produtos associados a práticas ambientalmente responsáveis.

A pegada carbónica desempenha também um papel central no desenvolvimento de mercados de carbono e de sistemas de compensação de emissões, nos quais as emissões quantificadas podem ser reduzidas ou compensadas por meio de créditos de carbono (APA, 2023). Estes mecanismos permitem atribuir valor económico à redução ou remoção de emissões, incentivando a adoção de práticas mais eficientes e sustentáveis (APA, 2023). Em Portugal, o desenvolvimento do mercado voluntário de carbono tem vindo a reforçar a importância da quantificação rigorosa das emissões, incluindo no setor agrícola e vitivinícola (APA, 2023).

Desta forma, a pegada carbónica constitui atualmente uma ferramenta essencial para a quantificação, gestão e comunicação das emissões de gases com efeito de estufa, assumindo um papel central tanto ao nível das políticas climáticas como das estratégias empresariais e das dinâmicas de mercado associadas à sustentabilidade.

1.4. A pegada carbónica da produção de uvas

A pegada carbónica da produção de uvas tem sido amplamente estudada por meio de abordagens de ACV, o que permite quantificar as emissões associadas à fase agrícola da fileira vitivinícola e identificar os principais fatores de impacto (Rugani et al., 2013). A literatura científica apresenta uma diversidade de estudos aplicados a diferentes contextos geográficos e sistemas de produção, evidenciando variações significativas nos resultados em função das práticas agrícolas, das condições climáticas e dos limites do sistema considerados (Helfer & Kissinger, 2023).

Um dos estudos mais relevantes na análise da pegada carbónica da produção vitícola foi desenvolvido por Rugani et al. (2013) na região sul da Sardenha, Itália, com foco em vinhas destinadas à produção de vinho. O estudo utilizou uma metodologia de ACV com fronteira "*cradle-to-farm gate*", abrangendo todas as etapas, desde a produção dos fatores de produção agrícolas até à entrega das uvas na adega (Rugani et al., 2013). Foram incluídos no sistema a produção e transporte de fertilizantes e pesticidas,

consumo de combustível, utilização de maquinaria agrícola, irrigação, emissões diretas do solo e transporte das uvas. A unidade funcional utilizada foi o quilograma de uva produzida, permitindo uma comparação direta com outros sistemas agrícolas. O estudo reportou uma pegada carbónica aproximada de 0.39 kg CO_2eq/kg de uva, correspondente a cerca de 3.9 tCO_2/ha·ano para produtividades típicas da região (Rugani et al., 2013).

Os autores identificaram a fertilização azotada como principal hotspot de emissões, sobretudo devido às emissões diretas e indiretas de N_2O associadas à aplicação de fertilizantes minerais (Rugani et al., 2013). O consumo de gasóleo nas operações mecanizadas representou o segundo maior contributo para a pegada carbónica. O estudo destacou ainda a influência da irrigação, embora menos significativa do que em regiões semiáridas. Rugani et al. (2013) abordaram também o potencial de sequestro de carbono associado às vinhas, nomeadamente o carbono armazenado na biomassa lenhosa e no solo, mas concluíram que ainda existiam limitações metodológicas à integração desse sequestro no balanço final de carbono. Este trabalho tornou-se uma referência importante na literatura europeia ao demonstrar a necessidade de considerar simultaneamente emissões e sequestro em sistemas vitícolas.

Bartocci e Fantozzi (2016) desenvolveram um estudo semelhante em sistemas vitivinícolas italianos destinados à produção de vinho, recorrendo igualmente à metodologia de ACV "*cradle-to-farm gate*". O estudo considerou as emissões associadas à produção e aplicação de fertilizantes e pesticidas, ao consumo de combustível e de eletricidade, às operações mecanizadas e às emissões diretas do solo (Bartocci & Fantozzi, 2016). Os autores reportaram pegadas carbónicas entre 0.31 e 0.47 kg CO_2eq/kg de uva, equivalentes a aproximadamente 3.1–4.7 tCO_2/ha·ano, dependendo do sistema de gestão agrícola e da produtividade da vinha (Bartocci & Fantozzi, 2016). Os autores verificaram que sistemas com maior produtividade tendem a apresentar menores emissões por unidade de produto, devido à diluição dos impactos fixos associados às operações agrícolas.

Tal como observado por Rugani et al. (2013), os fertilizantes azotados e o consumo de combustível foram os principais contributos para a pegada carbónica (Bartocci & Fantozzi, 2016). O estudo demonstrou ainda que a intensidade das operações mecanizadas influenciava significativamente os resultados finais, particularmente em sistemas com elevada frequência de tratamentos fitossanitários. Os autores não integraram explicitamente o sequestro de carbono no balanço final, mas referiram a

necessidade futura de incorporar práticas de gestão do solo e acumulação de carbono orgânico nas avaliações ambientais da viticultura (Bartocci & Fantozzi, 2016). Este trabalho reforçou a ideia de que a pegada carbónica da produção vitícola depende fortemente das práticas agrícolas adotadas e da intensidade produtiva do sistema.

Litskas et al. (2020) analisaram diferentes sistemas vitícolas em Chipre, incluindo vinhas destinadas tanto à produção de vinho quanto à de uvas de mesa. O estudo utilizou a metodologia Environmental Footprint da União Europeia, baseada em ACV, considerando uma fronteira "*cradle-to-winery gate*", ou seja, desde a produção dos consumos agrícolas até ao transporte das uvas para a adega (Litskas et al., 2020). Foram consideradas emissões associadas à fertilização, irrigação, pesticidas, consumo de energia, transporte e operações agrícolas mecanizadas. Os resultados revelaram uma grande variabilidade entre variedades e sistemas produtivos, com pegadas carbónicas entre 0.28 e 0.85 kg CO_2eq/kg de uva (Litskas et al., 2020).

Os autores concluíram que os sistemas mais intensivos em irrigação apresentavam valores de emissões significativamente superiores devido ao elevado consumo energético associado à bombagem de água (Litskas et al., 2020). As emissões associadas aos fertilizantes e pesticidas também foram relevantes, embora a irrigação tenha desempenhado um papel particularmente importante devido às condições semiáridas do clima cipriota. Comparativamente aos estudos italianos, os valores máximos observados por Litskas et al. (2020) foram bastante superiores, o que demonstra que o contexto climático pode influenciar significativamente a pegada carbónica da produção vitícola. O estudo não integrou explicitamente o sequestro de carbono no solo, mas destacou a importância de práticas sustentáveis de gestão agrícola para reduzir as emissões associadas à produção.

Steenwerth et al. (2015) realizaram uma revisão abrangente sobre práticas de gestão climática inteligente ("*climate-smart management*") em vinhas, compilando estudos realizados em diferentes regiões vitícolas da Europa e América do Norte. Embora o foco principal do trabalho tenha sido a mitigação climática e o sequestro de carbono, os autores relataram valores de pegada carbónica agrícola entre 0.087 e 0.584 kg CO_2eq/kg de uva, dependendo do sistema produtivo e das práticas agrícolas consideradas (Steenwerth et al., 2015). Os estudos analisados tipicamente incluíam fertilização, consumo de combustível, mecanização, irrigação e emissões do solo em sistemas "*cradle-to-farm gate*".

Ao contrário de muitos trabalhos anteriores, Steenwerth et al. (2015) atribuíram particular relevância ao potencial de sequestro de carbono associado à gestão do solo. Os autores demonstraram que práticas como o enrelvamento permanente das entrelinhas, a aplicação de composto, a redução da mobilização e a incorporação de restos de poda podem aumentar significativamente os stocks de carbono orgânico do solo. O estudo argumentou que determinadas práticas sustentáveis poderiam compensar parcialmente as emissões associadas à produção agrícola, reduzindo o balanço líquido de carbono das vinhas. Esta abordagem foi particularmente relevante porque marcou uma transição na literatura científica, passando de avaliações focadas exclusivamente em emissões para análises integradas de emissões e de sequestro.

Helfer e Kissinger (2023) avaliaram a pegada carbónica da produção de uvas em diferentes zonas climáticas mediterrânicas, incluindo regiões semiáridas e áridas utilizadas para produção de vinho. O estudo utilizou uma metodologia de ACV "*cradle-to-farm gate*", considerando fertilização, consumo de combustível, irrigação, eletricidade, emissões diretas do solo e utilização de maquinaria agrícola (Helfer & Kissinger, 2023). Os autores reportaram uma pegada média de aproximadamente 0.342 kg CO_2eq/kg de uva, equivalente a cerca de 3.42 tCO_2/ha·ano em condições típicas de produtividade (Helfer & Kissinger, 2023).

Os autores verificaram que a irrigação representava um dos principais hotspots de emissões nos sistemas estudados, sobretudo devido ao consumo de eletricidade necessário à bombagem de água (Helfer & Kissinger, 2023). A fertilização azotada continuou a ser uma das principais fontes de emissões, corroborando os resultados de estudos europeus anteriores. Comparativamente aos estudos realizados em regiões húmidas ou mediterrânicas menos áridas, Helfer e Kissinger (2023) demonstraram que o aumento da necessidade de irrigação poderá intensificar significativamente a pegada carbónica da viticultura no contexto das alterações climáticas. O estudo abordou ainda a importância potencial da gestão sustentável do solo como mecanismo de mitigação futura.

Bača et al. (2024) estudaram sistemas vitivinícolas na Europa Central, avaliando vinhas destinadas à produção de vinho em sistemas convencionais, integrados e biológicos. O estudo utilizou uma metodologia de ACV "*cradle-to-farm gate*", incluindo a produção e aplicação de fertilizantes, pesticidas e combustíveis, operações mecanizadas e emissões diretas do solo (Bača et al., 2024). Os autores reportaram valores de aproximadamente 0.155 kg CO_2eq/kg de uva para sistemas integrados, 0.162 kg

CO_2eq/kg para sistemas convencionais e até 0.246 kg CO_2eq/kg para sistemas biológicos (Bača et al., 2024). Estes valores correspondem a 1.5–2.5 tCO_2/ha·ano para produtividades típicas da região.

Os resultados mostraram que os sistemas biológicos apresentavam, em alguns casos, maiores emissões por unidade de produto devido à menor produtividade e ao maior número de operações mecanizadas necessárias para controlo mecânico de infestantes (Bača et al., 2024). Este resultado destacou um aspeto importante frequentemente referido na literatura: práticas consideradas ambientalmente sustentáveis nem sempre conduzem automaticamente a uma pegada carbónica menor quando a unidade funcional utilizada é o quilograma de produto. O estudo também destacou a importância da produtividade agrícola na intensidade carbónica final, corroborando os resultados anteriormente observados por Bartocci e Fantozzi (2016).

De forma geral, os estudos analisados demonstram que a pegada carbónica da produção de uvas apresenta elevada variabilidade, situando-se geralmente entre 0.15 e 0.50 kg CO_2eq/kg de uva em sistemas europeus, equivalendo aproximadamente a 1.5–4.5 tCO_2/ha·ano (Bartocci & Fantozzi, 2016; Bača et al., 2024). Os valores agregados de todos os estudos encontram-se na Tabela 1 para melhor interpretação.

Tabela 1 - Pegada carbónica da produção de uvas (t CO_2eq/ha·ano) por estudo, ano e geografia. *Conversão aproximada realizada a partir dos valores originais expressos em kg CO_2eq/kg de uva, assumindo produtividades típicas reportadas pelos próprios autores ou utilizadas na discussão dos resultados.

Estudo	Ano	Geografia	Pegada carbónica da produção de uvas (t CO_2eq/ha·ano)
Rugani et al.	2013	Sardenha, Itália	~3.9
Bartocci & Fantozzi	2016	Itália	3.1 – 4.7
Litskas et al.	2020	Chipre	~2.8 – 8.5*
Steenwerth et al.	2015	Europa e América do Norte (revisão)	~0.9 – 5.8*
Helfer & Kissinger	2023	Regiões mediterrânicas semiáridas e áridas	~3.4
Bača et al.	2024	Europa Central	~1.5 – 2.5

As principais fontes de emissões são consistentemente associadas à fertilização azotada, emissões diretas de N_2O do solo, consumo de combustível e irrigação (Nemecek et al., 2011; IPCC, 2021). Paralelamente, os trabalhos mais recentes demonstram que práticas sustentáveis de gestão do solo, como enrelvamento, aplicação de composto e incorporação de biomassa, podem promover sequestro adicional de carbono, contribuindo para compensar parcialmente as emissões associadas à produção vitícola (Steenwerth et al., 2015). A integração destas práticas em metodologias regionais de contabilização de carbono assume, assim, particular relevância no contexto da descarbonização do setor vitivinícola e do desenvolvimento do mercado voluntário de carbono.

1.5. Sequestro de Carbono

O sequestro de carbono corresponde ao processo pelo qual o CO_2 atmosférico é capturado e armazenado em diferentes reservatórios biológicos e físicos, sendo o solo agrícola um dos principais sumidouros de carbono nos sistemas terrestres (Lal, 2004). Este processo ocorre essencialmente por meio da fotossíntese, com a incorporação de carbono na biomassa vegetal e a subsequente transferência para o solo sob a forma de matéria orgânica, contribuindo para o aumento do carbono orgânico do solo (FAO, 2017). No contexto das orientações metodológicas internacionais, como as do IPCC, o sequestro é normalmente quantificado como a variação dos stocks de carbono ao longo do tempo, sendo considerado um fluxo negativo de emissões quando ocorre uma acumulação líquida (IPCC, 2019).

Na viticultura, o sequestro de carbono pode ocorrer em múltiplos compartimentos do sistema produtivo, sendo o solo da vinha o principal reservatório. A acumulação de carbono no solo resulta da incorporação de resíduos orgânicos, incluindo folhas caídas, raízes mortas, restos de poda triturados e matéria proveniente de cobertos vegetais (Steenwerth & Belina, 2008). A presença de coberto vegetal (mato ou enrelvamento entre linhas) é particularmente relevante, uma vez que aumenta a entrada de biomassa no sistema e promove a estabilização do carbono no solo, podendo contribuir de forma significativa para o aumento do carbono orgânico (Aguilera et al., 2013). Estes cobertos podem ser espontâneos ou semeados, incluindo gramíneas e leguminosas, sendo que estas últimas podem ainda influenciar indiretamente o ciclo do carbono através da fixação de azoto.

Para além do solo, a biomassa da videira constitui outro importante compartimento de armazenamento de carbono. Sendo uma cultura perene, a videira acumula carbono ao

longo de vários anos na madeira permanente (tronco, braços e raízes), representando um stock relativamente estável (Lal, 2004). Embora este armazenamento não seja altamente dinâmico ano a ano, contribui para o balanço global de carbono do sistema vitícola. Adicionalmente, a presença de árvores associadas à vinha, como sistemas agroflorestais ou sebes arbóreas nas bordaduras das parcelas, pode aumentar significativamente o potencial de sequestro, ao introduzir biomassa lenhosa adicional e promover a acumulação de carbono tanto acima como abaixo do solo (Aguilera et al., 2013).

Outros elementos frequentemente presentes nas vinhas, como sebes, linhas de vegetação natural, matos e zonas não cultivadas, funcionam igualmente como reservatórios de carbono, contribuindo para o armazenamento em biomassa aérea e no solo (FAO, 2017). Estes elementos paisagísticos podem ter um papel relevante à escala da exploração agrícola, embora nem sempre sejam considerados nos cálculos de pegada carbónica. A interação entre estes diferentes compartimentos — solo, videira, coberto vegetal e vegetação adjacente — determina o potencial global de sequestro do sistema vitícola.

Apesar desta diversidade de fontes de sequestro, a sua integração em ferramentas de cálculo da pegada carbónica permanece limitada. Muitas metodologias baseadas em ACV, incluindo aplicações da norma ISO 14067, focam-se predominantemente nas emissões associadas a inputs (fertilizantes, combustíveis, energia) e operações agrícolas, não incluindo explicitamente o sequestro de carbono ou tratando-o de forma simplificada (ISO, 2018; Rugani et al., 2013). Esta abordagem deve-se, em parte, à complexidade associada à medição e à modelação das variações de carbono no solo, que dependem de fatores como o tipo de solo, o clima, as práticas de gestão e o horizonte temporal considerado (IPCC, 2019).

No setor vitivinícola, existem algumas diretrizes e ferramentas específicas para cálculo da pegada carbónica, como o "*GHG Protocol"*, normas ISO e regras de categoria de produto (PCR) aplicadas ao vinho, que permitem estruturar a contabilização das emissões ao longo do ciclo de vida (Rugani et al., 2013). Contudo, a maioria destas abordagens centra-se nas emissões e não integra de forma sistemática o sequestro. Algumas ferramentas mais recentes e estudos científicos começam a incorporar este componente por meio da estimativa da variação do carbono orgânico do solo com base em fatores de emissão do IPCC ou em modelos simplificados (Bača et al., 2024; Helfer & Kissinger, 2023). Nestes casos, o sequestro é geralmente expresso como uma redução das emissões líquidas, podendo representar diminuições na ordem de 10% a

40% da pegada carbónica da produção de uvas, dependendo das práticas adotadas (Steenwerth et al., 2015).

Em termos práticos, a quantificação do sequestro ao nível da produção de uva baseia-se frequentemente na comparação dos stocks de carbono no solo ao longo do tempo ou na aplicação de coeficientes associados a práticas específicas, como a introdução de cobertos vegetais ou a incorporação de resíduos orgânicos (IPCC, 2019). No entanto, a ausência de medições diretas e a dependência de modelos generalizados introduzem incerteza nos resultados, o que explica a sua inclusão ainda limitada em ferramentas operacionais de uso corrente (Rugani et al., 2013).

Assim, embora o sequestro de carbono represente um componente potencialmente relevante na avaliação do impacto climático da viticultura, a sua consideração em ferramentas de cálculo da pegada carbónica ainda não é generalizada, sendo frequentemente omitida ou tratada de forma simplificada. A evidência científica indica que a inclusão deste processo pode alterar significativamente o balanço de carbono dos sistemas vitícolas, reforçando a necessidade de metodologias mais robustas e harmonizadas que integrem tanto as emissões quanto os fluxos de carbono no solo e na biomassa.

1.6. Objetivos

Os objetivos do presente trabalho centram-se no desenvolvimento de um algoritmo de cálculo para quantificar o sequestro de carbono em sistemas vitícolas, com aplicação à RDVV. Este desenvolvimento surge da necessidade de colmatar lacunas identificadas nas abordagens atuais de avaliação da pegada carbónica, que frequentemente não integram de forma consistente os fluxos de carbono associados ao solo e à biomassa em sistemas agrícolas perenes (Rugani et al., 2013; IPCC, 2019).

O principal objetivo deste trabalho consiste na criação de um algoritmo que sirva de base ao desenvolvimento de ferramentas de cálculo capazes de estimar o sequestro de carbono em explorações vitícolas, considerando os diferentes compartimentos relevantes do sistema, nomeadamente o solo, a biomassa da videira, os cobertos vegetais e outros elementos da paisagem agrícola, como sebes e árvores. Pretende-se igualmente identificar e parametrizar os principais fatores que influenciam o sequestro de carbono, incluindo práticas de gestão do coberto vegetal, a incorporação de resíduos orgânicos e a presença de elementos arbóreos, permitindo avaliar diferentes cenários

de gestão e apoiar a identificação de práticas com maior potencial de mitigação das alterações climáticas, com especial aplicação aos produtores da RDVV.

Adicionalmente, o trabalho tem como objetivo assegurar que a ferramenta desenvolvida esteja alinhada com os referenciais metodológicos do Mercado Voluntário de Carbono em Portugal, promovido pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2023). Desta forma, permitirá aos produtos avaliar e estimar o potencial de sequestro das suas explorações para possíveis participações neste tipo de mercados.

Por fim, pretende-se que a ferramenta desenvolvida funcione como um instrumento pedagógico e de apoio à decisão para produtores, entidades gestoras e outras partes interessadas do setor vitivinícola, facilitando a integração do sequestro de carbono nas estratégias de sustentabilidade e promovendo a valorização económica das práticas agrícolas que contribuem para a remoção de carbono atmosférico. Desta forma, o trabalho visa contribuir para a transição do setor vitivinícola para modelos mais sustentáveis, alinhados com os objetivos nacionais e europeus de neutralidade carbónica (European Commission, 2021; APA, 2023).

2. Metodologia do algoritmo de cálculo do sequestro de carbono

A metodologia desenvolvida teve como objetivo criar um algoritmo de cálculo do sequestro de carbono aplicável às explorações vitivinícolas da RDVV. A ferramenta integra diferentes componentes de sequestro considerados relevantes em sistemas vitícolas, nomeadamente culturas permanentes, árvores, restos de poda e práticas de gestão do solo.

Os cálculos foram desenvolvidos com base em fatores médios de sequestro obtidos da literatura científica e de metodologias de contabilização de carbono aplicadas aos setores agrícola e vitivinícola, detalhadas nas próximas secções (Lal, 2004; Steenwerth et al., 2015; Payen et al., 2021). A utilização de fatores médios expressos em tCO_2/ha·ano ou tCO_2/árvore·ano permitiu desenvolver uma metodologia operacionalmente simples e facilmente aplicável pelos produtores agrícolas, sem necessidade de medições laboratoriais ou de levantamentos técnicos complexos (IPCC, 2019).

Cada componente da ferramenta utiliza metodologias de cálculo específicas, adaptadas ao respetivo reservatório de carbono, e os resultados são posteriormente integrados para obter o potencial total de sequestro da exploração agrícola.

2.1. Sequestro associado às culturas permanentes e vegetação natural

O cálculo do sequestro associado às culturas permanentes e à vegetação natural foi realizado pela multiplicação da área ocupada por cada cobertura vegetal pelo respetivo fator de sequestro anual. Estes fatores foram aplicados às áreas ocupadas por vinha e matos existentes na exploração agrícola:

$$Sequestro(tCO_2/ano) = Área(ha) \times Fator\ de\ Sequestro(tCO_2/ha.ano)$$

Os fatores utilizados na ferramenta foram obtidos com base da metodologia do Mercado Voluntário de Carbono para sistemas agrícolas e florestais em Portugal, desenvolvida pela Agência Portuguesa do Ambiente e pela ADENE no âmbito do Programa de Mercado Voluntário de Carbono. Esta metodologia utiliza valores de stock e de

acumulação de carbono baseados em inventários florestais nacionais e na literatura científica de suporte (APA & ADENE, 2024).

Importa salientar que os fatores de sequestro atribuídos à vinha e aos matos representam taxas médias de acumulação de carbono durante a fase de crescimento destas coberturas vegetais. De acordo com a metodologia do Mercado Voluntário de Carbono, estes fatores apenas devem ser aplicados a vinhas e matos com idade inferior a 20 anos, uma vez que, após esse período, os sistemas tendem a aproximar-se de um estado de equilíbrio, com redução significativa das taxas de acumulação de carbono. Nestas condições, o sequestro adicional anual passa a ser considerado marginal, não sendo contabilizado para efeitos de cálculo de créditos de carbono (APA & ADENE, 2024).

Para a vinha, utilizou-se um fator de sequestro de 1.027 tCO_2/ha·ano, valor adotado pela metodologia do Mercado Voluntário de Carbono para culturas vitícolas permanentes. Este fator representa a acumulação média anual de carbono na biomassa aérea e subterrânea da vinha e está alinhado com valores reportados para culturas lenhosas permanentes em sistemas mediterrânicos (Rugani et al., 2013; Steenwerth et al., 2015).

Para os matos, utilizou-se um fator de 1.613 tCO_2/ha·ano, também adotado na metodologia do Mercado Voluntário de Carbono. Este valor baseia-se em estimativas da acumulação de biomassa arbustiva e de carbono orgânico do solo em áreas de vegetação seminatural presentes em paisagens agrícolas portuguesas, sendo consistente com os valores reportados pela FAO (2017) para sistemas de vegetação espontânea.

2.2. Sequestro associado às árvores

O cálculo do sequestro associado às árvores foi realizado com base no número de indivíduos presentes na exploração e nos fatores médios de sequestro específicos de cada espécie arbórea. Os valores utilizados foram obtidos a partir de metodologias do Mercado Voluntário de Carbono em Portugal e de tabelas de stock de carbono por espécie, utilizadas em projetos de florestação e agroflorestação (MITECO, 2023).

Os valores originais disponibilizados pela metodologia encontram-se expressos em tCO_2 por árvore (tCO_2/árvore) e correspondem ao carbono acumulado por cada indivíduo ao fim de um período de referência de 30 anos (MITECO, 2023). Uma vez que o objetivo da ferramenta consiste em estimar o sequestro anual de carbono, foi

necessário converter estes valores para a base anual. Para tal, assumiu-se uma taxa média de acumulação de carbono ao longo do período considerado, dividindo o carbono armazenado por 30 anos:

$$Fator\ de\ sequestro(tCO_2/arv.ano) = \frac{\text{fração de carbono armazenado}(tCO_2/\text{arv})}{30}$$

Após esta conversão, o cálculo do sequestro anual associado à componente arbórea foi realizado através da seguinte expressão:

$$Sequestro\ (tCO_2/ano) = Número\ de\ Árvores \times Fator\ de\ Sequestro\ (tCO_2/árvore \cdot ano)$$

Os fatores utilizados representam valores médios anuais de acumulação de carbono na biomassa arbórea, expressos em tCO_2/árvore·ano (Tabela 2). Quando o produtor não conhece as espécies existentes na exploração, a ferramenta aplica automaticamente um fator médio calculado a partir das espécies incluídas na base de dados. Abaixo encontram-se tabelados os valores de sequestro para cada espécie de árvore considerada.

Tabela 1 – Fatores de sequestro anual por espécie de árvore por ano.

Espécie	Nome comum	tCO2/arv.ano
Abies alba	**Abeto prateado**	0.003
Abies pinsapo	**Abeto espanhol**	0.011
Acer spp.	**Bordo**	0.007
Alnus spp.	**Amieiro**	0.003
Amelanchier ovalis	**Nespereira-das-rochas**	0.007
Arbutus unedo	**Medronheiro**	0.003
Betula spp.	**Vidoeiro**	0.003
Carpinus betulus	**Carpino**	0.003
Castanea sativa	**Castanheira**	0.006
Ceratonia siliqua	**Alfarrobeira**	0.003
Cedrus atlantica	**Cedro-do-Atlas**	0.043
Celtis australis	**Agreira**	0.034

Chamaecyparis lawsoniana	**Cedro-branco**	0.000
Cornus sanguinea	**Sanguinho-legítimo**	0.007
Corylus avellana	**Avelaneira**	0.004
Crataegus spp.	**Azaroleira**	0.007
Cupressus arizonica	**Abronceiro**	0.002
Cupressus macrocarpa	**Cipreste-da-Califórnia**	0.002
Cupressus sempervirens	**Cipreste-comum**	0.002
Eucalyptus camaldulensis	**Eucallipto-de-opérculo-rostrado**	0.052
Eucalyptus globulus	**Eucalipto-comum**	0.068
Fagus sylvatica	**Faia-europeira**	0.001
Fraxinus spp.	**Freixo**	0.006
Ilex aquifolium	**Azevinho**	0.002
Juglans regia	**Nogueira**	0.006
Juniperus oxycedrus	**Cedro-de-Espanha**	0.001
Juniperus communis	**Zimbro-anão**	0.001
Juniperus phoenicea	**Zimbreira**	0.001
Juniperus thurifera	**Junípero-espanhol**	0.001
Larix spp.	**Larício**	0.017
Laurus azorica	**Louro-bravo**	0.007
Laurus nobilis	**Loureiro-comum**	0.007
Malus sylvestris	**Macieira-brava**	0.007
Myrica faya	**Faia-das-ilhas**	0.007
Myrtus communis	**Mirto**	0.007
Olea europaea	**Oliveira-brava**	0.003
Phillyrea la9folia	**Aderno**	0.003
Picea abies	**Abeto-falso**	0.043
Pinus canariensis	**Pinheiro-das-Canárias**	0.005
Pinus halepensis	**Pinheiro-de-Alepo**	0.003
Pinus nigra	**Pinheiro-negro**	0.002
Pinus pinaster	**Pinheiro-bravo**	0.012
Pinus pinea	**Pinheiro-manso**	0.006
Pinus radiata	**Pinheiro-insigne**	0.039

Pinus sylvestris	**Pinheiro-silvestre**	0.002
Pinus uncinata	**Pinheiro-mouro**	0.003
Pistacia terebinthus	**Cornalheira**	0.007
Platanus hispanica	**Plátano**	0.022
Populus alba	**Álamo-alvar**	0.022
Populus nigra	**Álamo-negro**	0.034
Populus x canadensis	**Choupo-do-Canadá**	0.039
Prunus spp.	**Cerejeiras, ameixeiras, pessegueiros e amendoeiras**	0.007
Pseudotsuga menziesii	**Abeto-de-Douglas**	0.043
Pyrus spp.	**Pereira**	0.007
Quercus canariensis	**Carvalho-da-Argélia**	0.004
Quercus faginea	**Carvalho-português**	0.003
Quercus ilex	**Azinheira**	0.002
Quercus pyrenaica	**Carvalho-da-Beira**	0.005
Quercus robur	**Albarinho**	0.006
Quercus rubra	**Carvalho-americano**	0.007
Quercus suber	**Sobreiro**	0.004
Rhamnus alaternus	**Aderno-bravo**	0.007
Robinia pseudacacia	**Acácia-bastarda**	0.006
Salix spp.	**Salgueiro**	0.030
Sorbus spp.	**Sorveira**	0.008
Tamarix spp.	**Tamargueira**	0.003
Taxus baccata	**Teixo**	0.002
Tetraclinis articulata	**Sabina**	0.003
Thuja spp.	**Tuja**	0.001
Tilia spp.	**Tilia**	0.003
Ulmus spp.	**Lamegueiro**	0.009
Fator médio	**-**	0.011

2.3. Sequestro associado à incorporação de restos de poda

O cálculo do sequestro associado aos restos de poda foi desenvolvido considerando apenas situações em que os resíduos lenhosos da vinha são incorporados ou deixados no solo. A metodologia utilizada baseou-se em princípios de contabilização de carbono

presentes na literatura científica relativa à incorporação de biomassa agrícola e carbono orgânico do solo (Lal, 2004; Aguilera et al., 2013).

A fórmula utilizada foi:

$$Sequestro\ (tCO_2/ano) = Biomassa\ de\ poda(kg) \times FC \times FE \times 3.67$$

onde:

- FC = 0.50, correspondente à fração média de carbono da biomassa lenhosa (IPCC, 2019);
- FE = 0.33, correspondente à fração de carbono estabilizada no solo após decomposição da biomassa (IPCC, 2019);
- 3.67, fator de conversão de carbono elementar para CO_2eq.

2.4. Sequestro associado à gestão do solo

Os fatores de sequestro associados às práticas de gestão do solo foram obtidos a partir da análise de Payen et al. (2021), que compilou os resultados de dezenas de estudos sobre o sequestro de carbono em vinhas. Foram utilizados os valores da variação do carbono orgânico do solo (ΔSOC).

O cálculo utilizado foi:

$$Sequestro(tCO_2/ano) = Área\ de\ aplicação \times Fator\ de\ Sequestro$$

Os fatores utilizados foram:

Tabela 2 - Fatores de sequestro por prática de gestão do solo.

Prática	**Fator (tCO_2/ha·ano)**	**Referência**
Culturas de cobertura (cover cropping)	4.45	Payen et al. (2021)
Incorporação de matéria orgânica	7.89	Payen et al. (2021)
Aplicação de biochar	8.96	Payen et al. (2021)
Não mobilização do solo	3.5	Payen et al. (2021)

Ao contrário das componentes anteriores, estes fatores não provêm atualmente da metodologia do Mercado Voluntário de Carbono português. No entanto, foram selecionados por corresponderem à revisão científica mais abrangente disponível especificamente para sistemas vitícolas, sendo, por isso, considerados mais representativos da realidade da RVV.

2.5. Cálculo do sequestro final da exploração

O sequestro total da exploração agrícola foi obtido através da soma de todas as componentes consideradas na ferramenta:

$$Sequestro\ Total\ (tCO_2/ano) = Sequestro_{culturas} + Sequestro_{árvores} + Sequestro_{poda} + Sequestro_{solo}$$

Posteriormente, o valor total foi normalizado pela área total da exploração agrícola para obtenção do indicador final em tCO_2/ha·ano:

$$Sequestro\ Final\ (tCO_2/ha \cdot ano) = \frac{Sequestro\ Total\ (tCO_2/ano)}{Área\ Total\ da\ Quinta\ (ha)}$$

Para além do cálculo do sequestro de carbono, a ferramenta estima também a pegada carbónica associada à produção anual de uvas. Para este efeito, adotou-se um fator de emissão de 0.79 kg CO_2eq/kg de uva produzida. A escolha deste valor fundamentou-se na revisão da literatura científica realizada no âmbito do presente trabalho, na qual foram identificados valores de pegada carbónica da produção de uvas compreendidos entre 0.24 e 0.79 kg CO_2eq/kg de uva em diferentes sistemas vitícolas europeus (Rugani et al., 2013; Bartocci & Fantozzi, 2016; Litskas et al., 2020; Helfer & Kissinger, 2023; Bača et al., 2024).

Optou-se pelo uso do valor de 0.79 kg CO_2eq/kg de uva, correspondente ao limite superior do intervalo identificado na literatura, para adotar uma abordagem conservadora na estimativa das emissões associadas à produção vitícola. Esta opção reduz o risco de subestimação da pegada carbónica da exploração e assegura que o potencial de compensação obtido através do sequestro de carbono não é sobrestimado. Desta forma, os resultados produzidos pela ferramenta refletem um cenário mais exigente em termos de desempenho ambiental, contribuindo para uma avaliação prudente da capacidade de compensação das emissões por meio dos mecanismos de sequestro considerados.

A pegada carbónica anual associada à produção de uvas, convertida em tCO_2/ha.ano, é calculada através da multiplicação da produção anual de uvas pelo fator de emissão adotado:

$$Pegada\ carbónica\ (tCO_2/ha \cdot ano) = \frac{Produção\ de\ uvas\ (kg/ano) \times 0.79}{1000 \times Area\ de\ Quinta\ (ha)}$$

onde:

- 0.79 corresponde ao fator de emissão adotado (kg CO_2eq/kg de uva);
- 1000 corresponde ao fator de conversão de quilogramas para toneladas.

Por fim, a ferramenta calcula o carbono não sequestrado, correspondente à diferença entre a pegada carbónica associada à produção de uvas e o sequestro total estimado para a exploração:

$$Carbono\ Não\ Sequestrado\ (tCO_2/ha.ano) = Pegada\ Carbónica\ Total - Sequestro\ Total$$

Quando este valor é positivo, significa que as emissões associadas à produção vitícola superam o carbono sequestrado pela exploração. Por outro lado, valores negativos indicam que o potencial de sequestro ultrapassa as emissões consideradas, resultando em um balanço líquido positivo de carbono.

3. Utilização do algoritmo como ferramenta de cálculo em Excel

O algoritmo serviu de base para uma ferramenta de cálculo de sequestro desenvolvida no Microsoft Excel. A estrutura da ferramenta foi organizada em cinco folhas principais: “Introdução”, “Culturas”, “Árvores”, “Poda”, “Gestão do Solo” e “Sequestro Final”. Esta organização modular teve como principal objetivo simplificar o preenchimento da informação, separando os diferentes componentes do cálculo de carbono e reduzindo a complexidade da ferramenta para o utilizador final.

3.1. Folha “Introdução”

A primeira folha da ferramenta corresponde à folha “Introdução”, servindo de ponto de contacto inicial entre o produtor e a metodologia desenvolvida. Esta folha foi criada com o objetivo de contextualizar o utilizador relativamente ao funcionamento da ferramenta, explicar quais são os dados necessários para o cálculo do sequestro de carbono e apresentar a lógica geral utilizada nos cálculos automáticos (Figura 1).

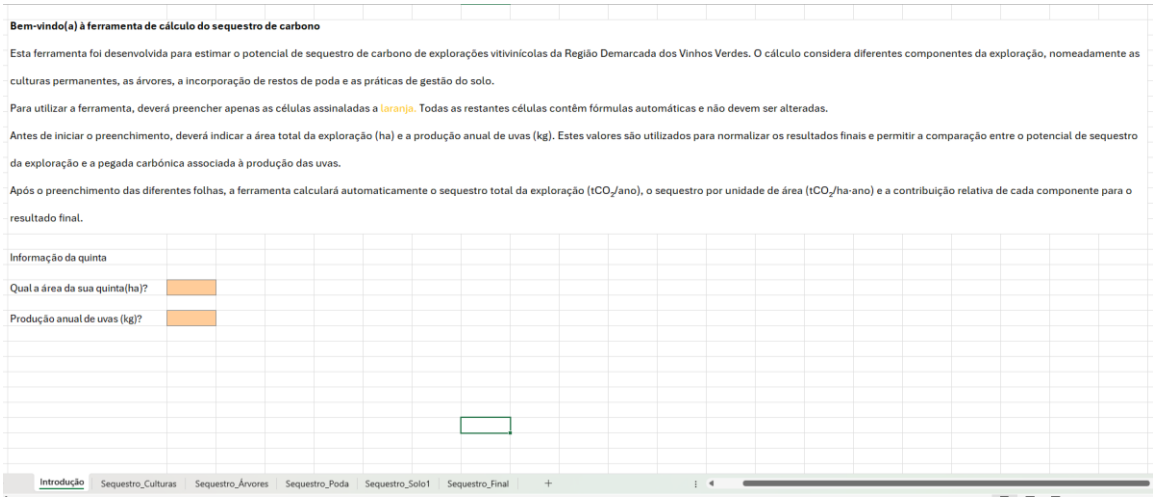


Figura 1 - Folha "Introdução" da Ferramenta

A inclusão desta secção introdutória foi considerada particularmente importante devido ao facto de muitos produtores agrícolas não possuírem experiência prévia em metodologias de contabilização de carbono ou de avaliação ambiental. Diversos estudos demonstram que a complexidade técnica frequentemente constitui uma das principais limitações à adoção prática de ferramentas de sustentabilidade agrícola (Santini et al.,

2013). Assim, procurou-se desenvolver uma interface simples, visualmente intuitiva e acompanhada de explicações básicas sobre o preenchimento.

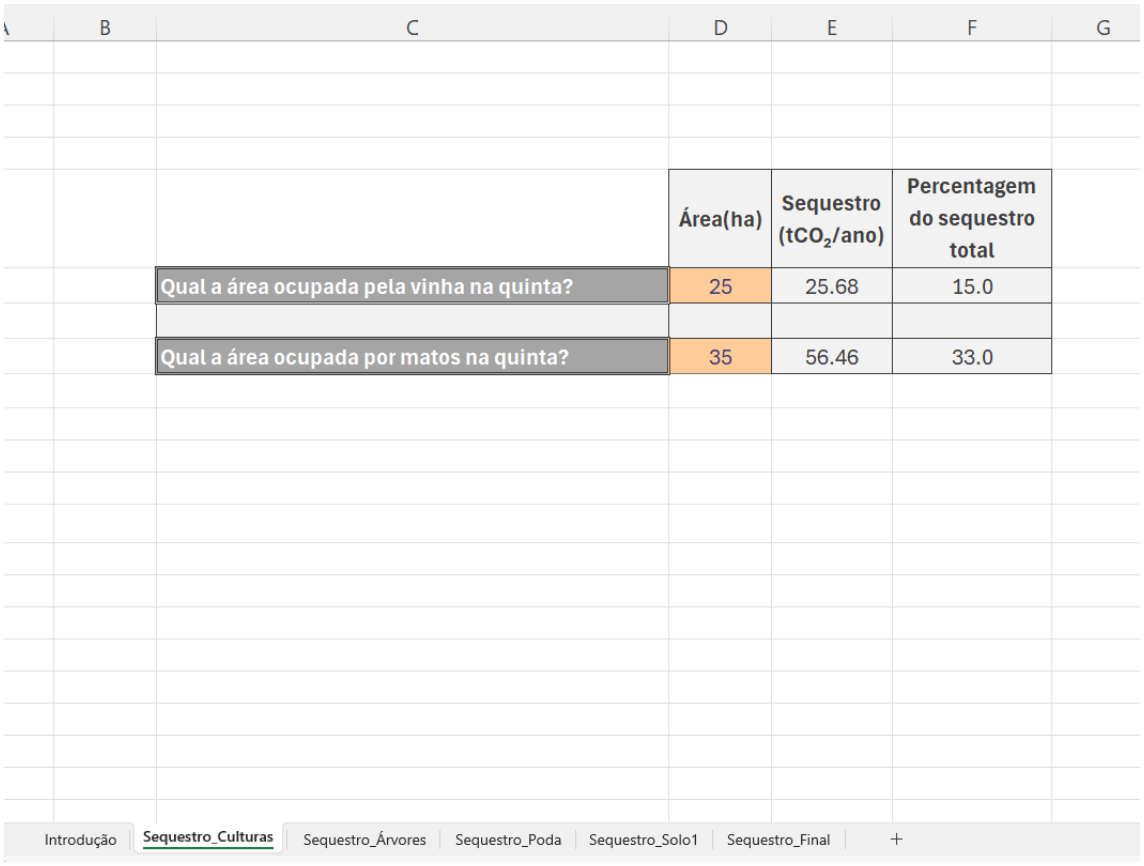
Nesta folha, o produtor deve introduzir dois parâmetros fundamentais: a área total da quinta e a produção anual de uvas. A área total da exploração é necessária para normalizar os resultados de sequestro em $tCO_2/ha \cdot ano$, facilitando comparações entre explorações agrícolas de diferentes dimensões (Bartocci & Fantozzi, 2016). A utilização de indicadores normalizados por hectare é amplamente empregada em estudos de pegada carbónica agrícola e vitivinícola, permitindo avaliar a eficiência carbónica relativa entre diferentes sistemas produtivos.

A produção anual de uvas constitui igualmente um parâmetro essencial, pois permite calcular a pegada carbónica associada à produção vitícola da exploração. A literatura científica demonstra que a pegada carbónica da produção de uvas é frequentemente expressa em kg CO_2eq/kg de uva produzida (Rugani et al., 2013; Litskas et al., 2020). Assim, a introdução deste valor permite, posteriormente, calcular as emissões totais associadas à produção anual da exploração e compará-las ao potencial de sequestro calculado pela ferramenta.

A folha inclui ainda instruções básicas de preenchimento, explicando que apenas determinadas células destacadas devem ser preenchidas manualmente, sendo todos os restantes cálculos realizados automaticamente através de fórmulas internas do Excel.

3.2. Folha “Culturas”

A segunda folha da ferramenta corresponde à folha “Culturas”, destinada à contabilização do sequestro associado às diferentes coberturas vegetais permanentes presentes na exploração agrícola. Esta folha foi desenvolvida para permitir ao produtor introduzir, de forma simples, as áreas ocupadas por vinha e matos (Figura 2).



	Área(ha)	Sequestro (tCO_2/ano)	Percentagem do sequestro total
Qual a área ocupada pela vinha na quinta?	25	25.68	15.0
Qual a área ocupada por matos na quinta?	35	56.46	33.0

Figura 2 - Folha "Culturas" da Ferramenta

O produtor deve apenas introduzir a área correspondente a cada categoria de uso do solo.

A vinha constitui uma das principais componentes desta folha devido ao carácter permanente da cultura e à sua capacidade de acumular carbono na biomassa lenhosa e no sistema radicular (Rugani et al., 2013). Os matos e as áreas de vegetação natural foram igualmente incluídos devido ao seu importante contributo para o armazenamento de carbono e para a biodiversidade em sistemas agrícolas mediterrânicos e atlânticos (FAO, 2017).

Após a introdução das áreas, a ferramenta calcula automaticamente o sequestro anual associado a cada cobertura vegetal, permitindo, posteriormente, integrar estes resultados na folha “Sequestro Final”.

3.3. Folha “Árvores”

A terceira folha da ferramenta corresponde à folha “Árvores”, destinada à contabilização do sequestro associado às árvores presentes na exploração agrícola. Esta componente foi incluída devido ao importante papel que sistemas arbóreos dispersos, sebes, galerias ripícolas e pequenas manchas florestais podem desempenhar no balanço de carbono das explorações vitivinícolas (Lal, 2004) (Figura 3).

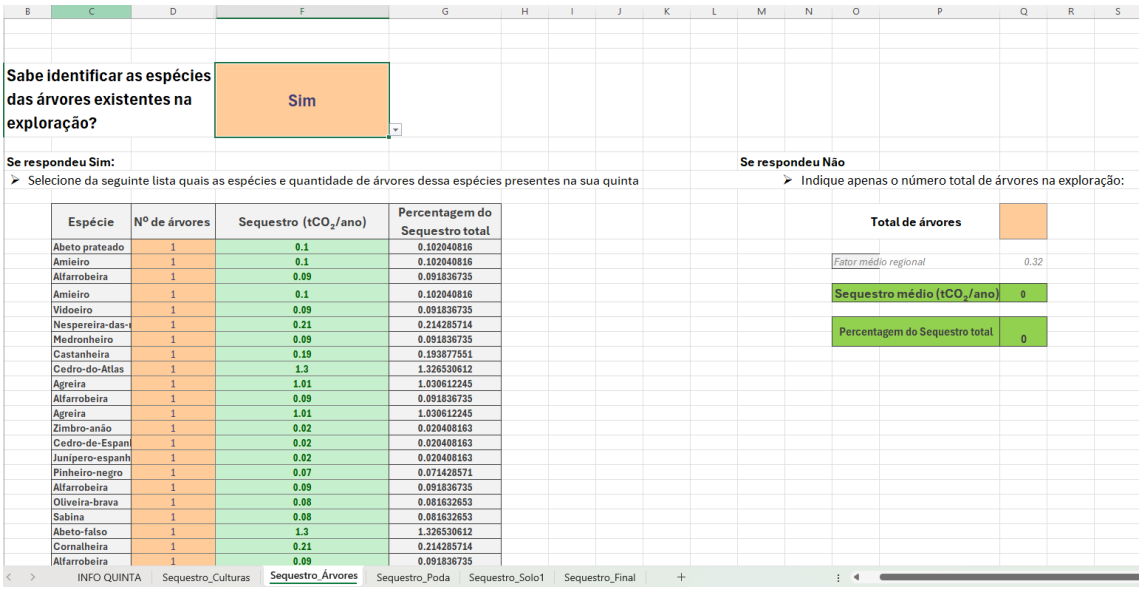
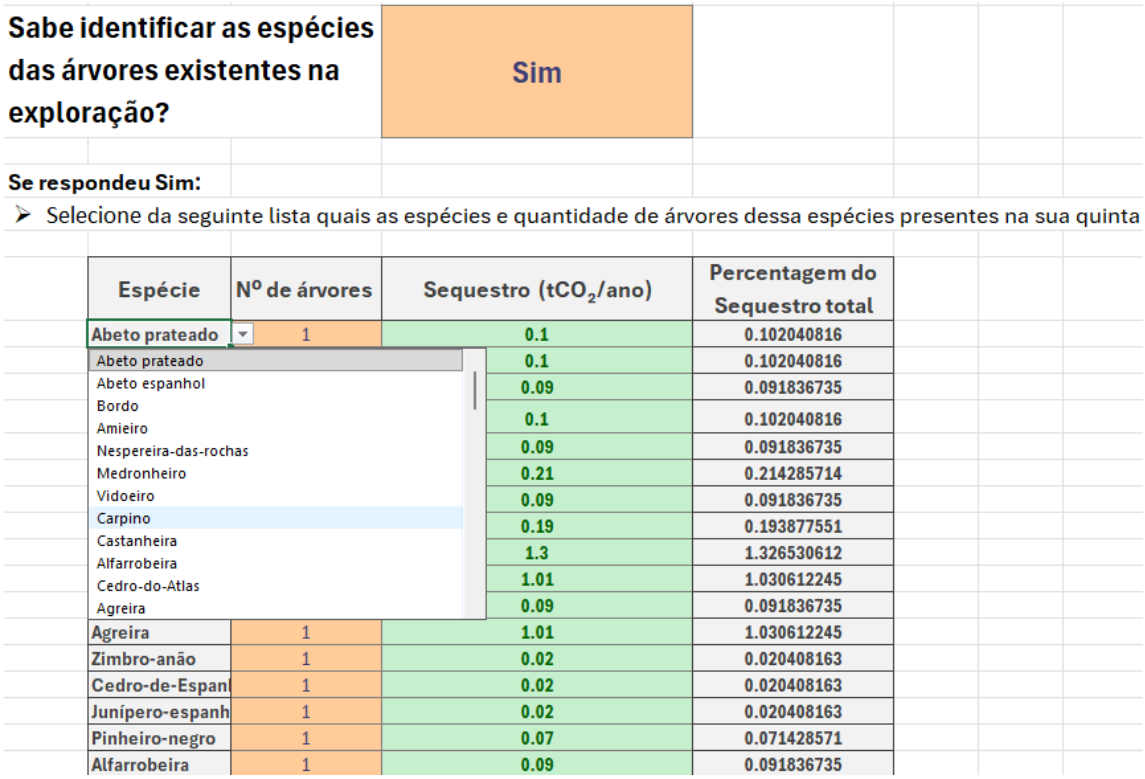


Figura 3 - Folha "Árvores" da Ferramenta

Nesta folha, o produtor deve selecionar as espécies arbóreas existentes na exploração e indicar o respetivo número de árvores, exemplificado na Figura 4. O cálculo do sequestro é realizado automaticamente pela multiplicação do número de indivíduos pelo fator específico de sequestro associado a cada espécie, expresso em tCO_2/árvore·ano.



Sabe identificar as espécies das árvores existentes na exploração? | **Sim**

Se respondeu Sim:

➢ Selecione da seguinte lista quais as espécies e quantidade de árvores dessa espécies presentes na sua quinta

Espécie	Nº de árvores	Sequestro (tCO_2/ano)	Percentagem do Sequestro total
Abeto prateado	1	0.1	0.102040816
Abeto prateado		0.1	0.102040816
Abeto espanhol		0.09	0.091836735
Bordo		0.1	0.102040816
Amieiro		0.09	0.091836735
Nespereira-das-rochas		0.21	0.214285714
Medronheiro		0.09	0.091836735
Vidoeiro		0.19	0.193877551
Carpino		1.3	1.326530612
Castanheira		1.01	1.030612245
Alfarrobeira		0.09	0.091836735
Cedro-do-Atlas		1.01	1.030612245
Agreira		0.09	0.091836735
Agreira	1	1.01	1.030612245
Zimbro-anão	1	0.02	0.020408163
Cedro-de-Espanl	1	0.02	0.020408163
Junípero-espanh	1	0.02	0.020408163
Pinheiro-negro	1	0.07	0.071428571
Alfarrobeira	1	0.09	0.091836735

Figura 4 – Seleção das espécies de árvores na folha “árvores”

A utilização de fatores específicos por espécie permite aumentar a representatividade do cálculo, uma vez que diferentes espécies apresentam capacidades distintas de crescimento e de armazenamento de carbono (IPCC, 2019).

Para situações em que o produtor desconhece as espécies existentes na exploração, a ferramenta permite introduzir apenas o número total de árvores, aplicando-se automaticamente um fator médio de sequestro (Figura 5, Tabela 2).

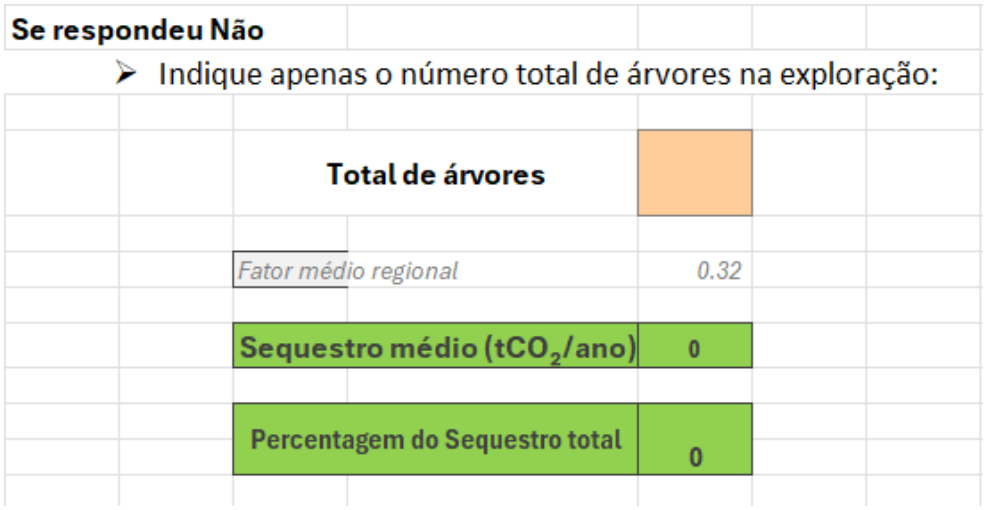


Figura 5 – Parte da folha "Árvores" que calcula o sequestro médio das árvores na exploração.

Esta abordagem foi implementada com o objetivo de aumentar a aplicabilidade prática da ferramenta, reduzindo a necessidade de conhecimentos técnicos detalhados sobre identificação de árvores.

3.4. Folha "Poda"

Esta folha destina-se ao cálculo do sequestro de carbono associado à incorporação dos restos de poda da vinha no solo (Figura 6). Esta componente foi incluída na ferramenta devido ao potencial da biomassa lenhosa da poda para aumentar os stocks de carbono orgânico do solo quando é triturada e deixada na parcela, em vez de ser removida ou queimada.

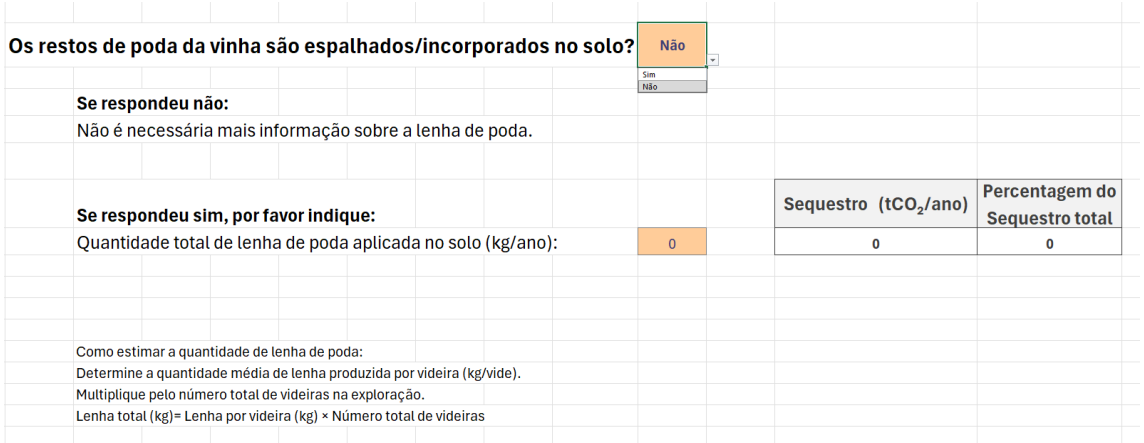


Figura 6 - Folha de cálculo da incorporação dos restos de poda no solo

O preenchimento desta folha inicia-se com a indicação de se os restos de poda são ou não incorporados no solo. Caso a resposta seja negativa, a ferramenta assume que não há sequestro associado a esta componente e que não são necessários dados adicionais. Caso a resposta seja afirmativa, o utilizador deve indicar a quantidade anual de lenha de poda incorporada à parcela.

Quando a quantidade de lenha de poda não é conhecida, pode ser estimada pela multiplicação da quantidade média de lenha produzida por videira pelo número total de videiras da exploração.

3.5. Folha “Gestão do solo”

A quarta folha corresponde à folha “Gestão do Solo”, considerada uma das componentes mais relevantes da ferramenta devido ao elevado potencial de sequestro associado aos solos agrícolas (Lal, 2004). Diversos estudos demonstram que práticas sustentáveis de gestão do solo podem aumentar significativamente os stocks de carbono orgânico, contribuindo simultaneamente para melhoria da estrutura do solo, retenção hídrica e redução da erosão (Steenwerth & Belina, 2008) (Figura 7).

Qual é a área da entrelinha (ha)?		1	
Indique, na seguinte tabela, a área de aplicação de cada uma das medidas de gestão do solo.			
Medida de Gestão do Solo	**Área(ha)**	**Sequestro (tCO_2/ano)**	**Percentagem do Sequestro total**
Culturas de cobertura (cover cropping)	1	4.45	33.08550186
Incorporação de matéria orgânica (estrume, composto, etc)	0	0	0
Incorporação de Biochar	0	0	0
Não-mobilização do solo	0	0	0

Figura 7 - Folha "Gestão do Solo"

Nesta folha, o produtor deve indicar as práticas de gestão do solo utilizadas na exploração e a respetiva área de aplicação. As práticas consideradas incluem culturas de cobertura (“cover cropping”), incorporação de matéria orgânica, aplicação de biochar e não mobilização do solo.

A ferramenta permite, assim, calcular automaticamente o contributo individual de cada prática para o aumento dos stocks de carbono orgânico do solo da exploração.

3.6. Folha “Sequestro Final”

Corresponde à última etapa da ferramenta, que reúne automaticamente os resultados obtidos nas restantes folhas de cálculo. O seu principal objetivo é apresentar o potencial total de sequestro de carbono da exploração, identificar o contributo de cada componente considerada e comparar esse valor com a pegada carbónica associada à produção anual de uvas (Figura 8).

	(tCO_2/ha.ano)
Sequestro Total da Quinta	Valor
Pegada Carbónica Média da Produção de Uvas na Europa (tCO2/ha.ano)	Valor
Produtividade da Quinta (kg/ha) (utilizando apenas área de vinha)	Valor
Pegada Carbónica da Produção de Uvas na Quinta	Valor
Carbono não sequestrado	Valor

Figura 8 - Folha "Sequestro Final". Nos campos onde está escrito "Valor", estarão os valores totais calculados com base no que foi inserido pelo produtor nas outras folhas.

Nesta folha são agregados os valores de sequestro provenientes das culturas permanentes e da vegetação natural, das árvores existentes na exploração, da incorporação de restos de poda e das práticas de gestão do solo. É também apresentado o balanço entre a pegada carbónica da produção e o carbono sequestrado pela exploração. Este indicador permite avaliar se o potencial de sequestro é suficiente para compensar as emissões associadas à atividade vitícola. Valores positivos indicam que as emissões são superiores ao carbono sequestrado, enquanto valores negativos indicam que a exploração sequestra mais carbono do que é emitido.

Quando este valor é positivo, significa que as emissões associadas à produção vitícola superam o carbono sequestrado pela exploração. Por outro lado, valores negativos indicam que o potencial de sequestro ultrapassa as emissões consideradas, resultando em um balanço líquido positivo de carbono.

Desta forma, a folha “Sequestro Final” sintetiza toda a informação produzida pela ferramenta, permitindo ao utilizador obter uma visão integrada do desempenho

carbónico da exploração e identificar quais as componentes com maior potencial para contribuir para estratégias de mitigação das alterações climáticas.

4. Avaliação do caso de estudo e discussão dos resultados

A ferramenta de cálculo desenvolvida foi aplicada a uma exploração vitícola com o objetivo de avaliar o potencial de sequestro de carbono associado aos diferentes componentes considerados na metodologia. A aplicação da ferramenta permitiu testar a sua operacionalidade em condições reais e avaliar o contributo relativo de cada componente para o balanço global de carbono da exploração.

Os resultados obtidos demonstraram um sequestro total estimado de aproximadamente 171.13 tCO_2/ano, o que corresponde a cerca de 2.59 tCO_2/ha·ano. Este valor encontra-se dentro da gama de valores reportada (0.87 – 5.84 tCO_2/ha·ano) na literatura para sistemas vitícolas que combinam culturas permanentes, vegetação natural e práticas de gestão do solo favoráveis à acumulação de carbono (Steenwerth et al., 2015; Payen et al., 2021). Diversos estudos demonstram que o potencial de sequestro em explorações vitícolas pode variar significativamente em função das práticas de gestão adotadas, da presença de cobertos vegetais e da diversidade de elementos naturais na paisagem agrícola (Aguilera et al., 2013). De forma a facilitar a interpretação dos resultados obtidos, a Tabela 4 apresenta a contribuição relativa de cada componente considerada na ferramenta para o sequestro total de carbono da exploração.

Tabela 3 - Contributo percentual das diferentes componentes para o sequestro total de carbono da exploração.

Componente	**Contributo para o sequestro total (%)**
Culturas	48.0
Árvores	0,0
Poda	0,0
Gestão do solo	52.0
Total	100.0

O gráfico 1 apresenta a distribuição percentual do sequestro total pelas componentes individuais de cada folha que contribuíram efetivamente para o resultado final.

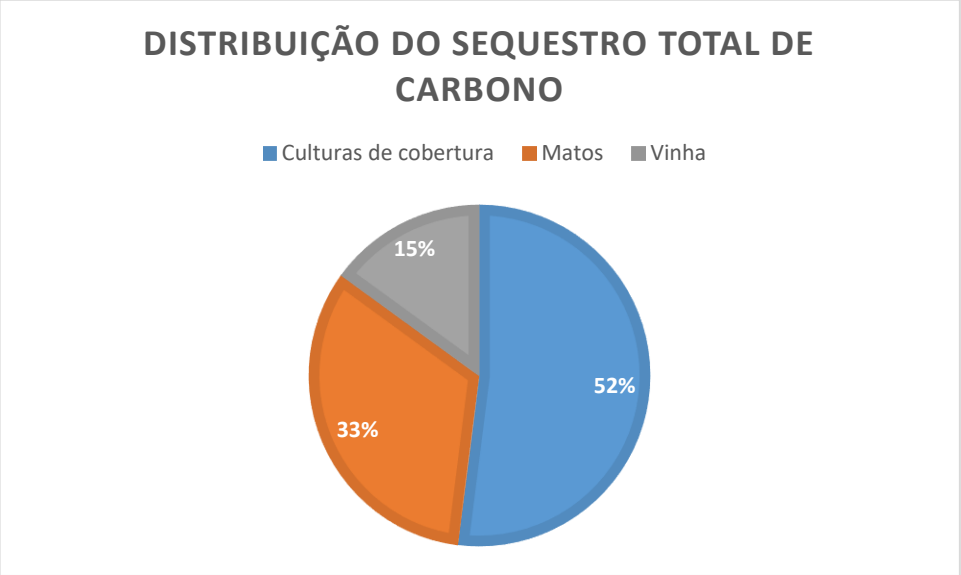


Gráfico 1 - Distribuição percentual do sequestro de carbono pelas diferentes componentes da exploração.

A análise dos resultados demonstra que as culturas de cobertura do solo constituem a principal fonte de sequestro de carbono da exploração, representando aproximadamente 52% do sequestro total estimado. Este resultado evidencia a importância da gestão do solo no balanço de carbono dos sistemas vitícolas e encontra-se em concordância com a literatura científica disponível. Diversos estudos têm demonstrado que a manutenção de cobertos vegetais permanentes ou temporários entre as linhas da vinha constitui uma das estratégias mais eficazes para aumentar os stocks de carbono orgânico do solo, uma vez que promove a incorporação contínua de biomassa vegetal, reduz as perdas de carbono por erosão e estimula a atividade microbiana responsável pela formação de matéria orgânica estável (Steenwerth & Belina, 2008; Payen et al., 2021). Para além do efeito direto no sequestro de carbono, as culturas de cobertura proporcionam benefícios adicionais ao nível da conservação do solo, da retenção de água e da biodiversidade funcional, contribuindo para a sustentabilidade global do sistema agrícola. O elevado contributo desta componente para o resultado final demonstra que as práticas de gestão adotadas na exploração constituem um dos principais fatores responsáveis pelo potencial de sequestro observado.

Os matos constituíram a segunda componente mais importante, respondendo por aproximadamente 33% do sequestro total calculado. Apesar de frequentemente serem considerados áreas sem interesse produtivo direto, os matos desempenham um papel fundamental no armazenamento de carbono em paisagens agrícolas. A vegetação arbustiva acumula carbono tanto na biomassa aérea quanto nos sistemas radiculares e,

simultaneamente, contribui para a formação e conservação da matéria orgânica no solo. A reduzida intensidade de intervenção humana nestas áreas favorece a acumulação progressiva de carbono ao longo do tempo, permitindo que funcionem como importantes reservatórios naturais (FAO, 2017). A relevância desta componente no presente caso de estudo demonstra que os elementos naturais da paisagem podem contribuir significativamente para o balanço carbónico de uma exploração agrícola, mesmo quando não estão diretamente associados à produção. Este resultado está de acordo com estudos que apontam para a importância da heterogeneidade da paisagem agrícola na mitigação das alterações climáticas, através da integração de áreas de vegetação natural ou seminatural nos sistemas produtivos (Aguilera et al., 2013).

A vinha apresentou uma contribuição de aproximadamente 15% para o sequestro total da exploração. Embora este valor seja inferior ao observado nas culturas de cobertura e nos matos, continua a representar uma parcela relevante do carbono armazenado. A videira é uma cultura permanente e lenhosa, o que permite a acumulação contínua de carbono na biomassa ao longo do seu ciclo de vida. O carbono é armazenado não apenas nos troncos e braços permanentes das plantas, mas também nos sistemas radiculares, constituindo um reservatório relativamente estável em comparação com o das culturas anuais (Rugani et al., 2013). A literatura indica que o potencial de sequestro de vinhas depende de diversos fatores, incluindo a idade da plantação, o vigor vegetativo, a densidade de plantio e as práticas de gestão adotadas (Steenwerth et al., 2015). Assim, embora a contribuição da vinha para o resultado final seja inferior à observada para outras componentes, esta continua a desempenhar um papel importante no balanço global de carbono da exploração.

Relativamente à componente arbórea, não foi contabilizado qualquer valor de sequestro devido à ausência de informação sobre o número de árvores e respetivas espécies. A informação recolhida não permitiu determinar se a exploração não possui árvores ou se as possui, mas não foram inventariadas pelo produtor por falta de conhecimento da quantidade de árvores presentes na exploração. Esta distinção é particularmente importante, uma vez que a presença de árvores dispersas, sebes vivas, galerias ripícolas ou pequenos núcleos arbóreos pode representar um contributo significativo para o sequestro total de carbono numa exploração agrícola. Consequentemente, o valor nulo obtido para esta componente não deve ser interpretado como ausência de sequestro arbóreo, mas sim como uma limitação da informação disponível para aplicação da metodologia.

Também os restos de poda não contribuíram para o resultado final, uma vez que estes resíduos não são atualmente incorporados no solo. A biomassa resultante da poda representa uma fração importante do carbono fixado anualmente pela videira e, quando incorporada no solo, pode contribuir para o aumento dos stocks de carbono orgânico através da decomposição e estabilização de parte desse carbono (Lal, 2004; Aguilera et al., 2013). Na metodologia utilizada, esta componente é contabilizada apenas quando os restos de poda permanecem na exploração e são incorporados ao solo. Assim, o valor nulo observado não significa ausência de produção de biomassa lenhosa, mas sim que essa biomassa não está a ser utilizada de forma a gerar um benefício adicional em termos de sequestro contabilizado.

A ferramenta permitiu igualmente comparar o potencial total de sequestro da exploração com a pegada carbónica associada à produção de uvas. Para este efeito, o valor de sequestro obtido através da ferramenta, de 2.59 tCO_2/ha·ano, foi comparado com a pegada carbónica da produção de uvas estimada para a exploração, de 2.16 tCO_2/ha·ano. Os resultados demonstram que o potencial de sequestro excede as emissões associadas à atividade produtiva, permitindo compensar cerca de 120% da pegada carbónica da produção vitícola. Consequentemente, obteve-se um saldo líquido de -0.43 tCO_2/ha·ano, indicando que a exploração sequestra mais carbono do que aquele que é emitido durante a produção das uvas consideradas na ferramenta.

Este resultado assume particular relevância no contexto atual de mitigação das alterações climáticas, uma vez que demonstra que determinadas combinações de práticas agrícolas e elementos naturais da paisagem podem permitir atingir balanços carbónicos positivos em sistemas vitícolas. A combinação de culturas de cobertura, áreas de vegetação natural e do armazenamento de carbono associado à biomassa permanente da vinha permitiu que o potencial de sequestro ultrapassasse as emissões consideradas na produção de uvas. Embora este resultado não represente necessariamente a neutralidade carbónica de toda a exploração, uma vez que outras fontes de emissão poderão existir fora do âmbito da ferramenta, demonstra claramente o potencial das estratégias de sequestro para compensar uma parte substancial das emissões associadas à atividade agrícola.

Os resultados obtidos sugerem igualmente algumas oportunidades de melhoria do potencial de sequestro. Uma das mais evidentes corresponde à incorporação dos restos de poda no solo, permitindo valorizar a biomassa produzida anualmente e promover a acumulação de carbono orgânico no solo. Diversos estudos demonstram que a incorporação continuada de resíduos vegetais pode contribuir para o aumento do

carbono estabilizado no solo e para a melhoria das suas propriedades físicas e biológicas (Lal, 2004; Aguilera et al., 2013).

Outra possibilidade de aumento efetivo do sequestro corresponderia à introdução de novos elementos arbóreos na exploração. A plantação de árvores ou o reforço de estruturas lineares como sebes vivas e galerias ripícolas permitiria aumentar a biomassa permanente existente e, consequentemente, a capacidade de armazenamento de carbono a longo prazo. Para além do benefício direto associado ao sequestro de carbono, estas estruturas podem ainda contribuir para o aumento da biodiversidade, proteção do solo e melhoria da conectividade ecológica da paisagem agrícola (FAO, 2017).

Relativamente à gestão do solo, importa salientar que a exploração já utiliza a prática que apresentou o maior contributo para o sequestro total observado, nomeadamente as culturas de cobertura. Assim, não faria sentido recomendar a substituição desta prática por outras de menor desempenho. No entanto, a literatura analisada por Payen et al. (2021) demonstra que determinadas práticas, como a incorporação de matéria orgânica ou a aplicação de biochar, podem apresentar fatores de sequestro superiores aos das culturas de cobertura quando aplicadas adequadamente. Consequentemente, a adoção complementar destas práticas poderá representar uma oportunidade de aumentar o potencial de sequestro, desde que exista viabilidade técnica e económica para a sua implementação.

De forma global, os resultados obtidos demonstram que o potencial de sequestro observado resulta sobretudo da combinação entre práticas adequadas de gestão do solo, a presença de vegetação natural e o armazenamento de carbono associado à cultura permanente. A distribuição observada entre as diferentes componentes evidencia que o sequestro de carbono em explorações vitícolas não depende exclusivamente da vinha, mas sim da interação entre vários elementos da paisagem e das práticas de gestão adotadas. No caso analisado, o sequestro estimado foi suficiente para compensar integralmente a pegada carbónica associada à produção de uvas considerada na ferramenta, resultando num balanço líquido positivo de carbono. Esta constatação reforça a importância de abordagens integradas de gestão agrícola, capazes de maximizar simultaneamente a produção, a conservação dos recursos naturais e a mitigação das alterações climáticas.

5. Conclusão

O desenvolvimento desta ferramenta permitiu criar uma metodologia simples e prática para estimar o sequestro de carbono em explorações vitivinícolas da RDVV. Através da integração de diferentes componentes da exploração, como as culturas permanentes, os matos, as árvores, os restos de poda e as práticas de gestão do solo, foi possível obter uma estimativa do potencial total de sequestro de carbono da quinta e compará-lo com a pegada carbónica associada à produção de uvas.

Os resultados obtidos mostram que determinadas práticas e elementos da paisagem agrícola podem contribuir de forma bastante relevante para o balanço de carbono da exploração. As áreas de vegetação natural e as práticas de gestão sustentável do solo revelaram-se particularmente importantes, demonstrando que a forma como a exploração é gerida pode influenciar significativamente o seu potencial de mitigação climática. Ao mesmo tempo, a comparação entre o sequestro total e a pegada carbónica da produção de uvas mostrou que, embora o sequestro não compense totalmente as emissões geradas, pode reduzir consideravelmente o impacto carbónico da produção vitícola.

Outro aspeto importante deste trabalho foi a adaptação da metodologia às características específicas da RVV. Apesar de já existirem ferramentas e algoritmos de contabilização de carbono desenvolvidos para outras regiões vitivinícolas portuguesas, como o Douro, existia necessidade de criar uma abordagem mais ajustada às condições produtivas, climáticas e paisagísticas desta região. Nesse sentido, procurou-se desenvolver uma ferramenta operacional, de preenchimento simples e baseada em práticas e componentes efetivamente presentes nas explorações vitivinícolas da região.

Apesar dos resultados obtidos, ainda há várias possibilidades de desenvolvimento futuro. Uma das principais seria a recolha de dados reais provenientes de mais explorações vitivinícolas da RVV, permitindo validar e ajustar os fatores médios utilizados na ferramenta. Atualmente, muitos dos valores utilizados foram extraídos da literatura científica internacional e, embora representem uma boa aproximação, seria importante desenvolver fatores mais específicos às condições edafoclimáticas da região.

Outro possível desenvolvimento futuro seria aprofundar a componente associada ao carbono do solo. O solo representa não só um dos maiores reservatórios de carbono nos sistemas agrícolas, mas também um dos componentes mais difíceis de quantificar com precisão. A realização de ensaios de campo e análises laboratoriais em

explorações da região permitiria melhorar significativamente a robustez científica dos fatores de sequestro utilizados nas diferentes práticas de gestão do solo.

Também seria interessante aprofundar a componente arbórea da ferramenta. Em muitas explorações existem árvores dispersas, sebes e galerias ripícolas que podem representar um contributo relevante para o sequestro total, mas cuja contabilização ainda apresenta algumas limitações devido à dificuldade em obter dados detalhados sobre espécies, idade e dimensões das árvores.

Relativamente aos restos de poda, trabalhos futuros poderiam estudar de forma mais específica a quantidade média de biomassa produzida pelas vinhas da região e a fração efetivamente estabilizada no solo após incorporação. Isto permitiria tornar esta componente da ferramenta mais representativa das condições reais das explorações vitivinícolas dos Vinhos Verdes.

Outra possibilidade relevante seria expandir a componente da pegada carbónica da produção de uvas. Neste trabalho, foram utilizados fatores médios obtidos a partir de estudos europeus, mas, no futuro, seria importante desenvolver fatores específicos para a RVV, considerando operações agrícolas reais, consumo de combustível, fertilização, fitofármacos e outras práticas adotadas pelos produtores da região.

Finalmente, a ferramenta poderá também evoluir para uma plataforma digital ou aplicação online, facilitando o preenchimento pelos produtores e permitindo integração futura com sistemas de monitorização ambiental ou até com projetos de mercado voluntário de carbono. O crescente interesse do setor vitivinícola por práticas sustentáveis e estratégias de neutralidade carbónica demonstra que ferramentas deste tipo poderão desempenhar um papel importante no futuro da viticultura sustentável em Portugal.

Referências Bibliográficas

- Aguilera, E., Lassaletta, L., Gattinger, A., & Gimeno, B. S. (2013). Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 168*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.003
- Amorim Cork. (2022) Carbon Footprint Report. *Amorim Cork.*
- APA – Agência Portuguesa do Ambiente. (2023). Mercado Voluntário de Carbono em Portugal: Enquadramento e funcionamento. *Agência Portuguesa do Ambiente.*
- APA – Agência Portuguesa do Ambiente & ADENE – Agência para a Energia. (2024). Metodologia do Mercado Voluntário de Carbono para Sistemas Agrícolas e Florestais em Portugal. *Agência Portuguesa do Ambiente*
- Bača, M., Burg, P., Zemánek, P., & Badalíková, B. (2024). Carbon footprint assessment of different vineyard management systems in Central Europe. *Sustainability, 16*(3), 1142. https://doi.org/10.3390/su16031142
- Bartocci, P., & Fantozzi, F. (2016). Environmental impact of Sangiovese wine production: An assessment of carbon footprint and energy performance. *Journal of Cleaner Production, 172*, 3506–3518. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.056
- European Commission. (2021). Communication from the Commission: Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality. *European Commission.*
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). Soil organic carbon: The hidden potential. *Food and Agriculture Organization of the United Nations.*
- Helfer, F., & Kissinger, M. (2023). Climate impacts of Mediterranean viticulture under different irrigation and management scenarios. *Science of the Total Environment, 858*, 159832. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159832
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *IPCC.*
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Cambridge University Press*.
- Instituto da Vinha e do Vinho (IVV). (2022). Estatística. Disponível em: https://www.ivv.gov.pt/np4/estatistica/
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 14067: Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. *ISO.*
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science, 304*(5677), 1623–1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd ed.). *Routledge.*
- Litskas, V. D., Karaolis, C. S., Menexes, G. C., Mamolos, A. P., Koutsos, T. M., & Kalburtji, K. L. (2020). Variation of energy flow and greenhouse gas emissions in vineyards located in semi-arid environments. *Science of the Total Environment, 703*, 134989. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134989

- MITECO – Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). Metodología para proyectos de absorción de CO_2 y tablas de almacenamiento de carbono por especie. *Madrid: Gobierno de España*.
- Nemecek, T., Dubois, D., Huguenin-Elie, O., & Gaillard, G. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems, 104*(3), 217–232. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.10.002
- OIV – Organisation Internationale de la Vigne et du Vin. (2023). State of the World Vine and Wine Sector in 2023. *Paris: OIV.*
- Payen, F. T., Sykes, A., Aitkenhead, M., Alexander, P., Moran, D., & MacLeod, M. (2021). Soil organic carbon sequestration rates in vineyard agroecosystems under different soil management practices: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production, 290*, 125736. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125736
- Rugani, B., Vázquez-Rowe, I., Benedetto, G., & Benetto, E. (2013). A comprehensive review of carbon footprint analysis as an extended environmental indicator in the wine sector. *Journal of Cleaner Production, 54*, 61–77. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.036
- Santini, C., Cavicchi, A., & Casini, L. (2013). Sustainability in the wine industry: Key questions and research trends. *Agricultural and Food Economics, 1*(1), 9. https://doi.org/10.1186/2193-7532-1-9
- Steenwerth, K. L., & Belina, K. M. (2008). Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem. *Applied Soil Ecology, 40*(2), 359–369. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.06.006
- Steenwerth, K., Strong, E. B., Greenhut, R. F., Williams, L., Kendall, A., & Hopmans, J. W. (2015). Life cycle greenhouse gas, energy, and water assessment of wine grape production in California. *International Journal of Life Cycle Assessment, 20*(9), 1245–1258. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0935-3