

**Potencial de sequestro de carbono em sistemas florestais e
agroflorestais de castanheiro (*Castanea sativa* Mill.)**

Luan Luchese

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de
Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Gestão de
Recursos Florestais no âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Orientado por

Professora Doutora Maria do Sameiro Ferreira Patrício

Professor Doutor Eleandro José Brun

Bragança

2023

Dedico este trabalho à minha mãe Osani,
meu pai Marcelo, minhas avós Terezinha
e Bernadete, e ao meu avô Suelcy.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem a ajuda de muitas pessoas, as quais deixo aqui meus agradecimentos.

À minha orientadora, a Professora Dr^a Maria do Sameiro Ferreira Pátricio por ter aceitado me orientar e me conduzir na realização do presente trabalho, e por toda a paciência, compreensão, dedicação, e excelência em compartilhar o conhecimento. Ao Professor Dr. Luís Filipe de Sousa Teixeira Nunes por todo o suporte e auxílio em muitos momentos desta dissertação.

Ao meu coorientador, o Professor Dr. Eleandro José Brun, por ter aceitado me coorientar neste trabalho e em todo o meu percurso acadêmico, por sempre se mostrar um profissional exemplar disponível para orientar, aconselhar, motivar, cobrar, e oportunizar o meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

À minha mãe Osani, que mesmo em meio a tantas dificuldades batalhou muito para que eu conseguisse realizar os meus sonhos, me apoiou, motivou, educou, e amou incondicionalmente, sempre acreditando em mim em todos os momentos. Ao meu pai Marcelo, por sempre ter me passado os melhores exemplos e valores, e me ensinar a importância da luta e do trabalho honesto para alcançar os meus objetivos.

Às minhas avós Terezinha e Bernadete, assim como o meu avô Suelcy, por toda a participação que tiveram na minha criação, e educação, tendo sido essenciais para que hoje eu seja quem sou.

Aos meus irmãos Roger e Leonardo, assim como meus tios, que sempre estiveram comigo me apoiando e me aconselhando de alguma forma, mesmo que a distância.

Ao meu sobrinho Rafael por ter despertado o amor mais puro e incondicional que existe em mim.

À minha namorada Ana Carolina, pela paciência, apoio, dedicação e companheirismo na realização deste trabalho, e por ter sido a minha família em Portugal, estando ao meu lado em todos os momentos felizes e nas dificuldades.

Aos meus amigos do Brasil e de Portugal, em especial a todos os meus colegas de república universitária, pelas histórias vividas, pelo apoio nos momentos difíceis, e principalmente pelos momentos felizes que compartilhamos juntos.

Por fim, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Instituto Politécnico de Bragança, por terem me permitido realizar tantos sonhos, objetivos, e oportunidades magníficas de formação profissional e pessoal.

RESUMO

A preocupação crescente com os cenários atuais e futuros das mudanças climáticas tem alertado os governos em todo o mundo para buscar soluções visando a redução das emissões de gases poluentes, como o CO₂, e promover medidas mitigadoras, incluindo o sequestro de carbono pelas florestas. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo analisar o potencial de sequestro e armazenamento de carbono, assim como a possível valoração desse serviço ecossistêmico, em plantações jovens de *Castanea sativa* Mill. em sistema agroflorestal (soutos) e em sistema florestal (alto fuste e talhadia). A análise foi efetuada considerando a classe de qualidade da estação. No regime de talhadia foram considerados diferentes objetivos de produção: pequenos, médios e grandes diâmetros com modelos silvícolas diferenciados. Com base em dados dendrométricos de parcelas permanentes localizadas em povoamentos de alto fuste de castanheiro para produção de madeira, localizados nos Concelhos de Bragança e Vila Flor, determinou-se a classe de qualidade dos mesmos com base nas equações existentes. Os povoamentos foram agrupados em três níveis de qualidade (baixo, médio e superior) para os quais se estimaram as respectivas biomassas através de equações disponíveis na literatura. No agroflorestal (alto fuste enxertado), foram usadas equações de povoamento para estimar a biomassa considerando duas densidades de plantação (7mx7m e 10mx10m), para os mesmos valores de índice de sítio (estação) encontrados nos povoamentos florestais de alto fuste. Relativamente à talhadia, estimou-se a biomassa com base em dados dendrométricos recolhidos em parcelas permanentes, submetidas a diferentes modelos de gestão silvícola, localizadas na Serra da Padrela. Através da avaliação do crescimento e produção em diversas idades do período juvenil, até aos 25 anos de idade, foi possível estimar o incremento em biomassa/carbono por hectare e por ano para as diferentes classes de qualidade e sistemas de produção. Os valores de armazenamento total de C nas plantas (parte aérea e raiz) e no solo variaram de 140 a 160 Mg C ha⁻¹ nos povoamentos florestais de talhadia, de 43 a 111 Mg C ha⁻¹ nos de alto fuste e de 24 a 56 Mg C ha⁻¹ nas áreas agroflorestais (soutos). As taxas de sequestro anual de CO₂ variaram de 5,28 a 12,70 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ nas plantações florestais em alto fuste, 0,31 a 5,39 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ considerando as duas densidades de soutos, e 10,72 a 13,65 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ para a talhadia. Considerando cada sistema silvicultural estudado, a valoração máxima encontrada foi de 453,00 € ha⁻¹ ano⁻¹ para os soutos, 1066 € ha⁻¹ ano⁻¹ para os povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste e 1146 € ha⁻¹ ano⁻¹ para os povoamentos de talhadia.

Palavras chaves: Sistema silvicultural; soutos; armazenamento de carbono; valoração; site index;

ABSTRACT

The increasing concern regarding climate change has prompted governments worldwide to tackle the issue of reducing emissions of polluting gases, such as CO₂, and promote measures to mitigate its impact. Forest carbon sequestration plays an integral role in these comprehensive efforts to address the issue. This study aimed to analyze the potential for carbon sequestration and storage, as well as the potential valuation of this ecosystem service, in young plantations of *Castanea sativa* Mill. in agroforestry system (groves) and forest system (high forest and coppice). The analysis was carried out considering the site index. For coppice, different production objectives were considered: small, medium and large diameters with different silvicultural models. Based on dendrometric data obtained from permanent plots established in high forest stands for timber production, located in the municipalities of Bragança and Vila Flor, the site index of the plots was determined using existing equations. The stands were categorized into three quality levels (low, medium, and high) for which the corresponding biomasses were estimated using equations found in the literature. In the agroforestry system (grafted high forest), stand equations were employed to estimate biomass considering two planting densities (7m x 7m and 10m x 10m) with the same site index values considered in the high forest stands. Regarding coppice, biomass was estimated using dendrometric data collected from permanent plots subjected to various models of silvicultural management. These plots were located in Serra da Padrela. By evaluating the growth and production at different ages within the juvenile period, up to 25 years old, it was possible to estimate the biomass/carbon increment per hectare and per year for the various site index and production systems. The total carbon (C) storage values in plants (aerial and roots) and soil ranged from 140 to 160 Mg C ha⁻¹ in coppice forest stands, from 43 to 111 Mg C ha⁻¹ in high forest stands, and from 24 to 56 Mg C ha⁻¹ in agroforestry areas (groves). The annual CO₂ sequestration rates ranged from 5.28 to 12.70 Mg CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ in high forest plantation stands, from 0.31 to 5.39 Mg CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ considering the two planting densities in groves, and from 10.72 to 13.65 Mg CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ for coppice stands. In the case of each silvicultural system studied, the maximum valuation observed was 453.00 € ha⁻¹ year⁻¹ for chestnut groves, 1066 € ha⁻¹ year⁻¹ for chestnut stands in high forest, and 1146 € ha⁻¹ year⁻¹ for coppice stands.

Keywords: Silvicultural system; groves; site index; carbon stock; valuation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplos de funções do ecossistema e seus respectivos bens e serviços.	20
Tabela 2: Sequestro médio de CO ₂ e C de algumas espécies da floresta portuguesa incluindo a biomassa acima e abaixo do solo.....	26
Tabela 3: Características geográficas e edafoclimáticas das parcelas instaladas em Bragança.	33
Tabela 4: Manejo de talhadia em cada parcela.....	35
Tabela 5: Caracterização da base de dados correspondente às parcelas de castanheiro de alto fuste selecionadas para este estudo.....	36
Tabela 6: Descrição dendrométrica das parcelas de castanheiro florestal conduzido por talhadia.	37
Tabela 7: Média, desvio padrão, e coeficiente de variação do carbono armazenado nos povoamentos nas 3 classes de qualidade para cada idade.	53
Tabela 8: Média, desvio padrão, e coeficiente de variação do carbono armazenado no povoamento de talhadia para as 4 parcelas de estudo, para cada idade.....	56
Tabela 9: Sequestro médio anual de CO ₂ nas diferentes orientações produtivas, por classe de qualidade, e possível cenário de valoração económica.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo conceptual de tomada de decisão da forma de cultivo do castanheiro para diferentes práticas silviculturais.	17
Figura 2: Estrutura para avaliação e valoração integrada das funções, bens e serviços do ecossistema.	19
Figura 3: Força de ligação entre funções do ecossistema e constituintes do bem-estar humano.	21
Figura 4: Interações entre serviços ecossistêmicos, bem-estar humano e impulsionadores de mudanças.	22
Figura 5: Ciclo global do carbono.	25
Figura 6: Evolução média anual dos preços de licenças de emissões na EU.	30
Figura 7: Mapa de localização das áreas do estudo.	31
Figura 8: Definição das classes de qualidade das parcelas de acordo com as curvas de site index.	48
Figura 9: Biomassa (a) e carbono (b) total do castanheiro florestal e agroflorestal (100 árv. ha ⁻¹) nas 3 classes de qualidade.	50
Figura 10: Biomassa (c) e carbono (d) total do castanheiro florestal e agroflorestal (204 árv. ha ⁻¹) nas 3 classes de qualidade.	51
Figura 11: Biomassa (e) e carbono (f) total do castanheiro florestal em regime de talhadia, nas 4 parcelas do estudo.	54
Figura 12: Estimativas do estoque total de carbono no sistema solo/planta para os diversos sistemas culturais estudados.	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Siglas/Abreviatura	Descrição	Unidade
árv	árvore	
Br	biomassa da raiz	kg
CF	fator de correção	
C	carbono	
CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissão	
CH	Chãos	
CO ₂	dióxido de carbono	
Ctot	carbono total encontrado no solo	Mg ha ⁻¹
CV	coeficiente de variação	%
DAP	diâmetro a altura do peito (1,30m)	cm
ddom	diâmetro dominante	cm
dg	diâmetro da árvore de área basal média (diâmetro quadrático médio)	cm
G	área basal do povoamento	m ² ha ⁻¹
GEE	gases de efeito estuda	
h	altura	m
ha	hectares	
Hdom	altura dominante	m
hg	altura da árvore de área basal média	m
I.SA	Ibero-subatlântica	
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas	
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	
La	Laviados	
Mg	Megagrama	
MN	Montesinho	
MR	Moredo	
N	número de árvores por hectare	árv. ha ⁻¹
Ps	profundidade de solo da amostra	m
R ²	coeficiente de determinação	
SA	subatlântica	
SA.AM	subatlântica atlante-mediterrânea	
SE	sudeste	
SEE	erro padrão da estimativa	
SI	site index (índice de sítio ou índice de qualidade da estação)	
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos	
T	Idade	
V	volume individual das varas	m ³

W _{ha}	biomassa aérea total do povoamento	Mg ha ⁻¹
W _{tot}	biomassa total de uma árvore	kg

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS.....	14
2.1.	Objetivos específicos.....	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1.	O cultivo e a multifuncionalidade das áreas do castanheiro.....	15
3.2.	Os serviços do ecossistema e a relação com o bem-estar humano.....	18
3.3.	Serviços de ecossistema com foco no sequestro de carbono.....	23
3.3.1.	Como as emissões de carbono interferem nas mudanças climáticas 23	
3.3.2.	O sequestro de carbono florestal e seu papel na regulação do clima 24	
3.3.3.	Quantificação do carbono florestal com base na biomassa.....	27
3.3.4.	Valoração do sequestro de carbono.....	29
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1.	Descrição das áreas de estudo.....	31
4.2.	Coleta, tratamento de dados e descrição dendrométrica das áreas.....	36
4.3.	Cálculo dos Índices e definição das classes de qualidade do sítio.....	37
4.4.	Cálculos para estimativa de biomassa e carbono das parcelas.....	39
4.4.1.	Biomassa do castanheiro florestal em regime de alto fuste.....	40
4.4.2.	Biomassa do castanheiro de alto fuste agroflorestal (soutos).....	42
4.4.3.	Biomassa do castanheiro florestal em regime de talhadia.....	43
4.4.4.	Fator de conversão de biomassa em carbono.....	45
4.5.	Carbono no solo.....	45
4.6.	Comparação dos estoques, taxas de sequestro e valoração do CO ₂	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1.	Definição das classes de qualidade do sítio.....	48

5.2. Estimativas de armazenamento de biomassa e de carbono nos plantios florestais (alto fuste) e agroflorestais.....	49
5.3. Estimativas de armazenamento de biomassa e de carbono nos povoamentos florestais conduzidos por talhadia	54
5.4. Carbono total armazenado no sistema (solo e planta)	56
5.5. Sequestro médio anual de CO ₂ e possível cenário de valoração económica	58
6. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas no planeta, potencializadas pela queima de combustíveis fósseis e emissão de gases poluentes, apontam para futuros cenários inseguros de saúde, segurança, subsistência e cultura humana (Barnett, 2003). Medidas urgentes devem ser tomadas para tentar reverter esse quadro e, entre as alternativas que se desenham, apostar em condução de florestas que podem aliar desenvolvimento económico com o sequestro de carbono é uma das que mais se destaca.

O potencial de sequestro de carbono pode variar muito entre florestas diferentes, devido a fatores como as condições edafoclimáticas de cada região e as espécies que ali são conduzidas por melhor se adaptarem, sendo que essas variam muito nos diferentes locais do planeta. No norte de Portugal, uma das espécies mais exploradas historicamente é o castanheiro (*Castanea sativa* Mill.), árvore com importância económica essencialmente para produção de castanha e madeira, que possui uma tradição cultural de grande importância para a população local (Costa et al., 2005).

Além do seu papel económico e cultural, o castanheiro também contribui com serviços do ecossistema, incluindo o sequestro e armazenamento de carbono, mas por ser cultivado em diferentes sistemas silviculturais, as taxas de sequestro acabam por ser diferentes em cada caso. Segundo Monteiro e Patrício (2007), os castanheiros podem ser explorados em sistema florestal para produção de madeira, em regime de alto fuste ou talhadia, e em sistema agroflorestal (soutos) associando produções de curto prazo como a castanha com produções de longo prazo como a madeira no mesmo espaço.

Como o sequestro de carbono está ligado diretamente ao crescimento das árvores (Kiran e Kinnary, 2011), o potencial produtivo de cada área é um fator determinante nas taxas, sendo assim, é plausível que em muitos casos, mesmo com espécies e orientações produtivas similares, os valores de sequestro de carbono variem em função do potencial de crescimento proporcionado pelas classes de qualidade o qual influencia a respetiva produção. As classes de qualidade que definem a produtividade potencial de uma espécie para um determinado povoamento florestal são comumente determinadas através de equações que permitem estimar o chamado índice de qualidade da estação, ou índice de sitio, correspondendo à altura média das árvores dominantes ou codominantes do povoamento para uma idade de referência específica (Patrício, 2006). O índice de qualidade da estação altura-idade pode ser agrupado em classes de qualidade e ser

representado graficamente originando as chamadas curvas de classe de qualidade ou de índice de sítio. Esta metodologia é umas das mais reconhecidas como indicadores de produção silvicultural no mundo (Gopalakrishnan et al., 2019). Assim, conhecer a potencialidade do sequestro de carbono como serviço ecossistêmico nas diferentes possibilidades de implantação e condução da cultura do castanheiro é importante, tendo em vista que além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, essa atividade tem ganhado cada vez mais importância económica. Essa importância advém do facto do comércio global de carbono ter crescido de forma considerável em um curto espaço de tempo nos últimos anos, em consequência dos instrumentos das políticas internacionais de mudanças climáticas (Calel, 2013). Sendo assim, apesar de ainda existir muitas lacunas em relação ao entendimento de como esses mercados funcionam na prática e como as florestas os podem integrar, é fundamental desenvolver investigação científica nesta matéria com vista a obter/melhorar as estimativas do potencial de sequestro de carbono de diferentes espécies e condições de crescimento, avaliando possíveis cenários de valorização económico dessas atividades, fazendo com que os gestores florestais se sintam atraídos a agregar esse tipo de renda na silvicultura. Nessa perspectiva desenvolveu-se o presente trabalho.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi avaliar e comparar o potencial de sequestro e armazenamento de carbono, assim como a possível valoração desse serviço ecossistêmico, em plantações jovens de castanheiro (*C. sativa*) em sistema agroflorestal (soutos) e em sistema florestal (alto fuste e talhadia), em diferentes classes de qualidade (baixa, média e superior) e, no caso da talhadia, diversas formas de manejo silvícola para diferentes objetivos de produção.

2.1. Objetivos específicos

- Quantificar o carbono armazenado na biomassa para plantações de castanheiro florestal conduzido em alto fuste não enxertado (castinçal) e para plantações com castanheiro enxertado para produção de castanha em soutos agroflorestais em duas densidades de plantação (7mx7m e 10mx10m);
- Verificar a influência da classe de qualidade no sequestro e armazenamento de carbono;
- Estimar o carbono armazenado na biomassa para a talhadia de castanheiro com diferentes objetivos de produção e consequente manejo silvícola;
- Quantificar o carbono armazenado no solo nos diferentes sistemas/regimes de condução;
- Comparar as taxas de sequestro médio anual de carbono em todos os sistemas/regimes de condução estudados e analisar possíveis cenários de valoração econômica do serviço ecossistêmico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O cultivo e a multifuncionalidade das áreas do castanheiro

Conhecido popularmente como castanheiro, a espécie *Castanea sativa* Mill., pertencente à família Fagaceae, é uma árvore de grande longevidade que pode atingir centenas de anos, é caracterizada por ser de grande porte e muito utilizada para a produção de madeira e de frutos (Pelayo; Serrano, 2020). Esta espécie é muito importante na Europa Mediterrânea e, principalmente em Portugal, onde o seu cultivo sempre impactou além da economia, na tradição, história, cultura, e no conhecimento de práticas agrícolas e culturais (Jesus e Carvalho, 2018).

De acordo com Couto (2018), a espécie tem grande representatividade na região de Trás-os-Montes, situada no norte do país, mais especificamente nos distritos de Bragança e Vila Real, onde muitas áreas agrícolas têm sido transformadas em plantações de castanheiro. Segundo o 6º Inventário Florestal Nacional, em 2015 a espécie ocupava 48,3 mil hectares em Portugal Continental, destes 43,6 mil localizam-se na região norte (ICNF, 2015).

Quanto ao seu cultivo o castanheiro tem dupla vocação para fruto e para madeira. Assim, existem povoamentos orientados para produção de madeira, um sistema florestal conhecido como castinçal (castanheiro bravo, ou seja, não enxertado), onde pode ser cultivado tanto no regime de alto fuste como no de talhadia e, os povoamentos orientados para produção de castanha, podendo-se também explorar a madeira no final do ciclo produtivo; este sistema de cultivo agroflorestal é conhecido como souto (Monteiro e Patrício, 2007).

O alto fuste é um sistema silvicultural de origem seminal ou clonal, mas que consiste sempre no plantio da muda, e costuma ser usado para produzir árvores de maiores diâmetros, exploradas em rotações mais longas. Já a talhadia, é a técnica de conduzir as brotações que a árvore apresenta após o corte, ou por meio de algum outro estímulo como ação do fogo ou dano físico; com esse sistema é possível obter novos povoamentos sem a necessidade de replantar a área, evitando atividades como preparo de solo, e plantio de novas mudas, processo que pode ser favorável em termos de custo e eficiência. Por outro lado, a talhadia é destinada para a produção de madeira de pequenas e médias dimensões, podendo produzir de uma a três, ou em alguns casos até mais varas por touça ou cepo (Monteiro e Patrício, 2007).

Ainda de acordo com Monteiro e Patricio (2007), no caso do castanheiro florestal, é possível produzir madeira de qualidade para diversas finalidades, desde que sejam aplicadas boas técnicas de silvicultura, como cortes de formação, desbastes e desramas, para a formação de árvores com troncos retos, cilíndricos, de boas dimensões e sem defeitos numa extensão de 4-6m de fuste, que possuem um bom potencial de rentabilidade.

A idade de revolução para produzir madeira não deve ultrapassar muito o limiar de 50 anos, pois a partir de então nota-se uma perda progressiva da qualidade, sobretudo em locais que tiveram falta de condução ideal, ou nem sequer foram conduzidos, devido às podridões do tronco que ocorrem sobretudo nas proximidades de feridas, ramos secos ou corte de ramos de grandes dimensões (Patricio,2006). Ainda de acordo com a autora, que adaptou um modelo silvicultural do trabalho de Bourgeois et al. (2004), as densidades iniciais de plantio podem partir de 1250 árvores por hectare, passando por vários regimes de desbastes, chegando a 150 a 180 árvores por hectare entre os 40 e 45 anos.

Historicamente o castanheiro sempre foi a espécie arbórea frutícola mais importante de Portugal, e por muitos anos até a chegada do milho e da batata, a castanha foi a principal fonte de hidratos de carbono da população em vastas regiões do país (Pereira e Abreu,1987). Aliado a isso, Pereira et al. (1992) afirma que Portugal possui um clima favorável para a produção de fruto de qualidade, o que justifica a exploração agroflorestal de terras portuguesas com soutos para castanha.

Diferentemente do castanheiro florestal, segundo Pereira-Lorenzo e Fernandez-Lopez (1997), o espaçamento de plantio para soutos florestais costuma ser de 10 x 10 metros na instalação da área, o que configura uma densidade de 100 árvores por hectare. Mas de acordo com Diegues (2020), apesar dessa densidade de plantio tradicional, encontramos soutos que variam de 277 até 70 árvores por hectare com espaçamentos de plantio de 6m x 6m, a 12m x 12m, respectivamente.

Para um maior entendimento silvicultural do castanheiro, a Figura 1 adaptada de Clarke et al. (2023), apresenta um modelo conceptual para as práticas de silvicultura para dois objetivos de gestão silvícola (produção de madeira e proteção do local), considerando duas possibilidades de qualidade produtiva (ótima ou marginal), e susceptibilidade à doença do cancro do castanheiro provocado pelo fungo *Cryphonetria parasitica* (plantas resistentes ou susceptíveis), para com base nessas informações escolher a melhor forma de cultivo.

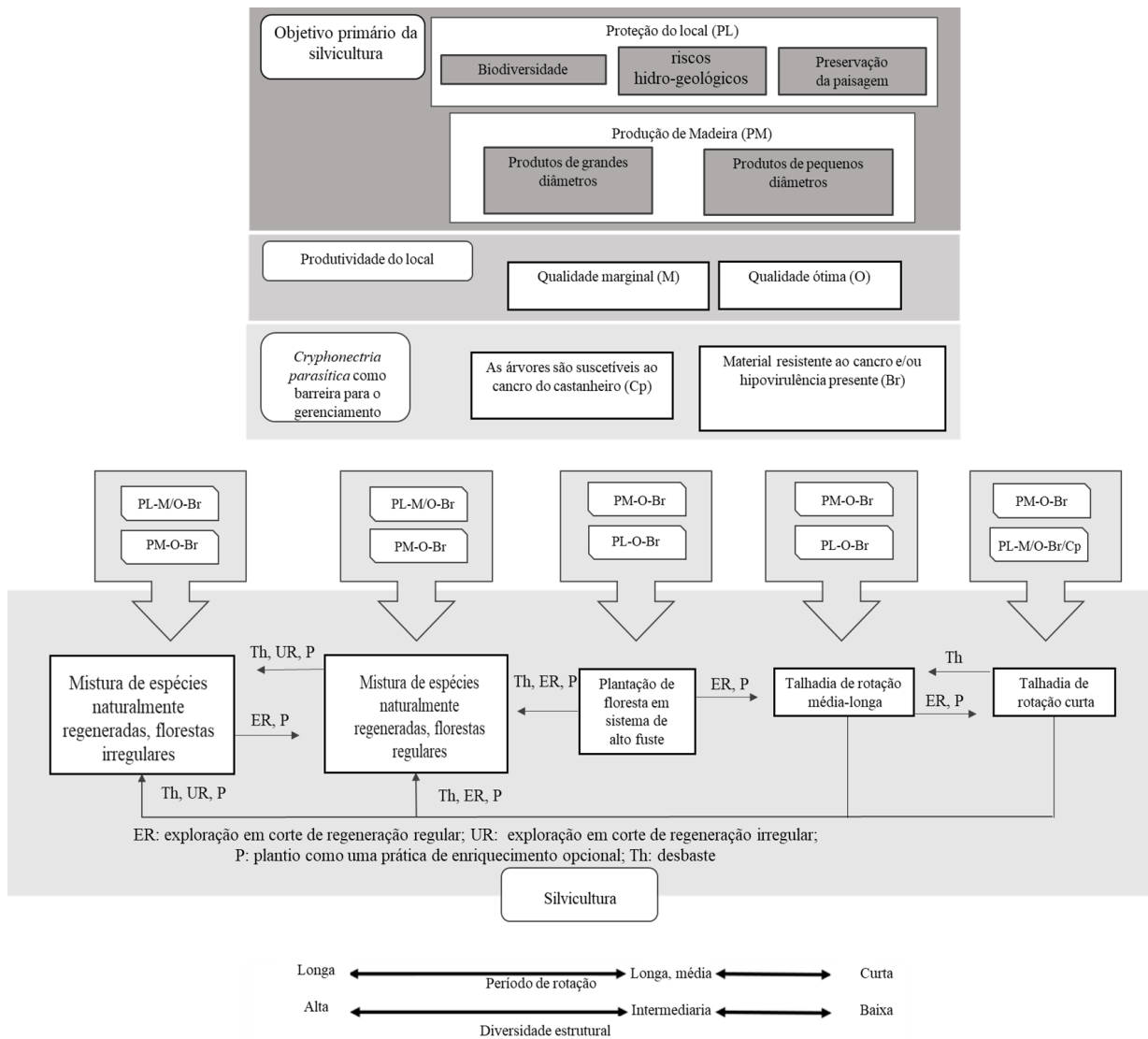


Figura 1: Modelo conceitual de tomada de decisão da forma de cultivo do castanheiro para diferentes práticas silviculturais.

Fonte: Adaptado de Clark al. (2023)

É importante ressaltar que, do início da exploração da cultura até o momento, diversas motivações têm implicado em uma intensificação de estudos e utilização de novas práticas culturais, buscando principalmente aumentar a produtividade das áreas de castanheiro (Raimundo et al., 2004). Entretanto Amorini et al. (2000) afirmam que apesar de se buscar cada vez mais a alta produtividade, é impossível ignorar que a gestão sustentável dos recursos naturais é um grande desafio para os dias atuais, sendo que as florestas são bens indispensáveis e cruciais para garantir a continuidade da vida terrestre, o que demonstra a necessidade e grande destaque para uma gestão multifuncional dessas áreas.

Na linha de estudos acerca da multifuncionalidade da floresta, Gavaland e Pelletier (2006) veem nos castanheiros potencial para esse tipo de gestão, pois segundo os autores o cultivo desta espécie pode ser realizada com situações favoráveis à sustentabilidade, além disso, destacam que a cultura ainda gera emprego e renda em zonas onde o êxodo rural foi e ainda é forte, fazendo com que alguma população ainda permaneça nessas áreas, ressaltando a importância de manter o cultivo do castanheiro que está muito ligado à tradição e ao património local.

Para Conedera et al. (2000), a multifuncionalidade das áreas do castanheiro pode ser explorada através do uso da paisagem, turismo, recreação, para a produção de castanha, madeira, e outros produtos complementares. De acordo com Rocez-Diaz et al. (2018), a multifuncionalidade também deve ser observada do ponto de vista dos serviços ecossistêmicos, que relacionam a biodiversidade com o funcionamento e bem-estar humano.

Algumas dessas situações já são vistas no dia de hoje, Martins et al. (2010), afirmam que algumas práticas tradicionais de gestão intensiva do castanheiro para fruto no Norte de Portugal não têm efeito positivo na relação solo-planta-água e na produtividade da cultura, enquanto alguns sistemas novos, com manutenção de cobertura herbácea no solo, têm vindo a ser adotados, tendo por objetivo um uso multifuncional da terra, conciliando a produção de castanha, pastagem e cogumelos, além de outros serviços ecossistêmicos.

3.2. Os serviços do ecossistema e a relação com o bem-estar humano

De acordo com De Groot et al. (2002), as primeiras discussões sobre os serviços do ecossistema começaram a surgir a partir da década de 1960, em trabalhos de King (1966), Helliwell (1969), Huetting (1970), e Odum (1972). Apesar de o tema começar a ser debatido nessa época, Haines-Young e Potschin (2010) afirmam que o bem-estar humano sempre dependeu do funcionamento dos ecossistemas, seja para fornecimento de materiais essenciais no dia a dia, como bens alimentares, ou através de benefícios como a regulação do ambiente ou a proteção da água.

Um conceito definido por Daily (1997), indica que os serviços dos ecossistemas são processos desenvolvidos pelo ecossistema e espécies que o compõem, que sustentam a vida humana; esse conceito é muito difundido por ecologistas, que defendem o valor desses serviços para o bem-estar das populações.

Já para De Groot et al. (2002), a definição de serviços do ecossistema só é possível a partir da tradução da complexidade ecológica das estruturas e processos de um ecossistema em funções que forneçam bens e serviços possíveis de valorização pelas pessoas (Figura 2).

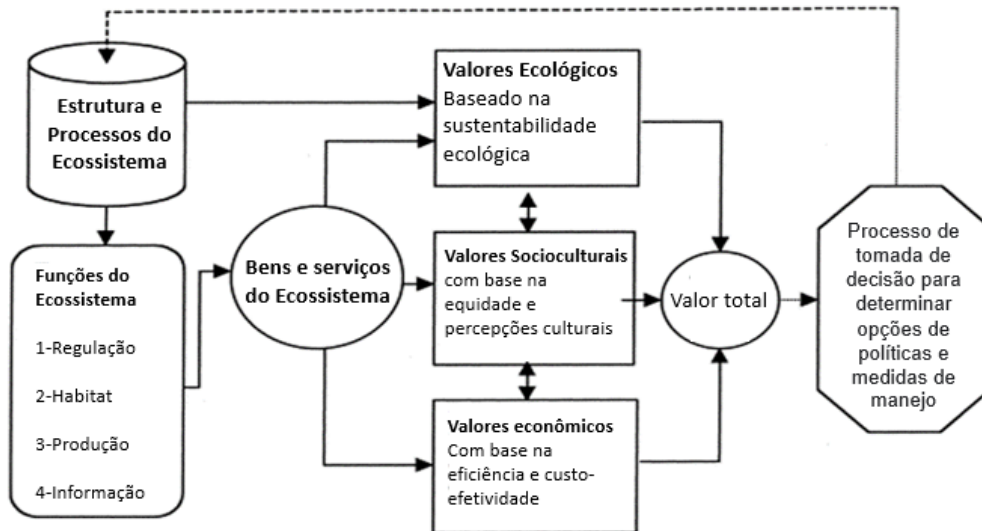


Figura 2: Estrutura para avaliação e valorização integrada das funções, bens e serviços do ecossistema.

Fonte: Adaptado de De Groot et al. (2002)

Ainda sobre as funções do ecossistema, De Groot et al. (2002) agruparam as diversas funções em quatro grupos primários, sendo os dois primeiros definidos como *funções de regulação e habitat*, que por serem essenciais para a manutenção dos processos e componentes naturais acabam sendo condicionais para a disponibilidade dos outros dois grupos, o de *produção e informação*. Porém, pelo facto de todos os grupos serem essenciais à vida humana, não é necessário levar em conta uma hierarquia obrigatória entre os grupos.

Cada um desses grupos de funções primárias abrange várias outras funções e processos que geram o que chamamos de serviços ou bens do ecossistema, conforme alguns exemplos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Exemplos de funções do ecossistema e seus respectivos bens e serviços.

Funções do ecossistema	Serviços e bens	
Regulação	Regulação do clima	Sequestro do carbono
	Regulação da água	Drenagem e irrigação natural
	Polinização	Polinização de culturas
	Formação dos solos	Manutenção natural de produtividade dos solos
	Retenção dos solos	Prevenção da erosão
Habitat (suporte)	Função de refúgio	Manutenção da diversidade biológica e genética (e, portanto, a base para a maioria das outras funções)
	Função de berçário	
Produção	Comida	Conversão de energia solar em plantas e animais comestíveis
	Matéria prima	Madeira, algodão, celulose etc.
	Recursos genéticos e medicinais	Produção de fármacos através de materiais genéticos encontrados em plantas
Informação	Recreação	Viagens em ecossistemas e paisagens naturais
	Informações culturais e artísticas	Usar a natureza como inspiração para livros, filmes, folclore etc.
	Informações espirituais e históricas	Uso da natureza para fins religiosos ou históricos
	Ciência e educação	Uso da natureza para pesquisas científicas, excursões escolares etc.

Fonte: Adaptado de De Groot et al. (2002)

No relatório Millennium Ecosystem Assessment (2005), os autores apontam uma definição similar ao autor supracitado das funções do ecossistema, porém ainda relacionam as funções e serviços do ecossistema com os constituintes do bem-estar humano, classificando-os de acordo com seu potencial de mediação por fatores socioeconômicos e, pela intensidade das ligações entre o serviço do ecossistema e o bem-estar, conforme ilustra a Figura 3.

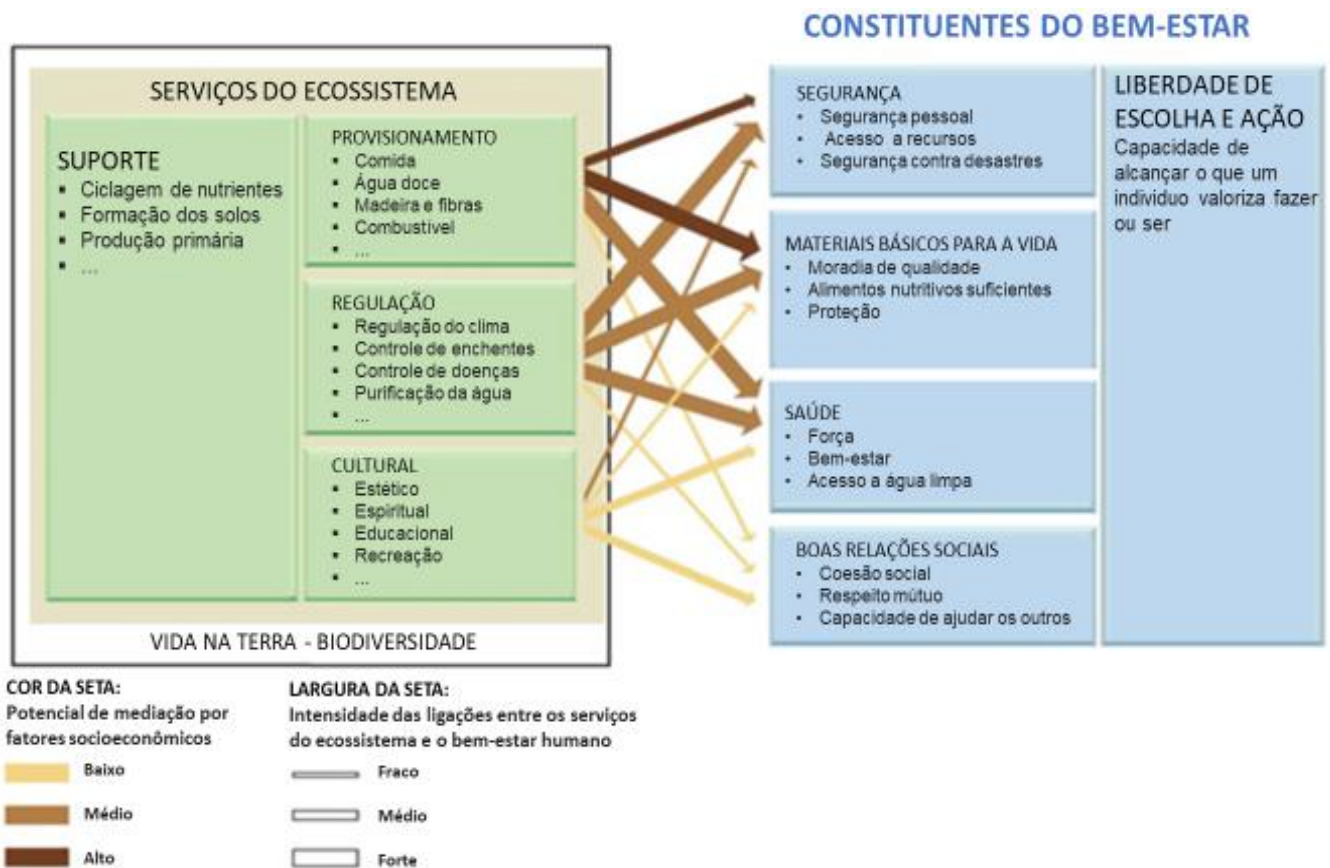


Figura 3: Força de ligação entre funções do ecossistema e constituintes do bem-estar humano.

Fonte: Adaptado de Millennium Ecosystem Assessment (2005)

No esquema representado na figura acima, pode-se notar diferentes níveis (fraco, médio e forte) de ligação entre um serviço do ecossistema e as condições de bem-estar humano, além de diferentes classificações se referindo até que ponto é possível que fatores socioeconômicos possam fazer uma mediação entre as ligações (baixo, médio e alto), ou seja, se existe potencial para obter um substituto para algum serviço ecossistêmico degradado.

Como exemplo disso, sabe-se que a necessidade de alimentos nutritivos é alta para o bem-estar humano, e que ecossistemas equilibrados conseguem produzi-los, no entanto os autores indicam que em alguns casos existe um alto potencial de mediação socioeconômica caso esse serviço esteja degradado (seta que indica forte conexão e alto potencial de mediação socioeconômica). Sob outro aspecto, observou-se que para outro constituinte do bem-estar humano, nomeadamente as boas relações sociais, os autores consideram uma ligação média com os serviços culturais do ecossistema, como por

exemplo a disponibilidade de locais de paisagem e de recreação, mas mencionam um potencial baixo de mediação por fatores socioeconômicos.

Outro ponto que o relatório leva em consideração para discutir a ligação das relações humanas com os ecossistemas, é que uma mudança que primeiramente afetaria indiretamente a biodiversidade (como a demografia e o estilo de vida), pode ocasionar mudanças que alterem diretamente essa biodiversidade, e posteriormente prejudicar o bem-estar humano. Exemplo disso é a aplicação de fertilizantes nas culturas, ou a necessidade de irrigação das mesmas, como podemos notar no esquema da Figura 4.

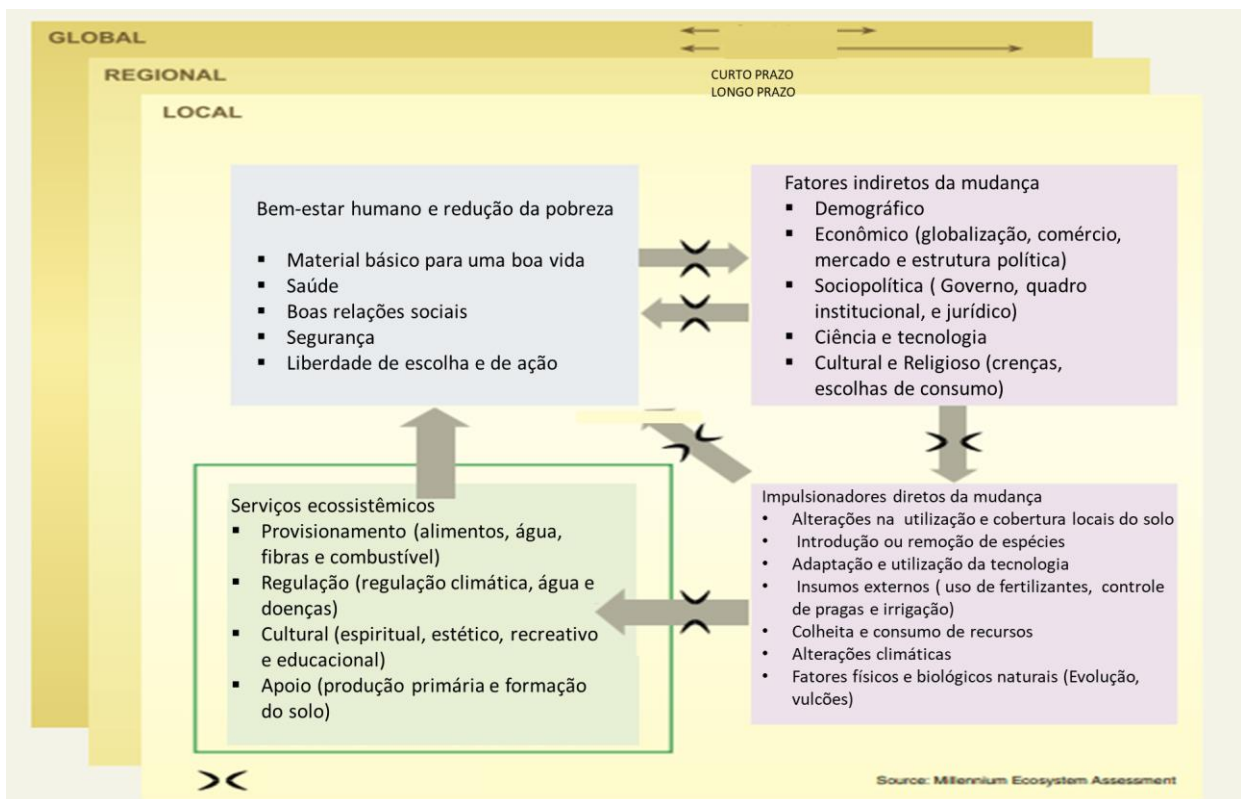


Figura 4: Interações entre serviços ecossistêmicos, bem-estar humano e impulsores de mudanças.

Fonte: Adaptado de Millennium Ecosystem Assessment (2005)

Além disso, o esquema ainda faz menção às escalas locais, regionais e globais, em que os autores citam que as interações podem ocorrer dentro de uma mesma escala, ou se cruzar em escalas diferentes. Como exemplo disso, pode-se pensar que existe uma procura internacional de madeira que pode causar uma perda regional de cobertura florestal, aumentando a magnitude de inundação ao longo de uma área determinada de

um rio local, afetando as três escalas, além de poder ocorrer em diferentes escalas de tempo.

É muito importante ressaltar que a maioria das discussões e avaliações dos serviços do ecossistema foi voltada aos benefícios do mesmo para os humanos, descrevendo como a natureza fornece serviços e bens e como é possível transformar isso em mercado (Raymond, et al. 2013). Foi enfatizando essas diversas maneiras em que a natureza sustenta o cotidiano humano, que as abordagens tradicionais que separavam as pessoas da natureza vêm sendo substituídas, tendo em vista que concentrar esforços para conservar um pequeno número de lugares ou espécies está longe de ser suficiente, o caminho é interligar as medidas de conservação da natureza com o dia a dia humano em todo o planeta (Armsworth et al., 2007).

3.3. Serviços de ecossistema com foco no sequestro de carbono

Tendo em vista que o foco deste trabalho está na avaliação, comparação e valoração do sequestro e estoque de carbono do castanheiro em diferentes sistemas silviculturais, nas próximas seções serão abordados temas relativos ao sequestro e estoque de carbono nas florestas, sua importância na regulação do clima, e a sua valoração com base nos valores do Comércio Europeu de Licença de Emissões (CELE).

3.3.1. Como as emissões de carbono interferem nas mudanças climáticas

O aquecimento global e as mudanças climáticas associadas são previsíveis. Elas são potenciadas pela queima de combustíveis fósseis que libertam grandes quantidades de dióxido de carbono ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) para a atmosfera, causador do chamado efeito de estufa, esperando-se uma subida de 2 a 5° C na temperatura média terrestre nas próximas décadas (El-Sayed e Kamel, 2020).

O efeito de “estufa” é ocasionado pelo vapor de água, dióxido de carbono e metano, entre outros gases presentes na atmosfera, os quais absorvem a radiação infravermelha emitida, resultando no aumento da temperatura. Apesar de não ser o único responsável, o CO_2 é apontado como o principal potencializador desse fenômeno (IPCC, 2007). Como resultado disso, a Terra apresentará mudanças climáticas marcantes caracterizadas por eventos climáticos mais extremos nas próximas décadas caso o aumento nas temperaturas continue. Entre os principais riscos para o planeta estão a perda

de biodiversidade, aumento das secas, insegurança alimentar, aumento no número de incêndios e de ondas de calor extremo, aumentos nos níveis do mar, inundações, e declínio nos recifes de corais (IPCC, 2022).

As emissões de CO₂ oriundas dos processos industriais e da queima de combustíveis fósseis têm vindo a aumentar em todo o mundo há algum tempo, sendo que entre os anos 1990 e 1999 o aumento médio era de 1,1% ao ano, tendo passado entre 2000 e 2004 para cerca de 3% ao ano (Raupach et al., 2007). Estudos mais atuais já mostram que a média entre 2000 e 2010 ficou próxima aos 3% ao ano, mas na década seguinte, entre 2010 e 2020, caiu para 1,2% ao ano (Friedlingstein et al., 2020).

Segundo Detwiler (1986), outro fator que contribui substancialmente para as emissões de CO₂ é a mudança no uso dos solos. Assim, os milhões de hectares de floresta desmatadas no mundo tendo por fim aproveitar as áreas para agricultura, pastagem, e extração de madeira, libertam para a atmosfera toneladas de CO₂ que ali estão presentes nos solos ou na vegetação.

Nesse contexto, a preocupação mundial com as mudanças climáticas aumentou muito nas últimas décadas, tendo vindo a ser implementados grandes esforços para reverter a situação. O Protocolo de Quioto em 1997, foi o primeiro grande tratado jurídico internacional que objetivou diminuir as emissões de gases poluentes, e procurar outras formas para mitigar os efeitos das emissões (Böhringer, 2003). Desde então, os países mais desenvolvidos do mundo firmaram compromissos obrigatórios de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa (Babiker, et al., 2000). Apesar de ser indiscutível a importância de diminuir as emissões, também se sabe que essa medida está longe de ser a única necessária. Hutchinson et al. (2007) consideram o sequestro de carbono e o seu armazenamento nos solos, oceanos e plantas, constitui uma das principais opções de mitigação de gases de efeito estufa.

3.3.2. O sequestro de carbono florestal e seu papel na regulação do clima

Para conceituar o sequestro de carbono, antes é necessário discutir brevemente o ciclo do carbono terrestre, e para auxiliar nessa discussão vale a pena visualizar a representação do ciclo global do carbono, presente na Figura 5.

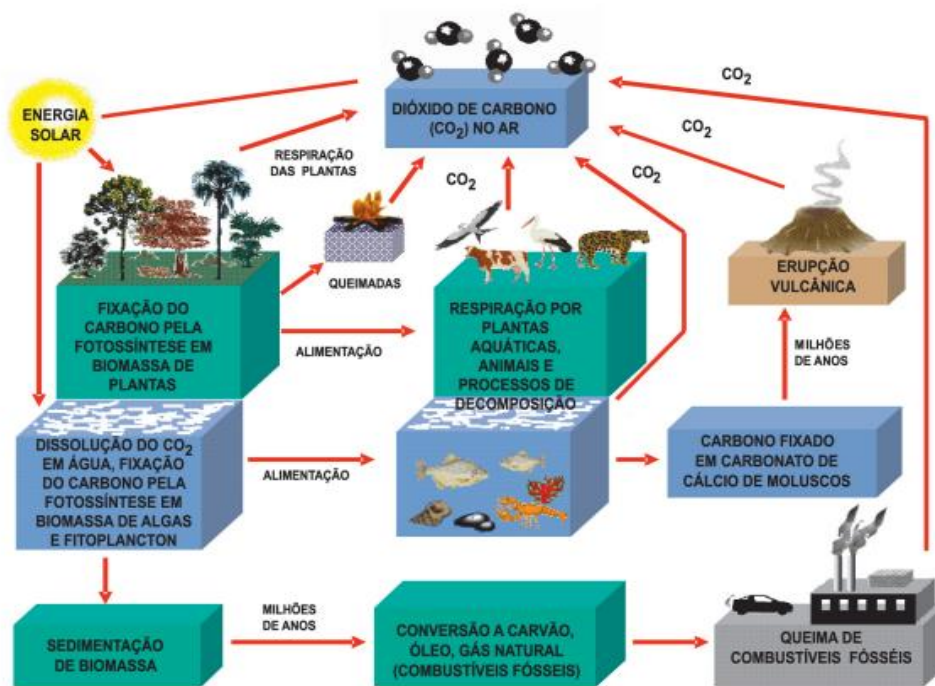


Figura 2: Ciclo global do Carbono.

Figura 5: Ciclo global do carbono.

Fonte: Martins et al. (2003).

Conforme apresentado na Figura 5, de Martins et al. (2003), os meios de liberação de dióxido de carbono na atmosfera são muitos passando pela respiração das plantas, queimadas, processos de decomposição, erupções vulcânicas, queima de combustíveis, etc. Contudo, as formas de absorção e fixação do CO₂ resume-se à sua dissolução nos oceanos ou absorção através do processo de fotossíntese das plantas, armazenando-o sob a forma de biomassa, nelas mesmas ou no solo, fenômeno esse que recebe o nome de sequestro de carbono.

Quando se fala de sequestro de carbono pelas florestas é sempre importante ter o entendimento que o processo é um serviço do ecossistema, atuando sob o requisito de ser regulador do clima, devido à capacidade de retirar um gás poluente do ar, e é passível de quantificação e valoração, comumente através de uma taxa líquida anual de sequestro (Liu et al., 2018). Sobre o potencial de sequestro de carbono das florestas, é preciso ter em vista que este pode variar muito devido à diversas condições, como grupo de árvores (coníferas ou folhosas), espécies, densidade da madeira, técnicas de manejo, sistemas silviculturais, idade, condições edafoclimáticas, entre outros fatores (Jandl et al., 2007).

Para a floresta portuguesa existem alguns estudos que estimam taxas médias de sequestro/armazenamento de carbono com indicação da idade de referência, em alguns casos, bem como a respetiva fonte (Tabela 2).

Tabela 2: Sequestro médio de CO₂ e C de algumas espécies da floresta portuguesa incluindo a biomassa acima e abaixo do solo.

Espécies	Sequestro/armazenamento médio (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)		Fonte:
	CO ₂	C	
Eucalipto	15-31	4,1 - 8,7	Pereira et al. (2009)
Carvalho Negral	5	1,45	Pereira et al. (2009)
Montado	1,0 - 5,0	0,3 - 1,36	Pereira et al. (2009)
Pinheiro-bravo	15-26	4,1 - 7,1	Pereira et al. (2009)
Castanheiro	≈ 14 (28 anos)	≈ 3,93 (28 anos)	Nunes et al. (2014)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	≈ 13 (28 anos)	≈ 3,49 (28 anos)	Nunes et al. (2014)

Com base nas tabelas de produção para o castanheiro florestal de alto fuste (Patrício et al., 2005; Patrício, 2006), é possível estimar valores de armazenamento médio de C na parte aérea da ordem dos 2,5 a 2,7 t C ha⁻¹, aos 30 anos, para produção de madeira de qualidade (aplicação do modelo silvícola de Bourgeois et al. (2004)) na classe de qualidade 26 m de altura dominante à idade de referência de 45 anos. É de referir que este tipo de silvicultura conduz a uma perda de volume por hectare em detrimento do crescimento e qualidade individual (Patrício, 2006; Patrício e Nunes, 2017).

Quando se fala em estoque e sequestro de carbono, é necessário entender que existe uma diferenciação entre o carbono orgânico total armazenado na biomassa ou nos solos e a quantidade de dióxido de carbono, um dos gases de efeito estufa (GEE), retirado da atmosfera. Isso se explica pelo facto de que, cada molécula ou tonelada de C armazenada nas plantas ou no solo, implicar a remoção de 3,67 moléculas ou toneladas de CO₂ da atmosfera, podendo-se fazer essa conversão entre o que existe armazenado no sistema e o que foi sequestrado (Fernandes et al., 2008).

As áreas de castanheiro, independentemente da sua principal orientação produtiva (fruto ou madeira) são elementos chave da paisagem e providenciam importantes serviços do ecossistema (Menéndez-Miguélez et al., 2023) desempenhando essencialmente quatro funções fundamentais: económicas, sociais, ecológicas e culturais nas regiões onde se inserem (Patrício et al., 2020). Contudo, o papel das plantações jovens de castanheiro

como sumidouros de carbono tem sido ignorado (Menéndez-Miguélez et al., 2023) principalmente no que diz respeito à produção de fruto.

Estudos recentes indicam que o sequestro médio de carbono em povoamentos jovens de alto fuste orientados para madeira pode atingir $11,12 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2 ($3,03 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1} \text{ C}$) enquanto que em povoamentos jovens de alto fuste orientados para produção de castanha pode chegar a $4,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2 ($1,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1} \text{ C}$), considerando a biomassa total das árvores (aérea e abaixo do solo), em que a biomassa da raiz corresponde a cerca de 25% da biomassa aérea (Menéndez-Miguélez et al., 2023).

No que se refere ao castanheiro florestal com condução por talhadia, Prada et al. (2016) testaram diferentes alternativas de silvicultura baseadas no número de desbastes aplicados tendo constatado que os mesmos alteram o carbono total do sistema. Assim, nos casos em que o manejo florestal foi mais intenso, com a aplicação de mais de um desbaste, houve perda de até 12% do total C sequestrado comparado com a linha de base (situação inicial da talhadia sem intervenção silvícola) que apresentou uma média de $20,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1} \text{ CO}_2$ ($5,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1} \text{ C}$) aos 40 anos de idade, considerando o sistema solo/planta. Com base nestes resultados os autores recomendam que quando o objetivo da silvicultura seja a maximização do sequestro de carbono os gestores devem procurar reduzir o número de desbastes aplicados.

Para que os gestores e produtores florestais optem efetivamente por uma gestão multifuncional das áreas do castanheiro, incluindo as atividades de sequestro de carbono, é necessário incluir os serviços do ecossistema relativos às suas funções em sistemas de preços e relações de mercado para a sua valorização, o que já vem acontecendo atualmente (Gómez-Baggethun e Ruiz-Pérez, 2011).

3.3.3. Quantificação do carbono florestal com base na biomassa

Metodologias eficientes de quantificação de carbono são importantes e cruciais, tanto para que se possa ter um entendimento real do balanço global de carbono (Kirschbaum et al., 2019), como para criar e utilizar mecanismos de certificação que gerem os pagamentos pela remoção do poluente da atmosfera (Arcusa e Sprenkle-Hyppolite, 2022).

Contudo, é importante referir que monitorizar o armazenamento de carbono é um processo lento e caro. Por outro lado, ter estimativas precisas ainda constitui um desafio

na medida em que as florestas são uma estrutura complexa e que as diferentes espécies e situações geográficas únicas podem conferir muita diferença à capacidade de sequestro de carbono em diferentes áreas (Omasa et al., 2003).

Os métodos de abordagem para avaliação de sequestro de carbono, geralmente são divididos em três categorias: I) medição de reservatórios ou fluxo de carbono, através de dados biométricos da parcela; II) monitoramento contínuo do carbono em todo o ecossistema através do balanço fornecido por torres micro meteorológicas; III) através de imagens e ferramentas de sensoriamento remoto (Bradford, 2010).

Para boas estimativas de sequestro de carbono dos ecossistemas é de extrema relevância que ocorra a quantificação da biomassa acima e abaixo do solo, assim como a decomposição da matéria orgânica e o carbono no solo (IPCC, 2003). Se considerarmos que ainda existem muitas limitações no que diz respeito à medição da biomassa através de sensoriamento remoto, embora já seja possível realizar algumas estimativas através do índice de área foliar, as medições de campo para inventário de biomassa ainda se mostram imprescindíveis (Le Toan, 2011).

A biomassa é o termo dado à massa de matéria de origem biológica, vegetal ou animal; quando se trata de biomassa florestal, esta refere-se a toda biomassa existente nas florestas, ou na sua fração arbórea (Sanquetta, 2002). As estimativas da biomassa aérea podem ser obtidas com base em medições dendrométricas como o diâmetro e a altura em parcelas de amostragem ou senso, no decurso de inventários florestais, sendo posteriormente aplicadas equações para o cálculo de biomassa na parcela (caso estejam disponíveis) e, de acordo com a densidade das mesmas, estimam-se os respectivos valores por hectare (Higa et al., 2014).

Ao nível do povoamento, principalmente em grandes áreas de manejo, os métodos de amostragem e aumento de escala com recurso a fatores de expansão de biomassa são muito utilizados (Menéndez-Miguélez et al., 2023).

A estimativa da biomassa das raízes, tal como para a parte aérea, pode ser efetuada com base nos métodos diretos, voltados para a escavação e retirada das raízes para posterior medição e pesagem, e indiretos, que através de equações estimam a biomassa das raízes geralmente relacionando-a com os valores encontrados na parte aérea da planta (Addo-Danso et al., 2016).

Uma vez estimada a biomassa é necessário convertê-la em carbono ou CO₂ sequestrado. Para tal podemos considerar a taxa média de carbono na biomassa cerca de 50% (fator de conversão 0,5), prática bastante generalizada na literatura por muitos

autores (e.g. Petrokofsky et al., (2012), Patrício e Nunes, (2017), Patrício et al., (2020)) ou especificamente utilizar uma taxa específica por espécie. Para o castanheiro, segundo as análises laboratoriais realizadas por Patrício (2006), a concentração de C na madeira é de 48,4 %, 52,1% para os ramos ≤ 1 cm, 53,0% para a casca e 50,6% para as folhas. O fator de 48,4% é igualmente o valor indicado por Montero et al. (2005) para conversão da biomassa em carbono para o castanheiro.

3.3.4. Valoração do sequestro de carbono

Já faz algum tempo que relatórios e conferências vêm depositando grande esperança na avaliação e valoração económica dos serviços do ecossistema para contornar a sua degradação e da biodiversidade, uma vez que essa valoração constitui um potencial recurso governamental que pode mudar escolhas humanas individuais e coletivas na forma como lidamos com a biodiversidade (Laurans et al., 2013).

Segundo Kazak et al. (2016), um dos principais serviços do ecossistema passíveis de valoração é o sequestro de carbono, cuja valoração se pode basear, por exemplo, nas negociações de direitos de emissão de CO₂ e, desta forma, poder ser comercializado agregando renda às propriedades florestais.

As limitações colocadas ao direito de emitir gases poluentes para a atmosfera está na base do chamado mercado de emissões onde são negociadas licenças para a emissão de gases com efeito de estufa que são nocivos para o ambiente. Pelo facto de os sistemas de comércio de carbono criarem mercado para compensar estas emissões, vendendo para as indústrias licenças para emitir os gases, então o preço destas licenças pode servir como base para valorar o CO₂ sequestrado por determinada atividade florestal (Heal, 2000).

Na Europa, por exemplo, existe um mercado de licenças de emissão aprovado pela União Europeia, que foi implementado em 2005 e é chamado de Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), sendo esse um sistema que possibilita comprar licenças de acordo com a necessidade de emissão do comprador, onde cada licença significa na prática a permissão para emitir uma tonelada de CO₂ para a atmosfera (Vale, 2014).

Analisando o histórico dos valores médios anuais no mercado do CELE (Figura 6), pode-se analisar que dos primórdios do sistema em 2008 até 2020, os preços não apresentaram grandes variações, sendo que o valor mínimo foi de 4,46 € por licença

(tonelada de CO₂) no ano de 2013. A partir do ano de 2020 o valor das licenças teve um crescimento brusco e atualmente encontra-se por volta de 90 € (SendeCO₂, 2023).

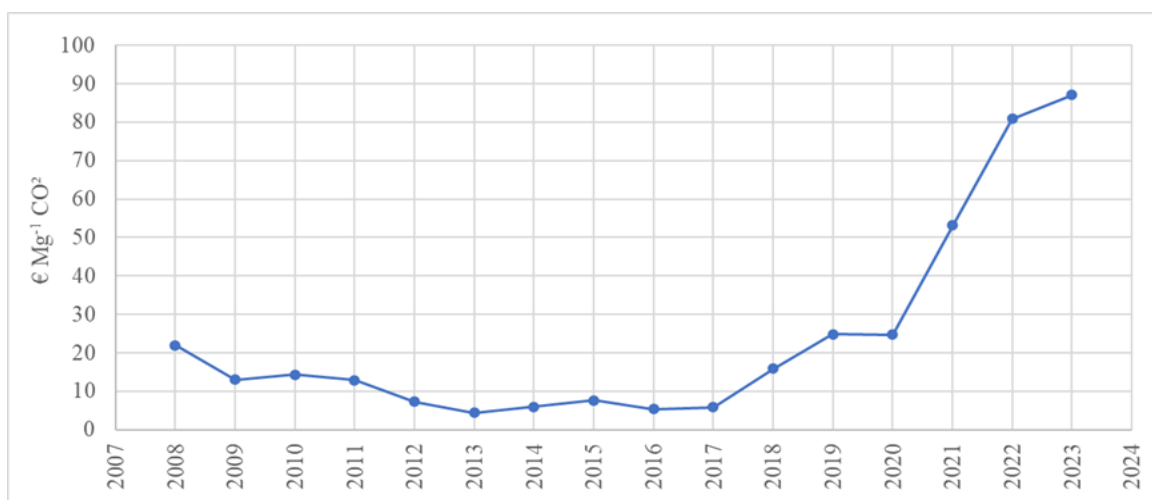


Figura 6: Evolução média anual dos preços de licenças de emissões na EU.

Fonte: Elaboração própria com dados obtidos em SendeCO₂ (2023).

Esta tendência de aumento de valores nos últimos anos deve-se à grande necessidade de redução das emissões, que é uma das principais metas da Lei Europeia do Clima, o que consequentemente leva à necessidade de um mercado de carbono mais estável e funcional, que pode servir de inspiração para produtores florestais começarem a procurar cada vez mais esses mercados adaptando-se à realidade dos mesmos e, buscando, inclusive, alternativas de manejo e produção florestal voltada para um maior sequestro de carbono (Pache, 2020).

Para além do chamado mercado regulado, existe também o mercado voluntário de carbono o qual pode constituir uma oportunidade para as florestas na medida em que este mercado é usado pelas empresas/organizações como um meio para valorizarem a sua imagem reputacional, sobretudo desde que passaram a prometer objetivos de neutralidade carbónica.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição das áreas de estudo

Os dados utilizados nesse estudo provêm de povoamentos jovens de castanheiro conduzidos em alto fuste e talhadia localizados nos concelhos de Bragança, Vila Flor, e Vila Pouca de Aguiar, região norte de Portugal (Figura 7). Em cada um desses locais, foram instaladas parcelas de amostragem permanentes que serão detalhadas nos tópicos a seguir.

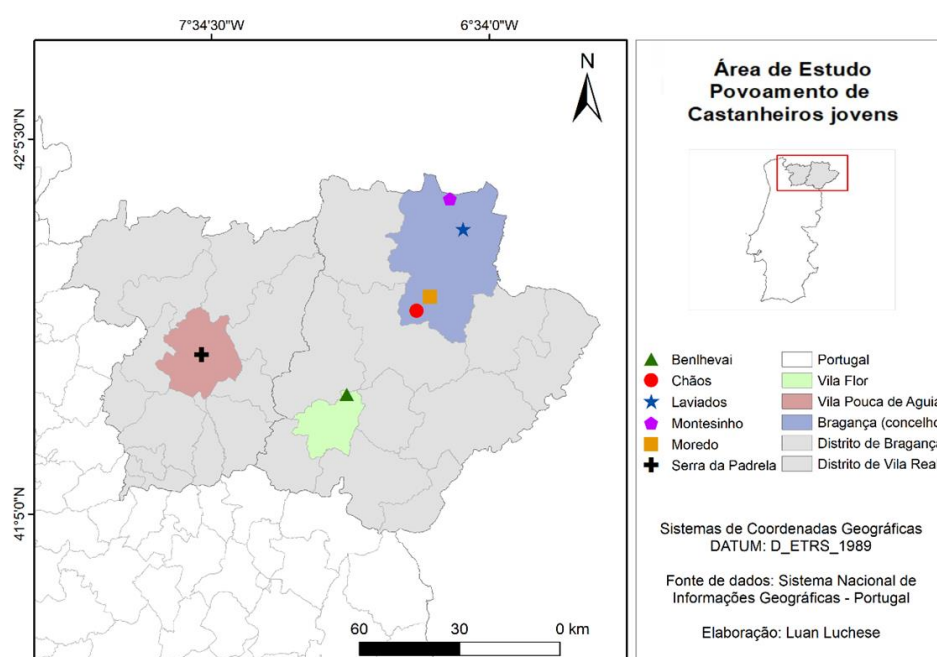


Figura 7: Mapa de localização das áreas do estudo.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

- **Bragança:**

No concelho de Bragança foram instaladas 15 parcelas permanentes em povoamentos jovens de castanheiro florestal em regime de alto fuste, sendo mais precisamente 6 em Moredo (MRa, MRb, MRc, MRd, MRe, MRf), 3 em Chãos (CHa, CHb, CHc), 3 em Montesinho (MNa, MNb, MNc), e 3 em Laviados (La, Lb, Lc).

As parcelas tinham como dimensões 50 x 60 metros, totalizando 3000 m² cada, valor considerado aceitável para manter um número suficiente de árvores na idade adulta, tendo em vista que no momento da instalação das parcelas o plantio ainda era jovem, e com as aplicações de gestão futura o número de árvores iria diminuir por conta dos

desbastes. É importante referir que as dimensões das parcelas de 3000 m² funcionam como amostragens e que os dados do trabalho foram convertidos considerando a área de 1 hectare (10 000 m²).

Todos os povoamentos instalados no concelho de Bragança se localizam na zona ecológica Ibero-subatlântica (I.SA), nos andares fitoclimáticos Submontano e Montano e a apresentam na sua silva climática, entre outras espécies, o castanheiro (Patricio, 2006).

Com a finalidade de caracterizar o regime pluviométrico, buscou-se junto ao Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), estações meteorológicas que continham dados de precipitação anual e mensal. O comportamento da precipitação, é de suma importância no âmbito dos aspectos edafoclimáticos que afetam diretamente na produtividade de culturas florestais. Segundo Mantovani e Fritzsons (2010), o regime de chuvas é fundamental, principalmente nos primeiros anos do plantio. As condições edafoclimáticas (pluviosidade, vento, temperatura, geada), são fatores condicionantes à adaptação das espécies em termos genéticos. Assim, demonstra-se a relevância deste aspecto sob os cultivos florestais.

Nesse sentido, para os locais Moredo e Chãos, utilizaram-se dados da estação udométrica de Pinela (03Q/02UG), para Montesinho, da estação udométrica Montesinho (02Q/01UG), para Laviados, a estação udográfica de Deilão (02R/02G), em que os dados registrados são de janeiro/1932 a janeiro/2023; o critério para recolha dessas informações foi por proximidade. Na região, os meses mais chuvosos compreendem o inverno e outono, e os meses de julho e agosto contam com a menor pluviosidade com base em dados monitorados. Cabe salientar que os valores de precipitação média anual são provenientes da estatística gerada pelo próprio SNIRH.

Assim, as precipitações médias anuais registadas para os povoamentos estão apresentadas na Tabela 3, juntamente com as coordenadas geográficas (graus decimais), altitudes, declives, exposição solar, e tipo de solo.

Tabela 3: Características geográficas e edafoclimáticas das parcelas instaladas em Bragança.

Localidade	Latitude (N) longitude (W)		Altitude (m)	Declive	Exposição	Precipitação média anual (mm)	Solo ****	Ano de implantação	
	Graus decimais								
Moredo	a	41,669167	-6,796667	840	10°	SW	920,9 *	Leptosolos dístricos, órticos de xistos e afins	1995
	b	41,666944	-6,796111	830	9°	SW-W			
	c	41,670278	-6,793611	835	4°	E-SE			
	d	41,659167	-6,796389	870	8,7°	NW			
	e	41,658889	-6,796944	860	11°	SE			
	f	41,658333	-6,803611	840	10°	SW			
Chãos	a	41,653611	-6,840833	730	10°	SW	920,9 *	Luvisolos crómicos de rochas básicas	1997
	b	41,623056	-6,845833	740	8°	N			
	c	41,622222	-6,845556	800	3°	S			
Montesinho	a	41,922778	-6,718889	890	8,5°	NE	1260,1**	Leptosolos úmbricos de xistos e afins	1997
	b	41,921944	-6,719722	880	6°	NE			
	c	41,923611	-0,000672	850	15°	N-NE			
Laviados	a	41,840278	-0,006673	660	9°	SW	803,3***	Leptosolos dístricos, órticos de xistos e afins	1998
	b	41,839722	-6,672778	640	9°	SW			
	c	41,840000	-6,673611	645	9°	SW			

*estação meteorológica (udométrica) de Pinela; **estação udométrica de Montesinho; ***estação udométrica de Deilão. **** Agroconsultores e Coba (1991).

Fonte: Adaptado de Patrício (2006)

- **Vila Flor (Benlhevai):**

Em Vila Flor está localizada na aldeia de Benlhevai (Blh), um ensaio de plantações mistas (castanheiro com pseudotsuga) do qual foram consideradas as três parcelas correspondentes aos tratamentos com castanheiro puro. As parcelas de amostragem de 512 m² de cultivo de castanheiro em regime de alto fuste, situada nas coordenadas geográficas (graus decimais) latitude 41,4 (N) e longitude -7,1 (W), foram implantadas no ano de 1981, e se encontram em um terreno com altitude média de cerca de 710m.

Os dados de precipitação foram retirados também do SNIRH, onde buscou-se estes em todas as estações próximas, no entanto existe a situação de escassez no monitoramento de chuva na região. Assim, a estação meteorológica mais próxima é nomeada Santa Comba Vilarixa (05Q/02U) e conta com monitoramento entre 1943 e 1960, dificultando a descrição referente a esta variável hidrológica; a precipitação média anual neste período é de 484,4mm e a máxima é 909.5mm. Cabe salientar que, devido a datação de monitoramento de dados, estes podem não ser representativos para o período de implantação do povoamento de castanheiros.

A respeito do enquadramento da região fitoecológica, de acordo com Patricio (2006), Benlhevai está inserida no andar fitoclimático submontano, zona subatlântica atlante-mediterrânea (SA.AM), em cuja silva climática pode ser encontrada o castanheiro. Em relação aos solos presentes, de acordo com Figueiredo (2013), o Concelho de Vila Flor apresenta 71% de sua área ocupada por leptossolos e 18,3% por cambissolos.

- **Vila Pouca de Aguiar: Serra da Padrela (SP)**

No Distrito de Vila Real, mais precisamente na Serra da Padrela (Concelho de Vila Pouca de Aguiar) encontram-se quatro parcelas permanentes com uma área de aproximadamente 1000 m² de castanheiro conduzido em regime de talhadia seguindo diferentes objetivos de produção, nas coordenadas geográficas em graus decimais: latitude 41,51027 (N) e longitude -7,61833 (W), a altitude registrada é de 850 m (Patricio et al., 2020).

As parcelas supracitadas foram utilizadas tendo por objetivo analisar o crescimento das varas em diferentes manejos de talhadia, sendo que cada um destas tinha como finalidade

produzir madeira com diferentes dimensões. No presente estudo, os dados dessas parcelas foram utilizados para comparar o estoque e sequestro de carbono dos diferentes manejos. A área consistia em um plantio de castanheiro em alto fuste de 50 anos, e após o corte do mesmo em 1991, a talhadia foi conduzida conforme os métodos apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Manejo de talhadia em cada parcela.

Parcelas	Objetivo	n° de varas finais
1	Produção de madeira de pequenas dimensões	3
2	Produção de madeira de médias dimensões	2
3	Controle (Sem Intervenção)	Natural
4	Produção de madeira de grandes dimensões	1

Fonte: Elaboração própria, 2023

Para chegar no número de varas de cada objetivo, ocorreram 3 desbastes nas touças, sendo o primeiro no ano de 1999 aos 7 anos de idade da talhadia, nas parcelas 1, 2 e 4. O segundo ocorreu também nas 3 parcelas, no ano de 2003 aos 11 anos de idade e o último desbaste ocorreu apenas na parcela 4 no ano de 2008 aos 16 anos de idade.

Acerca das características edafoclimáticas do local, a temperatura média anual registrada no local é de cerca de 12,5 °C, e a precipitação média anual é de 1308,4 mm, com base em dados da estação meteorológica Vila Pouca de Aguiar (05L/01UG) desde 1913 a 2021 – contendo período de falhas. Patricio (2006) descreve que nesta região o período de geadas compreende os meses de setembro a junho.

Ainda, segundo Patricio (2006), que conduziu uma análise aprofundada acerca dos solos encontrados na zona de estudo, identificou que há presença de heterogeneidades nos solos com predominância de regossolos. A unidade principal verificada foi de leptossolos dístrícos órticos que derivam de xistos e rochas afins. A estação inscreve-se no andar fitoclimático Montano, zona Subatlântica (SA), e dentre as espécies da silva climática, está o castanheiro.

4.2. Coleta, tratamento de dados e descrição dendrométrica das áreas

Os inventários florestais nas áreas conduzidas por alto fuste, em Benlhevai, Chãos (a, b, c), Laviados (a, b, c), Montesinho (a, b, c), e Moredo (a, b, c, d, e, f) foram realizados em dez idades, sendo essas aos 3, 5, 7, 10, 11, 13, 15, 17, 19 e 23 anos, totalizando 160 amostragens, coletando como variáveis a altura (h) e o diâmetro a 1,30 m (d), e o número de árvores das parcelas. Esses dados foram tabelados e organizados no software Excel onde, além de servirem como base para o presente estudo, também foram utilizados para calcular diversas variáveis dendrométricas importantes das parcelas cuja base de dados está caracterizada na globalidade na Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização da base de dados correspondente às parcelas de castanheiro de alto fuste selecionadas para este estudo.

Variáveis	Médio	Mínimo	Máximo	DP
Idade (anos)	12	3	23	5
N (árv ha ⁻¹)	1007	220	1357	210
d (cm)	8,1	0,3	28,3	4,7
h (m)	6,3	1,2	19,8	3,3
dg (cm)	8,9	1,5	19,1	4,0
hg (m)	8,3	3,0	15,7	3,0
ddom (cm)	12,2	2,3	24,0	5,2
hdom (m)	7,6	2,5	15,6	3,4
G (m ² ha ⁻¹)	9,34	0,7	22,9	5,9
SI ₍₁₀₎	7,3	3,6	12,5	2,3

DP, desvio padrão

Fonte: Elaboração própria, 2023

Os dados apresentados na tabela 5 representam os valores médios, mínimos e máximos de cada variável, englobando todas as idades de medição dos 3 aos 23 anos. As variáveis são definidas como: N = número de árvores por hectare; d = diâmetro a 1,30 m; h = altura total; dg = diâmetro da árvore de área basal média (diâmetro quadrático médio); hg = altura da árvore de área basal média; ddom = diâmetro médio das árvores dominantes; hdom = altura dominante correspondente à média das alturas das 100 árvores mais grossas

por hectare; G = área basal por hectare e SI = classe de qualidade para uma idade de referência de 10 anos.

Já para os dados do ensaio conduzido em regime de talhadia, localizado na Serra da Padrela, as respectivas variáveis dendrométricas foram coletadas aos 7, 11, 16, e 24 anos de idade, nos 4 tratamentos, totalizando 16 amostragens, que posteriormente foram organizados no software Excel, para os cálculos necessários. Para uma melhor representação da tendência de crescimento, também foram estimados os crescimentos dendrométricos do ensaio aos 3 anos, através de relações hipsométricas.

Na tabela 6 estão apresentadas as descrições dendrométricas encontradas no trabalho de Patrício et al. (2020), realizado na mesma área, sendo que as descrições representam a situação nas parcelas aos 11, 16, e 24 anos, após a realização de diferentes manejos de desbaste na área, de acordo com o objetivo de cada parcela.

Tabela 6: Descrição dendrométrica das parcelas de castanheiro florestal conduzido por talhadia.

Idade	Parcela	N (varas ha ⁻¹)	hg (m)	dg (cm)	G (m ² ha ⁻¹)
11	1	1501	9,6	10,3	12,6
	2	761	10,3	10,2	6,2
	3	5788	8,9	7,4	24,7
	4	534	10,3	10,1	4,3
16	1	1450	12,5	13,4	20,5
	2	761	12,7	15,0	13,5
	3	3455	9,9	10,5	30,0
	4	302	12,8	15,3	5,9
24	1	1399	13,0	16,6	30,4
	2	761	15,9	19,5	22,7
	3	1866	13,5	14,5	30,9
	4	320	16,7	20,8	10,8

Fonte: Adaptado de Patrício et al. (2020).

4.3. Cálculo dos Índices e definição das classes de qualidade do sítio

O índice de qualidade da estação, *site index* (SI) ou índice de sítio, é definido como a estimativa da altura média das árvores dominantes de um povoamento para uma idade de referência específica (Alemdag, 1991). Uma das definições utilizadas para altura dominante

é a definição de Assmann definida como a altura média das 100 árvores mais grossas por hectare (Patrício, 2006).

Apesar de algumas vezes poder apresentar pouca exatidão para as idades mais distantes da idade de referência (Sharma et al., 2002), o uso do SI é muito importante para a gestão dos povoamentos florestais, pois com a capacidade de se predizer alturas dominantes futuras, juntamente com outras variáveis como densidade, existe a possibilidade de se predizer também muitos outros parâmetros como as produções futuras do povoamento no local onde ele foi instalado (Patrício, 2006).

Sendo assim, neste trabalho foram calculados os diferentes SI de cada parcela de acordo com o modelo da Equação 1, proposto por Álvarez-Álvarez (2010), ajustado exatamente para castanheiros jovens (idade de referência 10 anos).

$$SI = H_0 \left[\frac{1 - \exp(-0,139*10)}{1 - \exp(-0,139*T)} \right]^{0,886} \quad (1)$$

Em que, H_0 é altura dominante e T refere-se à idade.

Para a definição das classes de qualidade, foi utilizada a Equação 2, que basicamente consiste em uma inversão da equação do SI (Equação 1), onde em função de um SI e uma idade conhecida, se estimou qual seria a respectiva altura dominante da parcela naquelas condições. Com essas equações foram criadas curvas de classe de qualidade para 9 SI's diferentes (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12), no período da idade 0 até 25 anos.

$$H_0 = SI \left[\frac{1 - \exp(-0,139*T)}{1 - \exp(-0,139*10)} \right]^{0,886} \quad (2)$$

Posteriormente, foram representadas no mesmo gráfico as alturas dominantes encontradas nas parcelas, para assim definir em qual classe de qualidade cada parcela se enquadrava. Foram definidas três classes de qualidade diferentes para as áreas estudadas (inferior, média e superior), cujos valores são apresentados na secção dos resultados do trabalho. As classes de qualidade foram definidas somente para o caso dos povoamentos de

castanheiro florestal em alto fuste e soutos. No caso da talhadia, a classe de qualidade estimada é de $SI_{20}=15$ m (Patrício et al., 2020).

Sempre que, em idades distintas, ocorreram diferenças consideráveis na estimativa da classe de qualidade para uma mesma parcela, foram considerados os SI estimados nas idades mais avançadas uma vez que o índice de qualidade da estação não traduz fielmente a qualidade da estação quando baseado em alturas de árvores muito jovens (Devan e Burkhart, 1982). Por este facto, e uma vez que nas primeiras idades a qualidade da estação pode ser influenciada pelos tratamentos culturais, não traduzindo o índice corretamente a produtividade futura, optou-se por considerar as estimativas do SI para idades mais avançadas por traduzirem melhor o potencial futuro.

É importante ressaltar que essas medições não foram levadas em consideração nesta etapa do trabalho, pois não é correto que uma mesma área varie muito sua classe de qualidade em duas idades diferentes. No entanto, após cumprir o objetivo de definir em qual classe cada local se enquadrava, todas as parcelas foram consideradas nos posteriores cálculos de biomassa e carbono.

4.4. Cálculos para estimativa de biomassa e carbono das parcelas

Nos próximos tópicos são detalhadas as metodologias utilizadas para calcular a biomassa seca dos povoamentos florestais e, posteriormente, a estimativa do carbono em cada sistema/tratamento cultural estudado. Importante ressaltar que no caso do castanheiro florestal em alto fuste e dos soutos, a biomassa foi calculada para os mesmos índices das classes de qualidade de acordo com 3 níveis: inferior, médio e superior, para posterior comparação. No caso da talhadia, a comparação ocorreu entre os quatro tratamentos existentes e não entre classes de qualidade de sítio, sendo que essa é a mesma para todos os tratamentos.

4.4.1. Biomassa do castanheiro florestal em regime de alto fuste

- **Biomassa aérea**

A biomassa relativa à parte aérea individual de cada árvore foi calculada com base na equação obtida no trabalho desenvolvido por Patrício et al. (2005) e Patrício (2006), em que diversos modelos foram ajustados e selecionados os que tiveram melhor comportamento em vários parâmetros estatísticos com o objetivo de estimar a biomassa da árvore individual em quilogramas (kg) o mais precisa possível. A Equação 3 foi a selecionada pela autora e utilizada no presente estudo para estimar a biomassa aérea individual de cada árvore:

$$W_{tot} = 0,1236 * d^{2,3929} \quad R^2_{Adj} = 0,9883 \quad (3)$$

Em que: W_{tot} é a biomassa seca total da árvore (kg) e d é o diâmetro com casca (cm) a 1,30m de altura.

Cabe salientar que, no ajustamento do modelo, a autora ressalta que as variáveis independentes como altura total e o diâmetro a 1,30m de altura (d), foram consideradas por sua relevância em explicar os erros dos modelos testados e, também, pela facilidade em obter estes dados no campo.

- **Biomassa da raiz**

Para a obtenção da biomassa da fração pertencente à raiz, no regime de alto fuste, utilizaram-se as equações ajustadas no trabalho desenvolvido por Montero et al. (2005). De acordo com os autores, as equações são funções de regressão que relacionam, para cada fração da biomassa, o peso seco e o diâmetro normal. Assim, o diâmetro normal foi verificado como a variável independente do modelo cuja equação alométrica foi linearizada utilizando a função logarítmica que melhor se ajustou aos dados testados.

A fração da raiz foi denominada pelos autores como sendo a variável Biomassa da raiz (Br), cujos parâmetros da equação foram ajustados para cerca de 35 espécies diferentes. Para o presente estudo, que tem como foco o castanheiro, os valores encontrados para os parâmetros a e b são -3,97491 e 2,83892, respectivamente, onde o R^2 é 0,988, indicando uma

ótima correlação entre os dados observados e a função utilizada na linearização do modelo (Montero et al., 2005).

O procedimento de cálculo segue três etapas sendo a primeira destinada a obter o fator de correção (CF) necessário para atenuar o possível viés associado à transformação logarítmica que utiliza o erro padrão da estimativa (SEE) (*vide* Montero et al., 2005). Para o castanheiro o SEE apresentado é igual a 0,142565 e, a Equação 4 apresenta a expressão para obter o fator de correção (Sprugel, 1983).

$$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}} \quad (4)$$

A segunda etapa consiste, seguindo a equação logarítmica (Equação 5) onde d refere-se ao diâmetro, em obter os valores modulares, transformando e aplicando o fator de correção (Equação 6).

$$\ln 2,83892 = -3,97491 + 2,83892 * \ln d \quad R^2_{Adj} = 0,988 \quad (5)$$

$$Br = CF * A * d^{2,83892} \quad (6)$$

Em que Br é a biomassa da raiz em kg, $A = e^{-3,97491}$, e a e b são os parâmetros da regressão empregada.

- **Biomassa total**

Para quantificar a biomassa total dos povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste, foi considerado o somatório dos valores individuais de biomassa aérea e de raiz de todas as árvores presentes nas parcelas, encontrando a biomassa seca total da parcela (kg). Estes valores foram convertidos em Megagrama (Mg) e, posteriormente, foram extrapolados para hectare, tendo como unidade de medida final dos dados $Mg \text{ ha}^{-1}$.

4.4.2. Biomassa do castanheiro de alto fuste agroflorestal (soutos)

- **Biomassa aérea**

Para os cálculos referentes à biomassa dos soutos de castanheiro, foi utilizado um modelo proposto por Menéndez-Miguélez et al. (2023), representado pela Equação 7, com o intuito de estimar a biomassa aérea do povoamento (Mg ha^{-1}), com base na densidade, no SI, e na idade do mesmo, juntamente com os parâmetros a_0 , a_2 , b_0 , b_1 e b_2 . Por ser uma equação de povoamento não tivemos a necessidade de medições e cálculos para árvores individuais.

$$W_{ha} = (1787,40 - 147,60X_2)T^{(-1,1235 + 0,0003X_1 + 0,2863X_2)} \quad R^2_{\text{Adj}} = 0,9314 \quad (7)$$

Em que W_{ha} é a biomassa aérea total do povoamento (Mg ha^{-1}), $a_0 = 1787,40$, a_1 é nulo pois este parâmetro não é usado neste modelo, $a_2 = -147,60$, $b_0 = -1,1235$, $b_1 = 0,0003$, $b_2 = 0,2863$, X_1 é a densidade do soto, X_2 é o SI e T é a idade.

Assim, a biomassa foi calculada utilizando duas densidades diferentes, 100 e 204 árv. ha^{-1} , simulando espaçamentos de plantio de 10 x 10 m e 7 x 7 m, cumprindo o que é relatado por Diegues (2020), que aponta que as densidades comumente utilizadas costumam variar entre 70 e 277 árv. ha^{-1} .

Em relação ao SI, foram testados três níveis de classe de qualidade diferentes, para abranger estações de qualidade inferior, média e superior, baseados nos gráficos produzidos para definir a classe de qualidade. Os SI's utilizados foram 5, 7 e 11, os quais se encontram dentro das faixas de classes de qualidade definidas como inferiores, médias e superiores para os locais estudados. As equações foram testadas para as idades de 3, 5, 7, 10, 11, 13, 15, 17, 19 e 23 anos, por serem as mesmas em que ocorreram as medições das parcelas.

As classes de qualidade SI e idades consideradas foram idênticas ao observado no castanheiro florestal em alto fuste com o intuito de padronizar e possibilitar a comparação dos resultados obtidos pelas diferentes orientações silviculturais. Assim, apesar de serem equações de povoamento que estimam a biomassa no caso dos soutos, e equações de árvore individual no caso do alto fuste florestal, é possível a comparação entre sistemas culturais, pois os dados dos soutos representarão áreas com idades e SI idênticos aos medidos nos

plantios florestais em alto fuste. Essa medida foi tomada pelo facto da não existência de dados de sotos medidos no campo nas mesmas condições e idades dos castinçais (castanheiro florestal) estudados.

- **Biomassa raiz**

Para estimar a biomassa da raiz utilizou-se a Equação 8, um modelo simples que depende somente da idade da cultura. Este modelo, apresentado por Menéndez-Miguélez et al. (2023), expressa a razão média entre a raiz e a parte aérea.

$$W_{\text{haraiz}} = 3,1502 T^{-0,7437} \quad R^2_{\text{Adj}} = 0,6732 \quad (8)$$

Cabe salientar que, de acordo com estes autores, existe um comportamento decrescente quanto à produção de biomassa até os 15 anos com tendência para se manter estável até os 20 anos de idade. Assim, este aspecto será alvo de análise nos resultados com base nos dados do castanheiro jovem nas parcelas de estudo.

- **Biomassa total**

Para quantificar a biomassa total (Mg ha^{-1}) das áreas dos sotos de castanheiro, considerou-se o somatório das biomassas aérea e de raiz do povoamento em cada classe de qualidade e idade.

4.4.3. Biomassa do castanheiro florestal em regime de talhadia

- **Biomassa aérea**

Para estimar a biomassa aérea das parcelas de talhadia foi calculado primeiramente o volume, por meio da Equação 9 ajustada por Patricio et al. (2020) para as mesmas áreas estudadas no presente trabalho.

$$v = 0,0005318 + 0,00003773 d^2 h \quad R^2_{Adj} = 0,98 \quad (9)$$

Onde: v é volume individual das varas (m^3), β_0 equivale a 0,0005318 e β_1 a 0,00003773, d é o diâmetro (cm) a 1,30 m de altura e h é a altura.

Após calculado o volume individual de cada vara existente na parcela, esses valores foram somados e extrapolados para 1 hectare para obter o volume do povoamento ($m^3 ha^{-1}$). Após isso, foram convertidos para biomassa por meio do fator de conversão igual a 0,547 correspondente a densidade da madeira do castanheiro (Luís e Monteiro, 1998).

- **Biomassa de raízes**

Para as raízes na talhadia, Bourgeois et al. (2004) consideraram haver diminuição na biomassa com o passar dos anos pelo facto da talhadia se formar a partir de cepos ou tocos de árvores que anteriormente já possuíam um grande sistema radicular estabelecido. Nestas condições, admitem que ao longo do tempo parte desse sistema radicular comece a morrer e a decompor-se e a biomassa comece a diminuir.

Portanto, pela falta de dados medidos a campo, foram considerados valores médios de biomassa de raiz de talhadia apresentados no próprio trabalho de Bourgeois et al. (2004), onde os autores indicam que, após os 13 anos, ocorre diminuição de biomassa de raiz em valores superiores a 29% quando comparados aos primeiros anos da formação da talhadia.

- **Biomassa total**

Para quantificar a biomassa total das áreas de talhadia de castanheiro foram somados os valores de biomassa aérea e de raiz em cada parcela e idade em que foram calculados. A biomassa total obtida nas quatro parcelas do estudo foi convertida para o hectare ($Mg ha^{-1}$) obtendo-se assim a biomassa do povoamento para os diferentes modelos de silvicultura aplicados.

4.4.4. Fator de conversão de biomassa em carbono

Para conversão de biomassa em carbono foi utilizada uma taxa de 48,4% (Montero et al., 2005) e confirmada pelos valores médios laboratoriais encontrados por Patrício (2006). Sendo assim, foi possível, com base na biomassa, calcular o estoque de carbono e as taxas de sequestro de CO₂ pelas plantas, utilizando essa taxa conversora.

4.5. Carbono no solo

A estimativa do estoque de carbono orgânico no solo do castanheiro florestal em alto fuste se deu através da interpretação de análises físicas e químicas do solo em uma profundidade de 30 centímetros (Patrício et al., 2006) e posterior aplicação dos valores na Equação 10.

$$C_{tot} = \left(\frac{C}{1000}\right) \left[10000 * P_s * DAP * \left(\frac{\% \text{ terra fina}}{100}\right)\right] \quad (10)$$

Em que: C_{tot} é o carbono total encontrado no solo em toneladas por hectare (Mg ha⁻¹), C é o carbono da amostra em g kg⁻¹ (ou kg Mg⁻¹), P_s é a profundidade de solo da amostra em metros, DAP equivale a densidade aparente do solo (Mg m⁻³) e o percentual de terra fina foi dividido por 100 para o uso no cálculo em valor decimal.

Para Chãos, Laviados, Moredo e Montesinho foram utilizadas as análises químicas e físicas disponíveis no trabalho de Patrício (2006), sendo que existia apenas uma análise de cada local correspondente a um perfil representativo de cada local, com exceção de Moredo, onde existiam duas (uma para Moredo a, b, c, e outra para Moredo e, d, f). As estimativas de Benlhevai foram calculadas através de dados da área disponíveis em Nunes et al. (2011). Os dados de carbono no solo foram calculados obtendo-se os valores médios das áreas por classe de qualidade.

Relativamente à talhadia da Padrela, e uma vez que não existiam análises químicas e físicas dos solos do local no momento da condução do povoamento neste sistema, foram utilizados os dados da análise do solo até 30 centímetros de profundidade, feita anteriormente onde as árvores ainda eram conduzidas em regime de alto fuste, encontradas no trabalho de Patrício (2006).

Para os soutos, como não existiam dados de campo coletados para este trabalho, foram utilizados valores de carbono no solo encontrados na literatura para profundidades que variaram de 0 a 20 e 0 a 30 cm, usando como referência valores médios encontrados em alguns trabalhos como Borges et al. (2013), Arrobas et al. (2023) e Rodrigues et al. (2020).

4.6. Comparação dos estoques, taxas de sequestro e valoração do CO₂

Com os valores de biomassa do castanheiro florestal e dos soutos já calculados, geraram-se gráficos de dispersão contendo linhas de tendência de aumento de biomassa e carbono por hectare nas plantações ao longo dos anos, comparando assim a dinâmica de acúmulo nas duas orientações produtivas, madeira e castanha, esta última em duas densidades diferentes (soutos de 100 e 204 árvores por hectare), nas três classes de qualidade definidas de acordo com os SI (baixo, médio e superior).

Para a talhadia, aplicou-se o mesmo modelo de gráfico, porém, nesse caso, o gráfico serviu para a comparação da tendência de acúmulo entre os diferentes objetivos de produção (madeira de pequenos, médios e grandes diâmetros, juntamente com a testemunha correspondente a não intervenção silvícola), apenas para SI₂₀=15m, sem levar em consideração diferentes classes de qualidade.

Após isso, os valores de estoque de carbono no solo foram comparados em cada classe de qualidade, de forma isolada, e somados com o estoque total de carbono da biomassa no último ano de medição, em cada orientação de produção (soutos, alto fuste florestal e talhadia) para obter o estoque total de carbono no sistema.

Posteriormente, criaram-se tabelas para representar a taxa média anual de sequestro de CO₂, primeiramente convertendo o estoque de carbono puro acumulado na biomassa para CO₂ (GEE retirado da atmosfera) através de multiplicação pelo fator 3,67 (Fernandes et al., 2008) e, posteriormente, dividindo esse valor pela respectiva idade do povoamento para encontrar a taxa média anual de sequestro em cada ano de inventário.

Para a estimativa de valoração foram consideradas as taxas médias anuais de sequestro de CO₂, e não de carbono puro, já que os mercados levam em conta o sequestro dos GEE. Nessa valoração foram considerados somente os valores encontrados na biomassa, pois para a valoração do solo ser coerente, seria necessária uma análise dos mesmos no momento

da instalação do povoamento e outra no último ano de inventário, sabendo exatamente o que aquela rotação de plantio armazenou de carbono no solo no período abrangido pelo estudo.

A valoração económica foi calculada multiplicando os valores de sequestro médio anual ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), pelo preço de cada licença de emissão, que na prática corresponde ao valor de uma tonelada ou Mg de CO_2 sequestrado. O preço considerado para cada licença foi de 83,99 €, por se tratar do preço médio entre janeiro de 2022 e maio de 2023 tal como constam no site da empresa *Sende CO2* (<https://www.sendeco2.com>), consultado no dia 06/05/2023, correspondente ao mercado secundário dos direitos de emissão (EU-Carbon Permits), onde se encontra o último dado de valor disponível até a realização do presente trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Definição das classes de qualidade do sítio

Para servir como base para as demais metodologias e resultados, primeiramente foram definidas as classes de qualidade inferiores, médias e superiores, e em qual delas cada parcela se encontrava, através da aplicação das Equações 1 e 2, tendo-se gerado o gráfico apresentado na Figura 8. A seleção encontrada foi validada também com o modelo de (Patrício, 2006) para determinação da altura dominante nas idades em estudo.

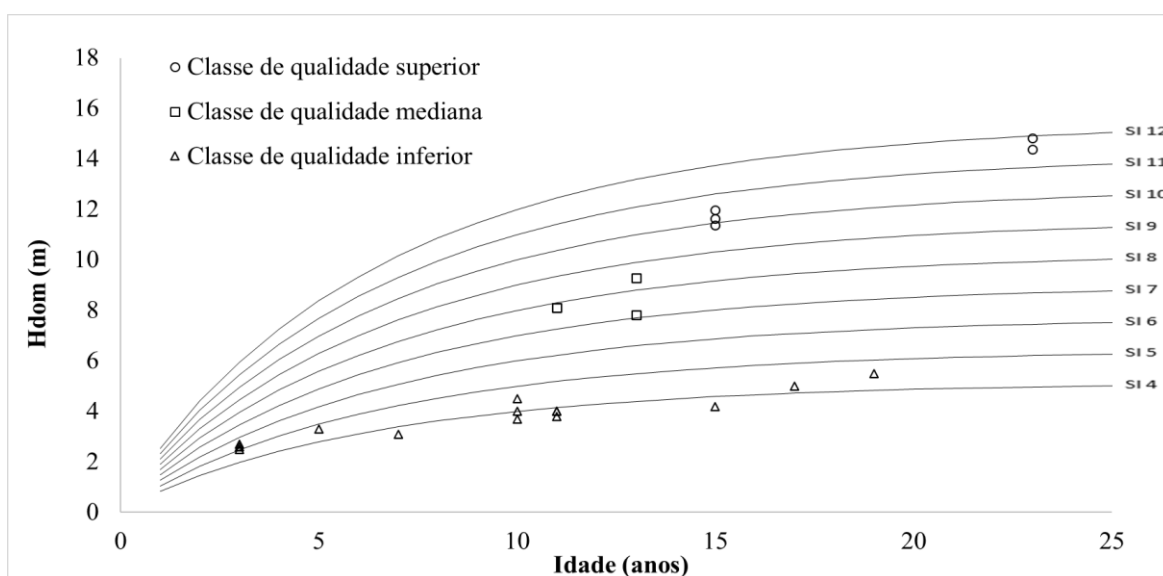


Figura 8: Definição das classes de qualidade das parcelas de acordo com as curvas de site index.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Antes de tudo, é importante ressaltar que a classe de qualidade nas primeiras idades pode ser influenciada por diversos fatores, como os tratamentos silviculturais, sendo assim nem sempre os valores obtidos traduzem o verdadeiro potencial produtivo (Sharma et al., 2002; Devan e Burkhart 1982). Assim, optou-se por considerar, em algumas parcelas, a classe de qualidade estimada em idades mais avançadas como mais adequada e ajustada à realidade do crescimento e potencial dos povoamentos que as parcelas representam.

Assim, conforme descrito na metodologia, sobrepueram-se os dados da altura dominante do castanheiro florestal em alto fuste, em função da respetiva idade, no gráfico das classes de qualidade. Desta forma fez-se o enquadramento de todas as parcelas/idades de medição no respetivo SI. As parcelas finais foram selecionadas de acordo com a qualidade da estação em que se enquadravam considerando três níveis: superior (SI's de 10 a 12), médio (SI's de 7 a 9) e inferior (SI's de 4 a 5). Para os soutos foram utilizados valores médios dentro destes intervalos para definir as respectivas classes de qualidade.

Assim, nas idades representativas selecionadas para definir a classe de qualidade no intervalo SI 10 a 12, encontraram-se três parcelas, sendo que todas elas estão localizadas em Moredo (MRa, MRb e MRc). Para a classe de qualidade definida como média, o SI variou de 7 a 9, sendo três as parcelas enquadradas que melhor a representaram: duas em Chãos (CHa, e CHc) e uma em Montesinho (MNa). As demais parcelas foram definidas como de classe de qualidade inferior, sendo que o SI variou de 4 a 5. Nesta categoria incluíram-se uma parcela de Benlhevai (Blh), duas de Montesinho (MNb, MNc), uma de Chãos (CHb), as três de Laviados (La, Lb e Lc) e três de Moredo (MRd, MRe e MRf), totalizando dez. As parcelas que não se enquadraram claramente nos três níveis de qualidade definidos foram excluídas da análise.

Como forma de avaliar a importância do uso das classes de qualidade na produção florestal, nos próximos tópicos serão representadas a influência das classes na produção de biomassa e armazenamento de carbono das áreas de castanheiro.

5.2. Estimativas de armazenamento de biomassa e de carbono nos plantios florestais (alto fuste) e agroflorestais

Para comparação do armazenamento de carbono na biomassa do castanheiro florestal de alto fuste e agroflorestal (souto) foram gerados gráficos. A Figura 9 compara o castanheiro florestal de alto fuste com o castanheiro em soutos tradicionais com densidade de 100 árvores por hectare. A Figura 10 representa igualmente o castanheiro florestal de alto fuste e o castanheiro em soutos com 204 árvores por hectare. Os dados dos povoamentos estão expressos por classe de qualidade e idade inventariada, juntamente com suas respectivas linhas de tendência, cujo coeficiente de determinação (R^2) foi superior a 0,89 para todas, expressando uma ótima correlação entre os dados observados e a função que os descreve.

Como se pode observar na Figura 9, as parcelas que estão no intervalo de classe de qualidades SI 10-12 do castanheiro florestal apresentam uma produção média de biomassa e estoque de carbono total da planta (acima e abaixo do solo) mais elevada, podendo chegar próxima dos 180 Mg ha⁻¹ de biomassa, e 87 Mg ha⁻¹ de carbono armazenado aos 23 anos. Para as classes de qualidade SI 7-9 e SI 4-5 a biomassa produzida foi de 109 Mg ha⁻¹ e 68 Mg ha⁻¹ respectivamente; para o carbono os valores ficaram próximos a 52 Mg ha⁻¹ e 33 Mg ha⁻¹, espeticivamente.

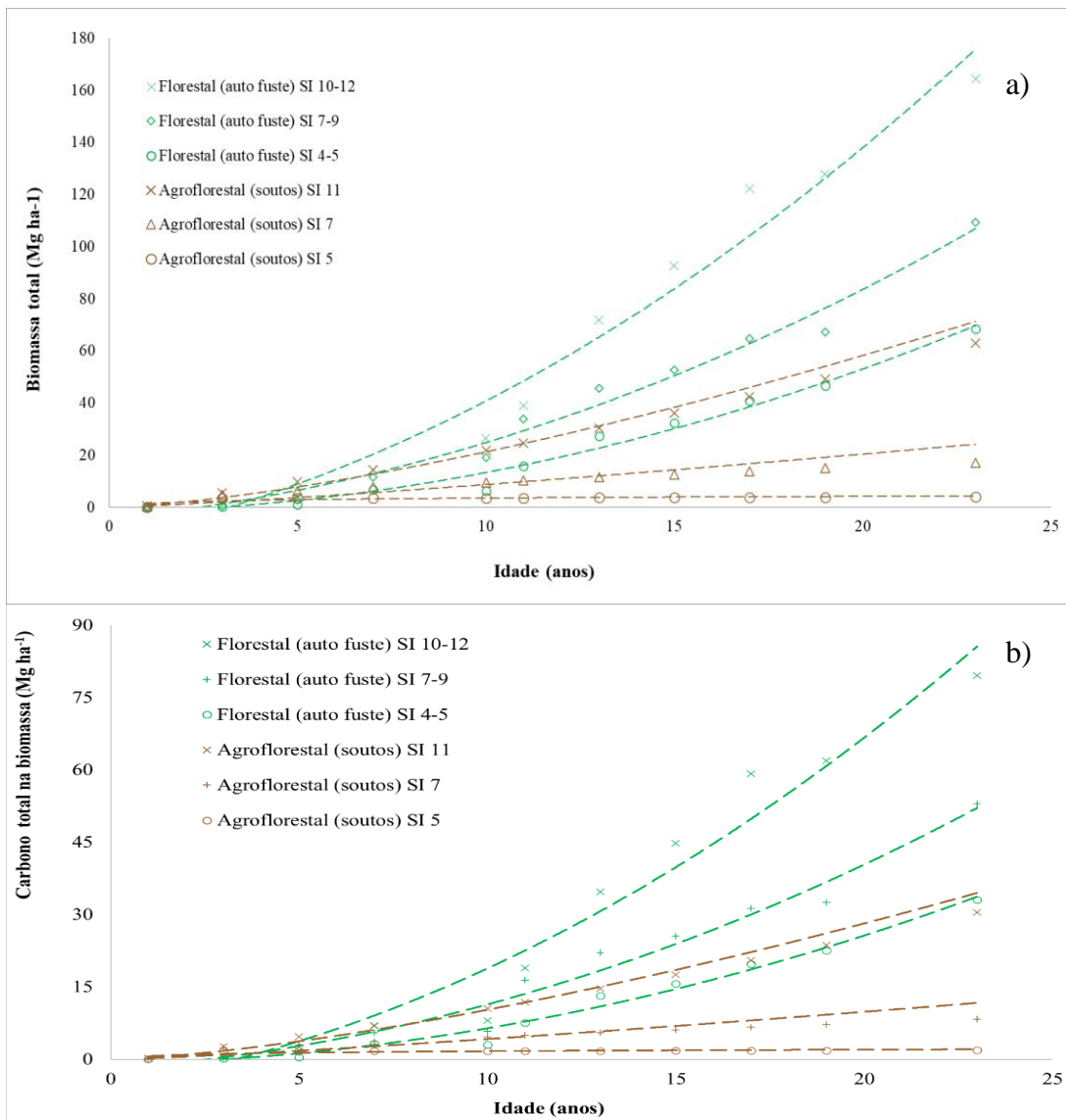


Figura 9: Biomassa (a) e carbono (b) total do castanheiro florestal e agroflorestal (100 árv. ha⁻¹) nas 3 classes de qualidade.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Os menores valores encontrados no estudo, estão nas classes mediana e inferior dos soutos. Nestas condições a biomassa produzida foi inferior a 30 Mg ha⁻¹ e o carbono sequestrado abaixo de 15 Mg ha⁻¹, aos 23 anos. Estes valores aproximam-se dos estimados para Espanha, onde a biomassa total foi de 25 Mg ha⁻¹ e, conseqüentemente, 12 Mg ha⁻¹ de carbono armazenado, aos 20 anos de idade (Menéndez-Miguélez et al., 2023).

A Figura 10 apresenta os gráficos c e d gerados com a finalidade de comparar os mesmos resultados obtidos para os dados de alto fuste, só que com a biomassa e carbono total estimado para soutos de maior densidade (204 árv⁻¹ ha⁻¹).

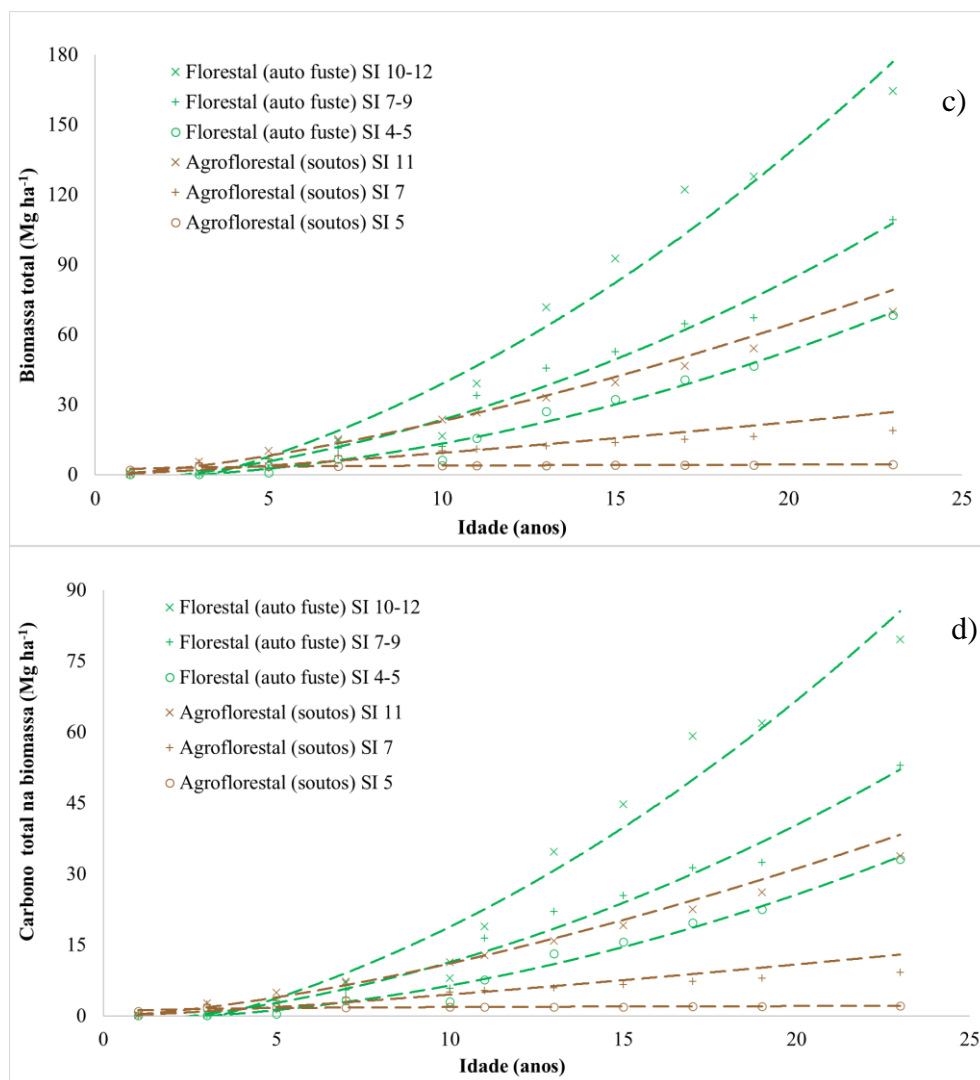


Figura 10: Biomassa (c) e carbono (d) total do castanheiro florestal e agroflorestal (204 árv. ha⁻¹) nas 3 classes de qualidade.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Um resultado interessante encontrado no trabalho foi o do comportamento da produção de biomassa e armazenamento de carbono na classe de qualidade superior dos soutos com densidade de 100 árvores por hectare. Nesta situação, o souto de melhor qualidade armazena uma quantidade de carbono ligeiramente superior à quantidade de carbono armazenada pelo castanheiro florestal de alto fuste na qualidade inferior devido à redução de densidade. No caso dos soutos com densidade acima de 200 árvores por hectare os valores foram mais elevados em comparação a classe florestal inferior do alto fuste, podendo chegar até 80 Mg ha⁻¹ de biomassa produzida, e de 38 Mg ha⁻¹ de carbono estocado aos 23 anos. Estes valores traduzem o maior potencial para armazenamento de carbono no castanheiro agroflorestal na condição específica.

Esse mesmo comportamento foi observado por Menéndez-Miguélez et al. (2023), onde comparando a produção de biomassa de castanheiro florestal e agroflorestal em duas classes de qualidade na Espanha, os soutos de classe superior acumularam mais biomassa, e consequentemente carbono, que os plantios florestais da classe inferior.

Embora a diferença não seja de grande magnitude, de acordo com os valores estimados pelas equações, observou-se um crescimento superior na produção de biomassa e no estoque de carbono nos soutos com maior densidade de árvores na idade juvenil. Os soutos com maior densidade e SI produziram aproximadamente mais 10 Mg ha⁻¹ de biomassa e estocaram mais cerca de 5 Mg ha⁻¹ de carbono, aos 23 anos, comparados com os soutos de menor densidade na mesma idade e classe de qualidade.

A Tabela 7 apresenta medidas descritivas importantes tais como a média e o coeficiente de variação, do carbono armazenado entre as três classes de qualidades para cada idade. Para isso, utilizaram-se os dados referentes ao castanheiro florestal e aos soutos.

Tabela 7: Média, desvio padrão, e coeficiente de variação do carbono armazenado nos povoamentos nas 3 classes de qualidade para cada idade.

Idade	Castanheiro florestal (alto fuste)			Castanheiro agroflorestal (soutos)		
	Média (Mg ha ⁻¹)	desvio padrão (Mg ha ⁻¹)	CV (%)	Média (Mg ha ⁻¹)	desvio padrão (Mg ha ⁻¹)	CV (%)
3	0,23	0,08	34,78	2,27	0,44	20,80
5	1,21	0,68	56,20	3,16	1,50	47,62
7	5,27	1,88	35,67	4,12	2,63	63,75
10	8,39	4,95	59,00	5,66	4,51	79,68
11	14,33	5,94	41,45	6,20	5,19	83,71
13	23,37	10,85	46,43	7,32	6,62	90,30
15	28,68	14,84	51,74	8,48	8,13	95,87
17	36,78	20,3	55,19	9,69	9,73	100,31
19	39,02	20,44	52,38	10,94	11,40	104,20
23	55,22	23,31	42,21	13,56	14,97	110,48

Fonte: Elaboração própria, 2023.

É importante mencionar que devido ao carbono ser calculado como uma percentagem em função da biomassa, o coeficiente de variação mantém-se inalterado. Para os soutos, optou-se por representar apenas a média correspondente à densidade de 100 árvores por hectare.

Com base na Tabela 7 conseguimos observar a variação no armazenamento de carbono, para uma mesma idade, em sítios com classe de qualidade inferior, média e superior. Nota-se que, para o castanheiro florestal, os coeficientes de variação tendem a ser crescentes com a idade, salvaguardando algumas flutuações em alguns anos, porém os valores sempre se mantiveram entre 30 e 60%.

Em relação aos soutos, para ambas as densidades consideradas, o coeficiente de variação apresenta uma tendência crescente, sem flutuações, mas com uma variação superior relativamente ao castanheiro florestal a partir dos 7 anos, chegando a um máximo de 110,48%. O armazenamento de carbono apresenta uma grande variação entre classes de qualidade com o aumento da idade sobretudo para os soutos.

5.3. Estimativas de armazenamento de biomassa e de carbono nos povoamentos florestais conduzidos por talhadia

A produção de biomassa e o armazenamento total de carbono para o castanheiro florestal conduzido em talhadia pode ser observada na Figura 11. O comportamento destas variáveis pode ser analisado com base nas linhas de tendencia associadas aos dados obtidos, as quais apresentaram R^2 superior a 0,95 o que demonstra uma relação ótima para a função os descrever.

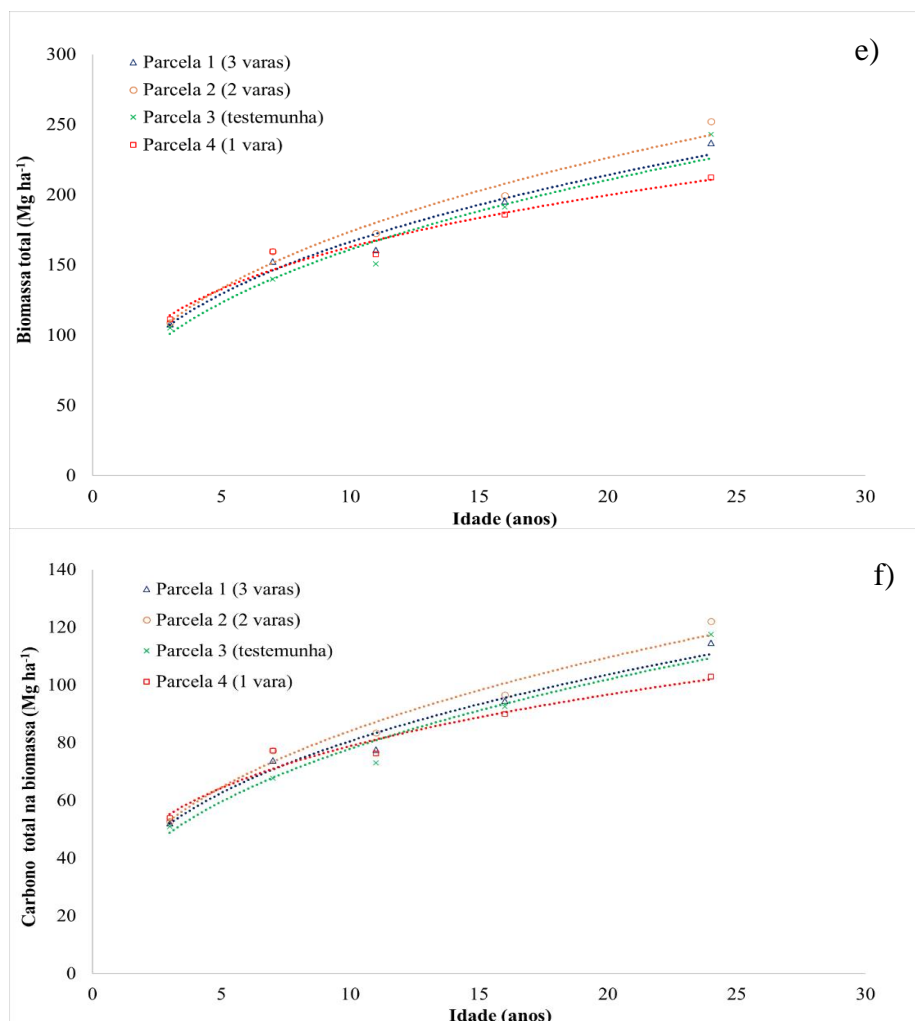


Figura 11: Biomassa (e) e carbono (f) total do castanheiro florestal em regime de talhadia, nas 4 parcelas do estudo.

Fonte: Elaboração própria, 2023

Como podemos observar na Figura 11, aos 24 anos a produção total de biomassa variou entre 215 e 252 Mg ha⁻¹, e o estoque de carbono entre 103 e 122 Mg ha⁻¹. Não foram encontrados muitos trabalhos publicados que se refiram à produção de biomassa em talhadas jovens de castanheiro. Contudo, para uma talhadia da mesma espécie próxima dos 40 anos no norte da Espanha, Prada et al. (2016) referem valores da ordem de 539 e 261 Mg ha⁻¹ de biomassa e carbono, respectivamente. A comparação destes valores com o presente trabalho, pode indicar que a talhadia jovem estudada ainda tem potencial para acumular grandes valores de biomassa e carbono nos anos seguintes.

Analisando os resultados da talhadia no presente trabalho chama a atenção o facto da Parcela 2, objetivo final 2 varas/touça para médias dimensões, apresentar um valor superior, tanto em biomassa como em carbono, à parcela 1, objetivo final 3 varas/touça para produzir material de pequenos diâmetros, embora a diferença não seja de grande expressão. Uma hipótese para isso, segundo a descrição dendrométrica da área encontrada no trabalho de Patrício et al. (2020), é que esse leve aumento constatado na biomassa total, se dê pelo facto da Parcela 2 apresentar o dg e hg superior, comparado a Parcela 1.

O facto de os valores de biomassa total se apresentarem relativamente elevados nos primeiros anos, próximos dos 110 Mg ha⁻¹ para biomassa e 50 Mg ha⁻¹ para carbono, pode ser explicado pelo sistema radicular o qual já estava instalado nos primeiros anos de formação da talhadia, sendo correspondente ao sistema radicular da rotação anterior. Ao nível de armazenamento é importante utilizar esses valores para ter uma noção global do estoque de carbono no sistema, valores esses que tendem a diminuir ao longo do tempo com a renovação do sistema radicular (Borgeuis et al., 2004).

Para melhor compreender as variações entre as parcelas estudadas, são apresentadas na Tabela 8 as médias de armazenamento de carbono para as 4 parcelas, em cada idade inventariada, juntamente com os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação.

Tabela 8: Média, desvio padrão, e coeficiente de variação do carbono armazenado no povoamento de talhadia para as 4 parcelas de estudo, para cada idade.

Idade	Castanheiro florestal (talhadia)		
	Média (Mg ha ⁻¹)	desvio padrão	CV (%)
3	52,48	1,24	2,36
7	74,08	4,53	6,12
11	77,67	4,35	5,60
16	93,47	2,79	2,99
24	114,35	8,21	7,18

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Nota-se que a variação do carbono armazenado não teve um padrão definido com o passar dos anos, apresentando, no entanto, oscilações, que podem ser explicadas pelos desbastes ocorridos na área. A variação ocorreu entre os valores 2,36%, aos 3 anos, até 7,18%, aos 24 anos.

5.4. Carbono total armazenado no sistema (solo e planta)

Quando se trata de sequestro de carbono florestal, não considerar o carbono presente nos solos é subestimar a capacidade das florestas de realizar esse serviço ecossistêmico, porém, medir alterações do mesmo no solo constitui um processo difícil, tendo em vista a alta variabilidade espacial e a lentidão dos processos de acumulação (Jandl et al., 2007).

Considerando esse contexto, é importante apresentar algumas estimativas do carbono no solo dos sistemas florestais estudados. Assim, pelo facto de não termos padronização nas idades das análises, nem condições de analisar o balanço no início e no final da rotação, utilizaram-se valores médios somente para auxiliar no entendimento do carbono total estocado nos sistemas estudados. Para analisar, por exemplo, taxas médias de sequestro anual de carbono, somente com os dados disponíveis, as estimativas não seriam coerentes.

No que se refere ao carbono encontrado nos solos do castanheiro florestal conduzidos em alto fuste, os valores encontrados na profundidade 0 a 30 cm, para as classes de qualidade SI 4-5, e SI 7-9, foram de 10,09 Mg ha⁻¹, e 18,50 Mg ha⁻¹ respectivamente, enquanto para o SI 10-12, se encontrou um valor médio de 31,90 Mg ha⁻¹.

Para os soutos, foram encontrados valores com base na literatura (Borges et al., 2013; Arrobas et al., 2023; Rodrigues et al., 2020) que geraram estimativas cujo valor médio ronda 22,93 Mg ha⁻¹ de carbono orgânico. Para a talhadia, com base na análise feita na zona quando ela ainda estava na rotação anterior, os valores encontrados foram de 33,80 Mg ha⁻¹.

Com esses valores de carbono orgânico no solo em mãos, juntamente com os encontrados na biomassa e discutidos anteriormente, foram estimados os estoques totais de carbono armazenado no sistema solo/planta para as áreas de castanheiro nos sistemas silviculturais estudados, apresentados na Figura 12.

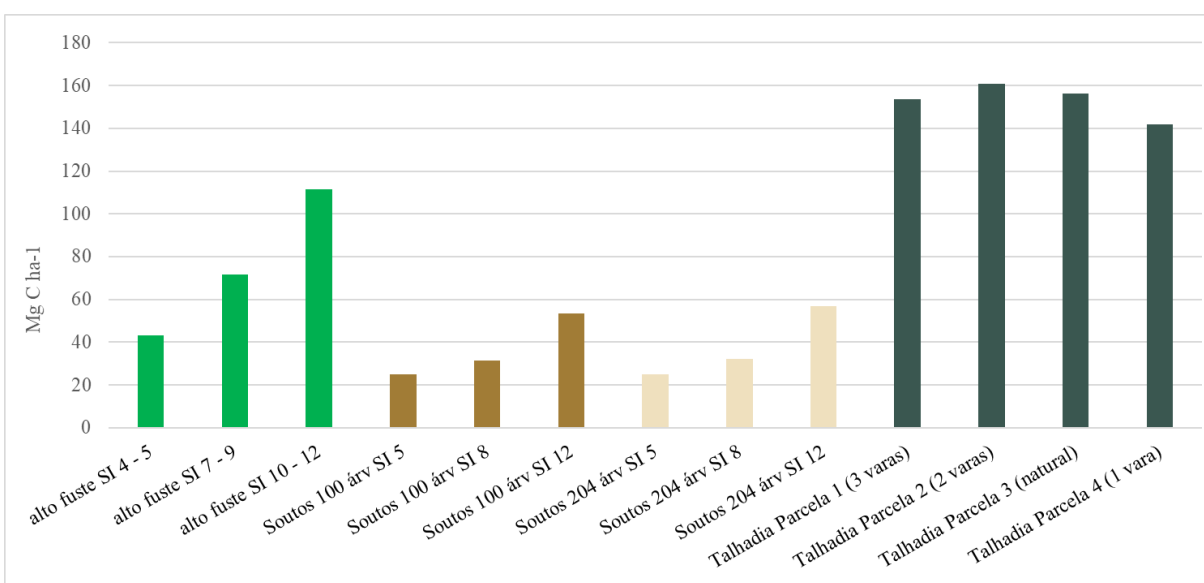


Figura 12: Estimativas do estoque total de carbono no sistema solo/planta para os diversos sistemas culturais estudados.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Nota-se que o sistema silvicultural onde se encontrou mais carbono armazenado foi o da talhadia, variando entre 140 e 160 Mg ha⁻¹, o que faz sentido tendo em vista que já havia lá quantidades significativas de carbono abaixo do solo, provenientes da rotação anterior. Apesar de boa parte do carbono do sistema radicular ser proveniente da rotação anterior, do qual as novas varas fazem uso, no caso do castanheiro está provado que existe uma autorenovação das raízes na touça (Dazio et al., 2018) por forma a compensar a mortalidade das raízes.

O armazenamento total de carbono no castanheiro florestal em alto fuste variou de 43 a 111 Mg ha⁻¹, da pior classe de qualidade em relação à melhor, enquanto nos soutos agroflorestais variou de 24 a 56 Mg ha⁻¹, considerando as duas densidades.

Esses resultados convergem com os de Torralba et al. (2016), os quais concluíram que agroflorestas comparadas com sistemas florestais convencionais podem aumentar significativamente muitos serviços do ecossistema como a biodiversidade, a produção de alimentos, controle de erosão e a fertilidade do solo. Contudo, quando se compara a produção de biomassa do componente arbóreo, os sistemas florestais se destacam mais. Com base nesses resultados, e sabendo que essa biomassa armazena muito carbono, entende-se que a relação para sequestro de carbono seja semelhante.

5.5. Sequestro médio anual de CO₂ e possível cenário de valoração económica

Conforme citado anteriormente na metodologia, quando se fala em valoração de sequestro de carbono, especialmente através do Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), os preços costumam ser quantificados com base em CO₂, onde cada tonelada de carbono armazenado no sistema florestal corresponde a 3,67 toneladas do GEE retirado da atmosfera (Fernandes et al., 2008). Com base nisso, os valores de carbono orgânico armazenados foram convertidos em CO₂ sequestrado e, posteriormente, foram calculadas as médias anuais desse sequestro (Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹) pela biomassa florestal, sem considerar os dados de solo devido à falta de dados que permitiriam conhecer o balanço de carbono no solo do início até o final da rotação. Nos povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste e nos soutos foram consideradas as biomassas totais (aéreas e de raiz), já para os dados da talhadia, nesta etapa do trabalho, foram considerados somente a biomassa aérea, devido à dificuldade de diferenciar o que foi sequestrado na rotação atual e na anterior, conduzida por alto fuste, relativamente às raízes.

Sendo assim, a taxa média anual de sequestro dos povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste e agroflorestal (soutos) aos 23 anos, bem como dos povoamentos de talhadia aos 24 anos, são apresentadas na Tabela 9, juntamente com suas respectivas valorações. Para a respetiva valoração foi considerado o valor médio de janeiro de 2022 a

maio de 2023, dos direitos de emissão da empresa *sendeco2*, que foi de 83,99 € por tonelada de CO₂ sequestrado (SendeCO2, 2023).

Tabela 9: Sequestro médio anual de CO₂ nas diferentes orientações produtivas, por classe de qualidade, e possível cenário de valoração económica.

Orientação produtiva	Sequestro médio anual de CO ₂ (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Valoração do sequestro do CO ₂ (€ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Florestal (alto fuste) SI 4-5	5,28	443,79
Florestal (alto fuste) SI 7-9	8,45	710,06
Florestal (alto fuste) SI 10-12	12,70	1066,49
Agroflorestal (100 árv. ha ⁻¹) SI 5	0,31	25,73
Agroflorestal (100 árv. ha ⁻¹) SI 7	1,33	111,35
Agroflorestal (100 árv. ha ⁻¹) SI 11	4,86	408,06
Agroflorestal (204 árv. ha ⁻¹) SI 5	0,34	28,56
Agroflorestal (204 árv. ha ⁻¹) SI 7	1,47	123,60
Agroflorestal (204 árv. ha ⁻¹) SI 11	5,39	452,98
Talhadia Parcela 1 (3 varas)	12,52	1051,37
Talhadia Parcela 2 (2 varas)	13,65	1146,58
Talhadia Parcela 3 (natural)	12,96	1088,43
Talhadia Parcela 4 (1 vara)	10,72	900,37

Fonte: Elaboração própria.

O serviço do ecossistema proporcionado pelo sequestro de carbono (Tabela 9) é valorado com recurso ao preço de um bem substituto para o qual existe um mercado: os direitos de emissão (EU ETS) instituídos pela União Europeia (Mendes, 2021; Lopes e Cunha-e-Sá, 2014).

As áreas de castanheiro que apresentam maior potencial de valorização com recurso ao preço dos mercados de licenças de emissão de CO₂ são as correspondentes aos povoamentos de castanheiro florestal de alto fuste, na melhor classe de qualidade, e os povoamentos de talhadia, com valores acima de 900,00 € ha⁻¹ ano⁻¹, podendo aproximar-se dos 1150,00 € ha⁻¹ ano⁻¹. Para estes casos, o sequestro médio anual de CO₂ das áreas de castanheiro varia entre 12,70 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 13,6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para os 23-24 anos, por isso próximos aos 14,41 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ indicados por Nunes et al. (2013) para a espécie aos 28 anos.

Os piores cenários de valoração foram os das classes de qualidades baixas e medianas nos soutos de ambas as densidades, valores esses que segundo as estimativas não ultrapassariam os 150,00 € ha⁻¹ ano⁻¹. Nessas áreas o sequestro médio anual de CO₂ não ultrapassou 1,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, indo de encontro ao trabalho de Menéndez-Miguélez et al. (2023) em Espanha, onde, para os soutos da pior classe de qualidade, aos 20 anos de idade, são apontados valores próximos de 1,1 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Nas estimativas dos soutos para a melhor classe de qualidade, os sequestros médios anuais de CO₂ foram de 4,86 e 5,39 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para a menor e maior densidade, respectivamente, o que poderia render valores próximos de 450,00 € ha⁻¹ ano⁻¹ como complemento da orientação principal que é a produção de castanha. Por fim, para os povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste nas classes de qualidade mediana e inferior, os valores médios anuais de sequestro de CO₂ ficaram entre 5,28 e 8,45 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, o que corresponde a valores entre 440,00 e 710,00 € ha⁻¹ ano⁻¹.

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos concluiu-se que:

- I. Os povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste armazenaram, em média, considerando as três classes de qualidade de sítio estudadas (SI 4-5, SI 7-9, e SI 10-12), respectivamente 33, 52 e 87 Mg ha⁻¹ de carbono na biomassa das plantas aos 23 anos;
- II. Na classe de qualidade superior, os sotos com densidade 7mx7m e 10mx10m, a que correspondem 204 e 100 por hectare, repetivamente, podem acumular, valores de carbono na biomassa próximos de 38 Mg ha⁻¹ e 33 Mg ha⁻¹, respetivamente. Nas classes medianas e inferiores para ambas as densidades os valores de carbono armazenado ficaram abaixo de 15 Mg ha⁻¹;
- III. A classe de qualidade da estação influencia no sequestro e armazenamento de carbono e conseqüentemente no potencial de valorização pelo que existe todo o interesse em plantar castanheiro em boas estações de qualidade também do ponto de vista do carbono.
- IV. O carbono encontrado na biomassa nas 4 diferentes parcelas de castanheiro florestal em manejo de talhadia apresentou uma variação menor comparada ao alto fuste e sotos, sendo que o valor máximo armazenado aos 24 anos foi de 122 Mg ha⁻¹, na parcela para médias dimensões (2 varas/touça), e o mínimo foi de 103 Mg ha⁻¹, na parcela para grandes dimensões (1 vara/touça);
- V. Os valores de carbono orgânico encontrados nos solos dos povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste, nas três classes de qualidade foram 10,09 Mg ha⁻¹, 18,50 Mg ha⁻¹ e 31,90 Mg ha⁻¹, da pior para a melhor classe, de forma respectiva. Para a área de talhadia, o valor encontrado foi de 38,80 Mg ha⁻¹ com base na análise da rotação anterior.
- VI. Considerando os estoques totais de carbono armazenado no sistema solo/planta nas áreas estudadas, o valor máximo encontrado foi de 160 Mg ha⁻¹ nas áreas de talhadia. Nos povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste os valores máximos atingidos nas diferentes classes de qualidade variaram de 43 a 111 Mg ha⁻¹. Nos sotos, o carbono total armazenado variou

de 24 a 56 Mg ha⁻¹, considerando os valores máximos e mínimo entre as duas densidades e as três classes de qualidade;

- VII. Os valores de carbono armazenado, convertidos em CO₂ sequestrado anualmente, apresentaram médias que variaram entre 5,28 e 12,70 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ nos povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste; 0,31 e 5,39 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ para os sotos considerando as duas densidades estudadas e 10,72 a 13,65 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ para a talhadia;
- VIII. O potencial de valoração para o sequestro de CO₂, considerando os valores máximos das áreas estudadas, com base em valores médios de pagamento de direitos de emissões de CO₂ (EU ETS), poderá chegar a valores de rendimento de até 453,00 € ha⁻¹ ano⁻¹ para o castanheiro em sistema agroflorestal (sotos), 1066 € ha⁻¹ ano⁻¹ para os povoamentos de castanheiro florestal em alto fuste, e 1146 € ha⁻¹ ano⁻¹ para os povoamentos de castanheiro em talhadia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Addo-Danso, S. D., Prescott, C. E., & Smith, A. R. (2016). Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. *Forest Ecology and Management*, 359, 332–351. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015>
- Agroconsultores e Coba. (1991). Carta de solos do Nordeste de Portugal, Lisboa.
- Álvarez-Álvarez, P., Díaz-Varela, E., Cámara-Obregón, A., & Afif-Khoury, E. (2010). Relating growth and nutrition to site factors in young chestnut plantations established on agricultural and forest land in northern Spain. *Agroforestry Systems*, 79(3), 291–301. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9313-z>
- Amorini, E., Chatziphilippidis, G., Ciancio, O., Castri, F. d., Giudici, F., Leonardi, S., Manetti, M. C., Nocentini, S., Pividori, M., Rapp, M., Romane, F., Sevrin, E., & Zingg, A. (2000). An introductory summary. Sustainability of chestnut forest ecosystems: Is it possible?. *Ecologia mediterranea*, 26(1), 314. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2000.1887>
- Arcusa, S., & Sprenkle-Hyppolite, S. (2022). Snapshot of the Carbon Dioxide Removal certification and standards ecosystem (2021–2022). *Climate Policy*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2094308>
- Armsworth, P. R., Chan, K. M. A., Daily, G. C., Ehrlich, P. R., Kremen, C., Ricketts, T. H., & Sanjayan, M. A. (2007). Ecosystem-Service Science and the Way Forward for Conservation. *Conservation Biology*, 21(6), 1383–1384. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00821.x>
- Arrobas, M., Silva, J., Busato, M. R., Ferreira, A. C., Raimundo, S., Pereira, A., Finatto, T., de Mello, N. A., Correia, C. M., & Rodrigues, M. Â. (2023). Large Chestnut Trees Did Not Respond to Annual Fertiliser Applications, Requiring a Long-Term Approach to Establishing Effective Fertilisation Plans. *Soil Systems*, 7(1), 2. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010002>

- Babiker, M., Reilly, J. M., & Jacoby, H. D. (2000). The Kyoto Protocol and developing countries. *Energy Policy*, 28(8), 525–536. [https://doi.org/10.1016/s03014215\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/s03014215(00)00033-1)
- Borges, O., Raimundo, F., Martins, A., Coutinho, J., & Madeira, M. (2013). Efeitos da gestão do solo no sequestro de carbono e na sustentabilidade do sistema “soutos”. Actas do Encontro Anual da SPCS 2013, Oeiras
- Barnet, J. (2003) Security and climate change. *Global and environmental Change*, 13(1), 7-17. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(02\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00080-8)
- Bourgeois, C., Sevrin, E., Lemaire, J. (2004). *Le châtaignier un arbre, un bois*. IDF, 2^a ed., Paris, 347 p.
- Bohringer, C., & Vogt, C. (2003). Economic and environmental impacts of the Kyoto Protocol. *Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne d'Économique*, 36(2), 475–496. <https://doi.org/10.1111/1540-5982.t01-1-00010>
- Bradford, J. B., Weishampel, P., Smith, M.-L., Kolka, R., Birdsey, R. A., Ollinger, S. V., & Ryan, M. G. (2010). Carbon pools and fluxes in small temperate forest landscapes: Variability and implications for sampling design. *Forest Ecology and Management*, 259(7), 1245–1254. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.009>.
- Bueis, T., Bravo, F., Pando, V., & Turrión, M. (2016). Relationship between environmental parameters and *Pinus sylvestris* L. site index in forest plantations in northern Spain acidic plateau. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 9(3), 394–401. <https://doi.org/10.3832/ifor1600-008>
- Calel, R. (2013). Carbon markets: a historical overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 4(2), 107–119. <https://doi.org/10.1002/wcc.208>
- Change–IPCC. Intergovernmental Panel On Climate 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Switzerland: IPCC).

- Clark, S. L., Marcolin, E., Patrício, M. S., & Loewe-Muñoz, V. (2023). A silvicultural synthesis of sweet (*Castanea sativa*) and American (*C. dentata*) chestnuts. *Forest Ecology and Management*, 539, 121041. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121041>
- Conedera M., Stanga P., Lischer C., & Stöckli V. (2000) Competition and dynamics in abandoned chestnut orchards in southern Switzerland. In: *Ecologia mediterrânea*. 26, p. 101-112.
- Costa, R., Valdivieso, T., Marum, L., Fonseca, L., Borges, O., Soeiro, J., Matos Soares, F., Sequeira, J., Assunção, A., & Correia, P. (2005). Characterisation of traditional portuguese chestnut cultivars by nuclear ssrs. *Acta Horticulturae*, (693), 437- 440. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2005.693.54>
- Couto, J. O. (2018). *A gestão da cadeia de abastecimento sustentável: o negócio da castanha portuguesa* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho]. RepositóriUM.
- Daily, G. (1997), “Nature’s Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems”, *Island Press*, 1997.
- Dazio, E., R., Conedera, M., & Schwarz, M. (2018). Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *Forest Ecology and Management*, 417, 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.031>.
- De Groot, R. S., M. A. Wilson e R. M. J. Boumans (2002), “A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services”, *Ecological Economics*, Vol. 41, pp. 393-408.
- Detwiler, R. P. (1986). Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry*, 2(1), 67–93. <https://doi.org/10.1007/bf02186966>.
- Devan, J. S. e Burkhart, H. E., 1982. Polymorphic site index equations for Loblolly pine based on a segmented polynomial differential model. *For. Sci.*, 28, 3: 544-555.

- Diegues, S. F. (2019). Instalação de Soutos Demonstração com o Porta-Enxerto ColUTAD em Situação Climática Contrastante no NE. [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança], Biblioteca Digital IPB.
- El-Sayed, A., & Kamel, M. (2020). Climatic changes and their role in emergence and re-emergence of diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 22336–22352. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08896-w>
- Fernandes, A. H. B. M.; Salis, S. M. de; Fernandes, F. A.; & Crispim, S. M. A.. (2008). Estoques de carbono do estrato arbóreo de Cerrados no pantanal da Nhecolândia. *Comunicado técnico Embrapa* 68. Corumbá, MS.
- Ferraz, J. M. G. (2003). As dimensões da sustentabilidade e seus indicadores. In Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas. *Embrapa*.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- Gavaland, A., & Pelletier, S. (2006). Multi-purpose management of chestnut: the French situation. *Adv. Hortic. Sci.* 20, 70–81. <https://doi.org/10.1400/14450>
- Gomes-Laranjo, J., Anjos, R., Pinto, T., Ferreira-Cardoso, J., & Peixoto, F., (2015). Distribuição do castanheiro em Portugal. Avaliação do potencial de crescimento da cultura. In Pulido Consulting – Indústria Criativa & Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (Ed.), *Castanheiros, Técnicas e Práticas* (pp.7-24), Vila Real.
- Gómez-Baggethun, E., & Ruiz-Pérez, M. (2011). Economic valuation and the commodification of ecosystem services. *Progress in Physical Geography*, 35(5), 613-628. doi:10.1177/0309133311421708.

- Gonzalez, E. D. R. (2014). Incentivos econômicos e projeto de supply chain para captura e sequestro de carbono: caso Brasil. *Production*, 24(4), 847-860. <https://doi.org/10.1590/s0103-65132014005000008>
- Gopalakrishnan, R., Kauffman, J., Fagan, M., Coulston, J., Thomas, V., Wynne, R., Fox, T., & Quirino, V. (2019). Creating Landscape-Scale Site Index Maps for the Southeastern US Is Possible with Airborne LiDAR and Landsat Imagery. *Forests*, 10(3), 234. <https://doi.org/10.3390/f10030234>
- Haines-Young, & R., Potschin, M., (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In: Raffaelli, D.G., Frid, C.L.J. (Eds.), *Ecosystem Ecology, Eco-logical Reviews*. Cambridge University Press.
- Heal, G. M. (2000). Nature and the marketplace: capturing the value of ecosystem services. *Island Press*. 203 p.
- Higa, R.C.V., Cardoso, D.J., Andrade, G.C., Zanatta, J.A., Rossi, L.M.B., Pulronik, K., Nicodemo, M.L.F., Garrastazu, M.C., Vanconcelos, S., Salis, S.M., (2014). Protocolo De Medição E Estimativa De Biomassa E Carbono Florestal. *Embrapa Florestas*, Colombo.
- IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2003) *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- IPCC. *Mudança Climática 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade*. (2022) Contribuição do Grupo de Trabalho II ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.
- IPCC. Intergovernmental panel on climate change, (2007) WMO, UNEP. *Climate change 2007 the physical science basis, Summary for policymakers*. IPCC WGI Fourth Assessment Report.
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkinen, K., & Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence

- soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137 (3-4), 253-268.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>
- Jesus, I., & Carvalho, M. Â. A. P. (2018). *História, importância e distribuição do castanheiro*. (p. 22). Universidade da Madeira.
- Kazak, J., Malczyk, J., Castro, D. G. & Szewrański, S. (2016) Carbon sequestration in forest valuation. *Real Estate Management and Valuation* 24 (1), 76–86.
<https://doi.org/10.1515/remav-2016-0007>
- Kiran, S. G., & Kinari, S. (2011). Carbon sequestration by urban trees on roadsides of Vadodara city. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(4), 3066–3070
- Kirschbaum, M. U. F., Zeng, G., Ximenes, F., Giltrap, D. L., & Zeldis, J. R. (2019). Towards a more complete quantification of the global carbon cycle. *Biogeosciences*, 16(3), 831–846. <https://doi.org/10.5194/bg-16-831-2019>
- Laurans, Y., Rankovic, A., Billé, R., Pirard, R., & Mermet, L. (2013). Use of ecosystem services economic valuation for decision making: Questioning a literature blindspot. *Journal of Environmental Management*, 119, 208-219.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.008>
- Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M. W. J., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., Plummer, S., Rocca, F., Saatchi, S., Shugart, H., & Ulander, L. (2011). The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2850–2860.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.020>
- Liu, W., Yan, Y., Wang, D., & Ma, W. (2018). Integrate carbon dynamics models for assessing the impact of land use intervention on carbon sequestration ecosystem service. *Ecological Indicators*, 91, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.087>

- Lopes, A.F., Cunha-e-Sá, M.A., 2014. The Economic Value of Portuguese Forests, the Effect of Tree Species on Valuation of Forest Ecosystems. AERNA Congress, September 2014, Girona, Spain, pp 1–29.
- Luís JFS, & Monteiro ML (1998) Dynamics of a broadleaved (*Castanea sativa*) conifer (*Pseudotsuga menziesii*) mixed stands in Northern Portugal. *For Ecol Manag* 107:183–190 [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00341-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00341-1)
- Machado, P. L. O. A. (2005). Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, 28(2), 329–334. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422005000200026>
- Mantovani, L. E, & Fritzens. E. Uso de previsões meteorológicas e climáticas no setor agroflorestal e ambiental [recurso eletrônico] / Luiz Eduardo Mantovani, Elenice Fritzens. - Dados eletrônicos. - Colombo: *Embrapa Florestas*, 2010.
- Martins, A., Marques, G., Borges, O., Portela, E., Lousada, J., Raimundo, F., & Madeira, M. (2010). Management of chestnut plantations for a multifunctional land use under Mediterranean conditions: effects on productivity and sustainability. *Agroforestry Systems*, 81(2), 175–189. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9355-2>
- Martins, C. R., Pereira, P. A. P., Lopes, W. A., & Andrade, J. B. (2003). Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: A importancia na química da atmosfera. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*, (5), 28–41.
- Mendes, A. S. C. (2021). Quanto vale a floresta portuguesa? O valor contabilizado e o desconhecido. *Florestas – Conhecer, valorizar e cuidar da floresta portuguesa*. <https://florestas.pt/academia/quanto-vale-a-floresta-portuguesa-o-valor-contabilizado-e-o-desconhecido-por-americo-mendes/>
- Menéndez-Miguélez, M., Álvarez-Álvarez, P., Pardos, M., Madrigal, G., Ruiz-Peinado, R., López-Senespleda, E., Del Río, M., & Calama, R. (2023). Development of tools to estimate the contribution of young sweet chestnut plantations to climate-change mitigation. *Forest Ecology and Management*, 530, 120761. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120761>

- Monteiro, M. L.; Patrício, M. S. (2007). Conservação, regeneração e exploração do castanheiro. In Silva, Joaquim Sande (ed.) *Do castanheiro ao teixo: as outras espécies florestais* Lisboa: Público, Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento. p. 51-78. ISBN 978-989-619-102-3
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. (2005). *Producción de biomassa y fijación de CO2 por los bosques españoles*. Monografías INIA. Serie Florestal N°13-2005.
- Nunes, L., Coutinho, J., Nunes, L., Rego, F. & Lopes, D. (2011). Growth, soil properties and foliage chemical analysis comparison between pure and mixed stands of *Castanea sativa* Mill. and *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, in Northern Portugal. *Forest System*. 20 (3), 496–507. <https://doi.org/10.5424/fs/20112003-11104>
- Nunes, L., Gower, S., Monteiro, M., Lopes, D., & Rego, F. (2014). Growth dynamics and productivity of pure and mixed *Castanea sativa* Mill. and *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco plantations in northern Portugal. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 7(2), 92–102. <https://doi.org/10.3832/ifor1087-007>
- Omasa, K., Qiu, G. Y., Watanuki, K., Yoshimi, K., & Akiyama, Y. (2003). Accurate Estimation of Forest Carbon Stocks by 3-D Remote Sensing of Individual Trees. *Environmental Science & Technology*, 37(6), 1198–1201. <https://doi.org/10.1021/es0259887>
- Pache, R.-G., Abrudan, I. V., & Niță, M.-D. (2020). Economic Valuation of Carbon Storage and Sequestration in Retezat National Park, Romania. *Forests*, 12(1), 43. <https://doi.org/10.3390/f12010043>
- Patrício, M.S., (2006). Análise da potencialidade produtiva do castanheiro em Portugal. [Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa], Instituto Superior de Agronomia, 232 p.
- Patrício MS., Monteiro M. L. & Tomé M. (2005). Biomass Equations for *Castanea sativa* High Forest in the Northwest of Portugal. *Acta Hortc.* 693: 727-732.

- Patrício, M.S.; Tomé, M.; Monteiro, M.L. (2005). Tabela de Produção para o Castanheiro em Regime de Alto Fuste. In Actas do 5º Congresso Florestal Nacional. Viseu.
- Patrício M.S. & Nunes L. (2017). Density management diagrams for sweet chestnut high-forest stands in Portugal. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10: 865-870. <https://doi.org/10.3832/ifor2411-010>.
- Patrício, M.S., Nunes, L., Monteiro, M.L. (2020). Does the application of silvicultural management models drive the growth and stem quality of sweet chestnut coppices towards sustainability? *New Forests*, 51:615–630. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09748-3>
- Pelayo, Á. V., & Serrano, J. F. (2020). *Guía de buenas prácticas en el cultivo, tratamiento y comercialización del castaño*. Imprenta Manolete.
- Pereira, H. M., Domingos, T., Vicente, L., & Proença, V. (eds.) (2009). Ecosistemas e bem-estar humano: avaliação para Portugal do Millennium Ecosystem Assessment. *Escolar Editora*. Lisboa.
- Pereira, J. G., & Abreu, C. P. (1987). O castanheiro em Portugal situação e perspectivas. *Gaz. Aldeias*, 2940: 16-21.
- Pereira, J., Sequeira, C., Castro, L., Cardoso, J., & Fernandes, A. (1992). Estudo sobre a Composição Química e Valor Nutritivo da Castanha, Visando a Sua Transformação Agro-Industrial. *PEDIP – Relatório Final de Actividades*. UTAD. Vila Real
- Pereira-Lorenzo, S., & Fernandez-Lopez, J. (1997). Propagation of chestnut cultivars by grafting: Methods, rootstocks and plant quality. *Journal of Horticultural Science*, 72(5), 731–739. <https://doi.org/10.1080/14620316.1997.11515565>.
- Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S.J., Joosten, H., Holmgren, P., Lehtonen, A., Menton, M.C.S., Pullin, A.S., & Wattenbach, M. (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in 92 terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence* 1 (6). pp. 21.

- Prada, M., Bravo, F., Berdasco, L., Canga, E., & Martínez-Alonso, C. (2016). Carbon sequestration for different management alternatives in sweet chestnut coppice in northern Spain. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1161–1169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.041>.
- Raimundo F, Pires AL, Fonseca S, Martins A, & Madeira M. (2004). Produção de castanha e de folhada e concentração de nutrientes nas folhas de sotos detectados a diferentes sistemas de mobilização do solo. *Revista De Ciências Agrárias*. 32:245–257.
- Raupach, M. R., Marland, G., Ciais, P., Le Quere, C., Canadell, J. G., Klepper, G., & Field, C. B. (2007). Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(24), 10288–10293. <https://doi.org/10.1073/pnas.0700609104>
- Raymond, C. M., Singh, G. G., Benessaiah, K., Bernhardt, J. R., Levine, J., Nelson, H., Turner, N. J., Norton, B., Tam, J., & Chan, K. M. A. (2013). Ecosystem Services and Beyond: Using Multiple Metaphors to Understand Human–Environment Relationships. *BioScience*, 63(7), 536–546. <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.7.7>
- Reis, P., Rolo, J., Coelho, I., & Belo, C.C. (2014). Sistemas agroflorestais em Portugal continental: Parte I: economia e distribuição geográfica. *Revista de Ciências Agrárias* 37:113-121 . <https://doi.org/10.19084/rca.16805>
- Rodrigues, M. Â., Raimundo, S., Pereira, A., & Arrobas, M. (2020). Large Chestnut Trees (*Castanea sativa*) Respond Poorly to Liming and Fertilizer Application. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 1261–1270. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00210-4>
- Sanquetta, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. (2022) In: Sanquetta, C. R. et al. (Eds.). *As florestas e o carbono*. Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.
- SendeCO₂. (2023). Precios CO₂ - Sendeco2. <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

- Sharma, M., Amateis, R. L. & Burkhart, H. E., (2002). Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *For. Ecol. Manage.*, 168: 163-175.
- Souza, A., Paiva, D., Andrade, J., Silva Junior, A., & Goulart, R. (2012). O Mercado Internacional de Créditos de Carbono: Estudo Comparativo entre as Vertentes Regulada e Voluntária no Brasil no Período de 2004 a 2011. *Sistemas & Gestão*, 7(4), 526–544. <https://doi.org/10.7177/sg.2012.v7.n4.a2>
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- Vale, D. M. M. (2014). Sequestro de carbono pela floresta portuguesa: possíveis cenários de valorização económica [Dissertação de Mestrado, Repositório Aberto da Universidade do Porto.]. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/76846>