



Mapeamento da dinâmica do carbono na Reserva da Faia Brava

Paula Krummreich Schumann

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária do Instituto
Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em
Tecnologia Ambiental*

Orientado por:

Professor Doutor João Carlos Martins Azevedo
Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca

Bragança, novembro de 2023



Mapeamento da dinâmica do carbono na Reserva da Faia Brava

Paula Krummreich Schumann

Orientado por:

Professor Doutor João Carlos Martins Azevedo
Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca

Bragança, novembro de 2023

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e ao sistema de ensino público brasileiro, pois foi pela mobilidade acadêmica internacional, que as oportunidades se abriram e eu pude ingressar em um mestrado em Portugal.

Obrigada aos professores *Doutor João Azevedo* e *Doutora Felícia Fonseca* por terem aceitado me orientar neste trabalho e pelas contribuições prestadas.

Aos meus pais, *Paulo Roberto Schumann* e *Agnes Schumann*, e minha irmã *Cibele Schumann* pelo amor de sempre. A minha dinda *Darlei Bonow* por sempre lembrar de mim em todos os momentos, e por ser uma grande incentivadora desta conquista, dizendo sempre o quão orgulhosa é de mim.

Mudar de país, de ambiente e ter que encontrar novos amigos é muito desafiador. Por isso agradeço aos meus amigos de longa data, por sempre me motivarem a estar onde eu estou, a nunca desistir mesmo com as dificuldades, e por sempre mandarem mensagens de conforto, mesmo com a distância física entre a gente. Em especial a *Betânia Bierhals*, ao *Hans Maltzhan*, a *Letícia Ost* e a *Thaís Figueiredo*.

Um agradecimento especial a *Ana Carolina Farias*, que embarcou comigo nesta jornada de morar em outro país em 2021, que finalizou a graduação junto comigo aqui em Portugal e que aceitou ingressar no mestrado sendo minha colega novamente. Muito obrigada por ser meu ombro amigo quando mais precisei, nunca esquecerei do que você fez por mim, obrigada por todos os momentos vividos e compartilhados.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer ao amor da minha vida, *João Jorge Coelho*, por ser o maior incentivador deste mestrado, por demonstrar seu amor por mim todos os dias, em falas e ações. Obrigada por me ajudar quando mais precisei, por me apoiar, por acreditar no meu potencial e dizer isso literalmente todos os dias até a conclusão desta dissertação, obrigada pelas palavras de conforto, pelo amor e principalmente por me fazer sentir em casa, é ao seu lado que tudo fica mais fácil.

Resumo

A preocupação com o aumento dos Gases de Efeito de Estufa (GEE) através dos níveis de CO₂ na atmosfera, tem contribuído para diversos estudos acerca de soluções que busquem a redução e formas de mitigação. Neste sentido, avaliar o serviço de ecossistema (SE) de regulação do clima através do sequestro e armazenamento de carbono surge como uma ferramenta importante para auxiliar a gestão e tomada de decisões. Desta maneira, esta dissertação teve como objetivo o mapeamento da dinâmica do carbono armazenado e sequestrado na Reserva da Faia Brava com base nas alterações observadas no uso e ocupação do solo entre 1995 e 2018. Para quantificar o sequestro, mapear e valorizar o armazenamento de carbono no solo, utilizou-se a ferramenta de modelação InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs*), em particular o modelo *Carbon storage and sequestration*. Para o mapeamento, a avaliação baseou-se na interpretação das alterações da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) e na recolha de dados referente a quatro reservatórios de carbono utilizados na modelação. Foram ainda construídos dois cenários hipotéticos de uso do solo para a região de estudo projetados para o ano de 2041 a fim de avaliar de que forma possíveis alterações na paisagem podem influenciar o SE de regulação do clima. Os resultados obtidos indicaram que os diferentes usos do solo promovem diferentes níveis de armazenamento de carbono e que o solo é o principal reservatório de carbono na paisagem, contribuindo com mais de 80% de todo o carbono estimado na região de estudo. Para uma área de 945,60 ha, em 1995 a paisagem armazenava 94 720,93 tC, passando para 94 818,1 tC em 2018. Foi observado que a classe de uso do solo que mais contribuiu para este armazenamento foi a dos Matos, seguido de Florestas. Para o período de 1995 a 2018 obteve-se uma valorização de 10 054,68 € para o carbono sequestrado. Nos cenários hipotéticos para 2041 foi possível observar que em ambos os casos a expansão das áreas florestais na paisagem pode impulsionar o processo de sequestro de carbono (99 793,52 tC), principalmente no cenário de expansão da área florestal, proporcionando, conseqüentemente, uma maior valorização do SE de regulação climática (516 284,30 €). A avaliação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) possibilitou analisar e quantificar a percentagem de coberto vegetal da área de estudo. Por fim, a utilização de ferramentas de análise do armazenamento e sequestro de carbono tornam-se importantes instrumentos para a tomada de decisões para a gestão do ambiente no sentido de avaliar os efeitos das alterações da paisagem na regulação climática e conseqüentemente na geração de benefícios para a sociedade.

Palavras-chave: simulação, armazenamento e sequestro de carbono; InVEST; valorização

Abstract

The concern over the increase of Greenhouse Gas Emissions (GHGs) through CO₂ levels in the atmosphere has contributed to numerous studies on solutions aimed at reduction and mitigation. In this context, evaluating the Ecosystem Service (ES) of climate regulation, such as carbon sequestration and storage, emerges as a crucial tool to aid in management and decision-making. Therefore, the objective of this dissertation was to map the dynamics of carbon stored and sequestered in the Faia Brava Reserve, based on observed changes in land cover between 1995 and 2018. For quantifying sequestration, mapping, and valuing carbon storage in the soil, was used the environmental modeling InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs), in particular the model Carbon storage and sequestration. For mapping, the assessment relied on the interpretation of changes in the Land Use and Land Cover Map (LULC) and the collection of data regarding four carbon reservoirs used in the modeling. Additionally, two hypothetical scenarios were constructed for the study area projected for the year 2041, to assess how potential alterations might influence the ES of climate regulation. The obtained results confirmed that, different land usage promotes different carbon storages, with soils organic matter being the primary carbon reservoir in the landscape, contributing to more than 80% of all simulated carbon in the study region. For an area of 945.60 ha, at 1995 the landscape stored 94,720.93 tC, increasing to 94,818.10 tC in 2018. It was observed that the land use contributing the most to this storage is the scrubland class, followed by forested areas. From 1995 to 2018, a valuation of € 10,054.68 was obtained for the sequestered carbon. In the hypothetical scenarios for 2041, it was possible to observe that for those situations, the expansion of forest areas in the landscape can boost the carbon sequestration process (99,793.52 tC ha⁻¹), particularly in the scenario of forest area expansion, consequently providing a higher valuation (€ 516,284.30) of the SE of climate regulation. The evaluation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) enabled the analysis and quantification of the percentage of vegetation cover for the region. Ultimately, the use of tools for analysis of carbon storage and sequestration becomes crucial instruments for decision-making for environmental management in order to evaluate the effects of landscape changes on climate regulation and, consequently, providing benefits for society.

Keywords: simulation, carbon storage and sequestration; InVEST; valuation

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Lista de Tabelas	x
Lista de Figuras	xi
Abreviaturas e siglas.....	xii
1. Introdução.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Estrutura do documento	16
2. Revisão Bibliográfica	17
2.1 Ciclo do Carbono.....	17
2.2 Carbono no solo.....	18
2.3 Alterações climáticas	19
2.4 Serviços de Ecossistema.....	21
2.5 Sequestro e armazenamento de carbono.....	23
2.6 Valoração e mercados de carbono	24
3. Metodologia.....	28
3.1 Área de estudo	28
3.2 Uso e Ocupação do Solo.....	32
3.2.1 Matriz de transição	35
3.3 Dinâmica do carbono.....	36
3.3.1 <i>Software</i> InVEST.....	36
3.3.2 Construção de cenários de alteração da paisagem.....	39
3.3.3 Reservatórios de carbono.....	40
3.3.4 Valoração do sequestro de carbono	43
3.5 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)	44
4. Resultados e Discussão.....	47
4.1 Alterações do uso e ocupação do solo para avaliação da dinâmica do carbono... 47	
4.1.1 Matriz de transição	48
4.2 Armazenamento e sequestro de carbono	52

4.3 Valoração do carbono sequestrado (1995 - 2018).....	58
4.4 Dinâmica do carbono associada a cenários de alterações na paisagem (2018 - 2041)	59
4.5 Avaliação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	63
5. Conclusões e trabalhos futuros	66
6. Bibliografia.....	68
Anexo	80

Lista de Tabelas

Tabela 1: Categorias dos serviços de ecossistema.....	22
Tabela 2: Estimativas do carbono armazenado por reservatório e classe de uso e ocupação do solo na Reserva da Faia Brava.....	41
Tabela 3: Área ocupada por classes de uso e ocupação do solo em 1995 e 2018 na Reserva da Faia Brava	47
Tabela 4: Matriz de transição em área entre classes de uso e ocupação do solo entre 1995 (linhas) e 2018 (colunas) na Reserva da Faia Brava.	50
Tabela 5: Matriz de probabilidades de transição entre classes de uso e ocupação do solo na Reserva da Faia Brava entre 1995 e 2018.....	51
Tabela 6: Ocupação das classes para os anos de análise (1995, 2018 e 2041).....	52
Tabela 7: Carbono armazenado por classe de uso e ocupação do solo (tC ha ⁻¹) e na paisagem (tC) na RFB	55
Tabela 8: Distribuição das áreas da Reserva da Faia Brava por classes definidas com base no índice NDVI	63

Lista de Figuras

Figura 1: Precipitação Média Anual (PMA) (esquerda) e quantidade de carbono orgânico (direita) em Portugal Continental	19
Figura 2: Fluxo de receita com a utilização de créditos de carbono.....	26
Figura 3: Mapa de localização da Reserva da Faia Brava em Portugal (esquerda) e delimitação da área protegida (direita)	29
Figura 4: Detalhe da RFB onde se destaca a dominância de afloramentos rochosos predominantemente graníticos presentes na região de estudo.....	31
Figura 5: Classificação do Uso e Ocupação do Solo para a área de estudo em 1995 (A) e 2018 (B).....	33
Figura 6: Locais na RFB com solo exposto e afloramentos rochosos.....	45
Figura 7: Percentagem de carbono na paisagem para cada reservatório em 1995 (A) e 2018 (B).....	53
Figura 8: Carbono armazenado por reservatório e classe de uso e ocupação do solo na RFB.....	54
Figura 9: Armazenamento de carbono na Reserva da Faia Brava ($tC\ ha^{-1}$) em 1995 (A) e 2018 (B).....	57
Figura 10: Mapas do uso e ocupação do solo na RFB de acordo com as projeções dos cenários 1 (A) e 2 (B).	60
Figura 11: Armazenamento de carbono ($t\ ha^{-1}$) em 2018 (A) e no cenário 1 (B)	61
Figura 12: Armazenamento de carbono ($t\ ha^{-1}$) em 2018 (A) e no cenário 2 (B)	62
Figura 13: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para a RFB	64

Abreviaturas e siglas

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
APP	Área Protegida Privada
ATN	Associação Transumância e Natureza
CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissão
COP	Conferência das Partes
COS	Carta de Uso e Ocupação do Solo
DGT	Direção-Geral do Território
EUA	<i>European Union Allowances</i>
GEE	Gases de Efeito de Estufa
IBA	<i>Important Bird Area</i>
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
InVEST	<i>Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
NCP	<i>Natural Capital Project</i>
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
PMA	Precipitação Média Anual
RFB	Reserva da Faia Brava
SAF	Sistemas agroflorestais
SE	Serviços de Ecossistema
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SCP	<i>Semi-Automatic Classification Plugin</i>
UMC	Unidade Mínima Cartográfica

Capítulo 1

1. Introdução

A alteração nos padrões de uso da terra tem-se revelado como um dos principais fatores para o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) (Hörtenhuber et al., 2018). Neste sentido, o conceito de serviços de ecossistema (SE) é cada vez mais aplicado pelos tomadores de decisões que procuram aumentar os prováveis benefícios dos ecossistemas no bem-estar humano (Braat & de Groot, 2012), como formas de mitigação de impactos ambientais. A investigação desses serviços desempenha um papel fundamental no aprofundamento da compreensão das relações entre a natureza e a humanidade. Porém, para que os serviços de ecossistema sejam úteis na prática, devem ser quantificados e mapeados para identificar os riscos, impactos e potenciais compromissos associados às alterações ambientais previstas ou conhecidas, ou entre diferentes cenários de alterações (Malinga et al., 2015).

Segundo Amaral et al. (2017) para a mitigação da emissão de Gases de Efeito de Estufa (GEE), existe o sequestro e armazenamento de carbono, que envolve a remoção de carbono da atmosfera e sua subsequente retenção na forma de biomassa e incorporação no solo. O processo de sequestro e armazenamento de carbono gera quantidades de matéria orgânica no solo crescentes. Quando equilibrado de maneira adequada, esse processo de fixação de carbono no solo é um dos principais serviços de ecossistema que contribuem para o bem-estar humano pela mitigação de alterações climáticas. Deste modo, compreender e modelar esse processo permite o controle e a otimização de carbono do solo, bem como reduzir a quantidade de GEE na atmosfera.

Portanto, a avaliação da dinâmica do carbono pode ser vista como uma ferramenta de gestão do ambiente e dos ecossistemas, e a análise do sequestro de carbono como uma alternativa de alinhar medidas de gestão com o desenvolvimento económico. O modelo InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs*), utilizado neste trabalho, possui potencial para avaliar este serviço de ecossistema para uma Área Protegida Privada (APP) em Portugal, a Reserva da Faia Brava (RFB). Assim, a análise de eventuais mudanças no uso e ocupação do solo, bem como a avaliação da forma como

estas alterações podem influenciar o fornecimento de serviços de ecossistema, podem auxiliar a tomada de decisões e a gestão do ambiente.

1.1. Objetivos

Esta dissertação visa analisar e mapear a dinâmica do carbono entre 1995 e 2018 e valorar o serviço de ecossistema de regulação do clima (sequestro de carbono) na Reserva da Faia Brava (RFB), uma Área Protegida Privada (APP) localizada no centro-norte de Portugal, e projetar os processos relacionados com o carbono com base em cenários de alteração da paisagem no futuro.

Possui ainda os seguintes objetivos específicos:

- Quantificar os reservatórios de carbono de diferentes classes de uso e ocupação do solo;
- Analisar a distribuição espacial do carbono armazenado e sequestrado à escala da paisagem na área de estudo;
- Analisar a dinâmica do carbono associada às alterações na paisagem no período 1995 - 2018 e às alterações projetadas para o futuro;
- Valorar o armazenamento/sequestro de carbono na paisagem no mesmo período;
- Mapear o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na RFB.

1.2. Estrutura do documento

A presente dissertação é dividida em cinco capítulos. No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução sobre o tema abordado, seguido dos objetivos e a estrutura do documento. O Capítulo 2 desenvolve o estado da arte, sendo composto por uma revisão bibliográfica sobre o carbono, a sua relação com as mudanças climáticas, os acordos internacionais acerca do tema, a importância dos serviços de ecossistema e, por fim, os métodos para avaliar sequestro, armazenamento e valoração do carbono. No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada, incluindo a área de estudo, etapas da obtenção dos dados, o *software* InVEST, contemplando a estrutura utilizada para a simulação, os cenários hipotéticos para a região de estudo e, por fim, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para a área de estudo. No Capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados, e no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho e possibilidades de trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Ciclo do Carbono

O carbono é um elemento químico essencial para a vida e está presente em todos os seres vivos. O ciclo do carbono, considerando as influências humanas, é o processo pelo qual o carbono se movimenta através de cinco grandes sistemas: i) a atmosfera, ii) os oceanos, iii) os solos, iv) a biomassa vegetal e por fim, v) as reservas geológicas. O carbono pode ser encontrado em diversas formas, como dióxido de carbono (CO_2), bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e na forma de matéria orgânica (Gallardo & Merino, 2007).

O dióxido de carbono, absorvido pelas plantas durante a fotossíntese, inicia o processo do ciclo do carbono. Após a absorção, o carbono é transformado em compostos orgânicos que são utilizados como fonte de energia para a atividade fisiológica e crescimento das plantas. Do mesmo modo, outras transferências são realizadas neste processo, entre a atmosfera e os oceanos, como a troca de gases e sedimentação, e também, através do processo de decomposição de matéria orgânica e a formação geológica de rochas sedimentares (Taiz & Zeiger, 2004).

O ciclo do carbono é deveras importante pois tem ligação com a regulação térmica do planeta. O dióxido de carbono é considerado um Gás de Efeito de Estufa (GEE) cuja concentração tem aumentado exponencialmente na atmosfera como consequência de atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis ou a transformação de florestas em áreas de agricultura, contribuindo para as mudanças climáticas e o aquecimento global. Assim, a gestão do carbono e a total compreensão do seu ciclo são ferramentas importantes para a conservação do ambiente e alcançar a sustentabilidade (IPCC, 2018).

2.2. Carbono no solo

O solo representa o maior reservatório de carbono na biosfera terrestre e desempenha um papel fundamental no funcionamento de todos os ecossistemas, bem como, possui potencial para atenuar as emissões de GEE (Paustian et al., 2016), pois absorve o CO₂ da atmosfera por meio do processo de fotossíntese.

O solo representa um recurso vital para a vida na Terra. No entanto, as demandas humanas sobre este recurso estão alcançando níveis críticos. Por essa razão, a gestão adequada do solo é essencial para preservar os serviços de ecossistema específicos de cada região do planeta (FAO, 2015).

O carbono é incorporado no solo através da acumulação e decomposição de resíduos vegetais, dando origem ao armazenamento de carbono orgânico no solo. É importante destacar que a quantidade e qualidade da camada de material orgânico produzida, assim como a taxa de decomposição, são fatores determinantes para esse armazenamento. Esses aspetos são influenciados por variáveis como temperatura, umidade, composição da biomassa e atividade biológica do solo (Gonçalves et al., 2013; Fonseca & Figueiredo, 2018).

De acordo com Madeira et al. (2004), a quantidade de carbono orgânico nos solos de Portugal Continental até à profundidade de 30 cm varia em diferentes locais, dependendo dos níveis de precipitação e variação de altitude. Locais com precipitação média anual inferior a 600 mm, possuem valores mais baixos de carbono, aumentando estes valores com o aumento da precipitação, como indicado na Figura 1.

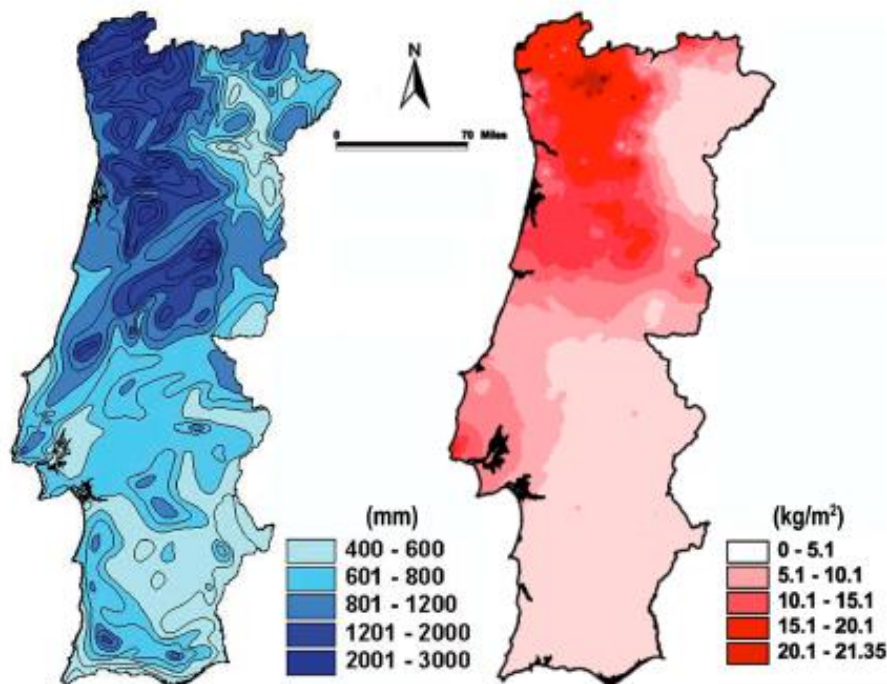


Figura 1: Precipitação Média Anual (PMA) (esquerda) e quantidade de carbono orgânico (direita) em Portugal Continental, (Madeira et al., 2004).

2.3 Alterações climáticas

O IPCC, define alterações climáticas como as mudanças de clima no tempo devido à variabilidade natural e/ou resultado das atividades humanas, podendo gerar significativos impactos na sociedade e no ambiente (Parry et al., 2007). As alterações climáticas possuem reconhecimento científico pela comunidade académica e também pela humanidade que enfrenta as implicações e influências em seu cotidiano, como a ocorrência de fenómenos hidrometeorológicos extremos, bem como o aumento dos impactos nos diferentes processos que ocorrem no ciclo hidrológico e, em particular, nos ambientes florestais, como a ocorrência direta de incêndios e alterações de condições ambientais em relação à invasão de espécies exóticas, que conseguem se adaptar ao ambiente com mudança nos parâmetros climáticos de um dado local (Brulle & Dunlap, 2015).

As mudanças climáticas estão intimamente ligadas ao fenómeno de desertificação (MEA, 2005b). Esse fenómeno resulta em variações na abundância de espécies,

alterações na estrutura da comunidade biótica e na diversidade biológica. Isso culmina na perda de biodiversidade, incluindo a diminuição de nutrientes e umidade do solo, a redução na sua conservação e, conseqüentemente, uma diminuição na diversidade biológica. Todos esses fatores combinados levam à degradação da fertilidade do solo, contribuindo assim para o processo de desertificação.

Como forma de amenizar as alterações climáticas e de conscientizar a humanidade pelos efeitos trazidos pelas atividades antrópicas intensas, faz-se necessário reduzir as emissões de GEE através de políticas públicas e também pela mudança de conduta da sociedade em geral. Diante do exposto, a aplicação de políticas públicas e acordos internacionais torna-se imprescindível, pois em conjunto, os acordos coordenam, fortalecem e estabelecem metas e compromissos (UNCFFF, 2023). A colaboração de diversos países é crucial, visto que as emissões de GEE não respeitam fronteiras nacionais, além dos acordos estimularem a economia do carbono, equilibrando as responsabilidades dos países em relação às mudanças climáticas e a sua mitigação (Fermanian, 2019).

Um instrumento importante para a cooperação em nível global na redução das emissões de GEE são os acordos internacionais. Além dos acordos internacionais, existem políticas públicas de cada país, acordos bilaterais e multilaterais, todos visando a melhor adaptação frente às alterações climáticas. Alguns dos principais acordos internacionais sobre mudanças climáticas são a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, em inglês), o Protocolo de Quioto (KP) e o Acordo de Paris.

A UNFCCC foi adotada em 1992 e entrou em vigor em 1994. A UNFCCC é uma Convenção-Quadro que estabelece ações de cooperação internacional com o objetivo de estabilizar a concentração de GEE de forma que, possam ser evitadas interferências perigosas no sistema climático (UNFCCC, 2023). Como órgão supremo da UNFCCC, a Conferência das Partes (COP) reúne representantes de todos os países e acontecem reuniões a fim de avaliar decisões sobre questões relacionadas ao clima; a primeira COP ocorreu no ano de 1995 na Alemanha, e posteriormente, as conferências são realizadas anualmente em diferentes países.

O KP, por sua vez adotado em 1997 e potencializado em 2005, foi o primeiro tratado jurídico internacional que limitou quantitativamente as emissões de GEE dos

países desenvolvidos, ou seja, países industrializados que possuem os maiores níveis históricos de emissões de GEE (APA, s.d.). No protocolo, foi estabelecido o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM, em inglês), a fim de inferir nas reduções dos GEE e, do mesmo modo, contribuir para o desenvolvimento sustentável através também do recebimento de créditos de emissão, denominado Reduções Certificadas de Emissões (MCTI, s.d.).

Por fim, o Acordo de Paris surgiu em 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC realizada em Paris, França. O principal objetivo deste acordo era reforçar o combate à ameaça do aumento da temperatura, alertando para o compromisso primordial da implementação de políticas e medidas para a redução das emissões (UNFCCC, s.d.) a fim de conter o aquecimento global em menos de 2°C, preferencialmente em 1,5°C, em comparação com níveis pré-industriais (UNFCCC, s.d.). O Acordo de Paris adotou uma abordagem pragmática e adaptável, permitindo que cada país determinasse de forma independente o tipo de ação, as condições e as metas de redução de emissões de GEE que melhor se adequassem às suas circunstâncias, por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, em inglês) (Hisamoto, 2022).

2.4 Serviços de Ecossistema

A humanidade tem alterado os ecossistemas a uma velocidade e escala sem precedentes na história da civilização. Isso se deve, em grande parte, à necessidade de atender às crescentes demandas por alimentos, água, madeira, fibras e energia. Contudo, esse processo tem acarretado em uma considerável e, por vezes, irreversível perda da diversidade biológica no planeta Terra (MEA, 2005a). Devido a isso, os serviços de ecossistema (SE), benefícios diretos e indiretos que os seres humanos obtêm dos ecossistemas naturais (Wolff, 2017) surgiram como uma forma de avaliação e quantificação da dependência existente entre o homem e a natureza.

Os SE estão diretamente relacionados com a biodiversidade e dependem de uma série de estruturas e processos ecológicos que são essenciais para manter a vida humana. Os SE incluem uma diversidade muito elevada de benefícios como a purificação da água, a regularização da qualidade do ar, estabilização do clima, controle de pragas e doenças e fertilidade dos solos, entre outros (Braat & de Groot, 2012). Além disso, os SE

desempenham um papel importante na preservação da natureza para o futuro, como a conservação genética e a diversidade de espécies, e também na produção de bens como alimentos e energia, por exemplo (Braat & de Groot, 2012).

De modo a identificar, caracterizar e classificar os SE, desenvolveram-se várias metodologias, sendo as mais conhecidas e utilizadas a do *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA) e o *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES). De acordo com o *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005a), os SE podem ser classificados em serviços de suporte, aprovisionamento, regulação e culturais (Tabela 1).

Tabela 1: Categorias dos serviços de ecossistema, MEA (2005a), adaptado de Madureira et al. (2013).

Serviços de Ecossistema	Descrição
Suporte	“Serviços que fornecem a infraestrutura de vida aos ecossistemas, incluem a produção primária, formação do solo e o ciclo da água e dos nutrientes. Os restantes serviços de ecossistema dependem deles. Os seus benefícios para o bem-estar humano são indirectos e, em larga medida, no longo prazo.”
Aprovisionamento	“Serviços obtidos de ecossistemas naturais, semi-naturais, agrícolas e florestais, incluem alimentos, matérias-primas, como a madeira, os produtos silvestres, ou a água. A sua disponibilidade depende fortemente dos serviços de suporte e de regulação.”
Regulação	“Serviços ecológicos prestados pelos ecossistemas e os seus impactos como a regulação da erosão, resiliência ao fogo, regulação do clima e a polinização. Estão intimamente interligados entre si e com as outras categorias de serviços.”
Culturais	“Estão associados a sítios onde os humanos interagiram e interagem uns com os outros e com a natureza ao longo de séculos, incluem o recreio e lazer, benefícios estéticos, bem-estar físico e espiritual, sentido de pertença, educacionais e patrimoniais.”

Atualmente o sistema de classificação mais usado é o CICES (*Common International Classification of Ecosystem Services*). Esta classificação engloba os serviços de aprovisionamento, regulação e culturais, mas não inclui os serviços de suporte, inicialmente delineados no MEA. Os serviços de suporte são considerados como

elementos integrantes de processos e funções fundamentais que definem os ecossistemas. (Haines & Potschin, 2012).

As mudanças climáticas têm um impacto significativo nos ecossistemas naturais e nos SE que eles fornecem. Por exemplo, o aumento da temperatura e as mudanças nos padrões de precipitação podem afetar negativamente a produtividade das florestas e dos ecossistemas aquáticos (Wolff, 2017). Os ecossistemas naturais são essenciais para absorver o carbono da atmosfera, agindo como sumidouros e reduzindo a quantidade de GEE na atmosfera. São também essenciais para atenuar os impactos dos efeitos das alterações climáticas como cheias, inundações, secas, incêndios e outros. Dessa forma, os ecossistemas desempenham um papel fundamental na mitigação mudanças climáticas e dos seus impactos (Machado, 2005) e por essa razão, classifica-se o sequestro e armazenamento de carbono como um serviço de ecossistema de regulação do clima (MEA, 2005a). Além disso, por via da avaliação do carbono, a regulação climática possui um valor económico atribuído, devido ao seu potencial de custo-efetividade como parte de estratégias de mitigação (Feng, 2005).

2.5 Sequestro e armazenamento de carbono

O sequestro de carbono refere-se à troca de CO₂ entre a atmosfera e reservatórios de carbono como a biomassa da vegetação e a matéria orgânica do solo, onde este fica armazenado (Lal et al., 2018) permitindo a retenção de carbono a longo prazo nesses reservatórios possibilitando mitigar ou desacelerar as mudanças climáticas (Gallant et al., 2020). Dentro deste contexto, os ecossistemas terrestres, que incluem florestas, áreas semi-naturais e, áreas agrícolas, desempenham um papel fundamental na dinâmica de carbono (Sil et al., 2017). O processo de sequestro e armazenamento de carbono pode ser facilitado por meio do aumento das áreas plantadas, da recuperação de áreas degradadas e da proteção das florestas existentes (Silva et al., 2013).

De acordo com Vieira (2019), 90% da biomassa terrestre provém de ecossistemas florestais que apresentam alta taxa de fixação (armazenamento) de carbono quando comparados com outras formações vegetais. Assim, pode-se perceber que as florestas são de suma importância para o equilíbrio de sequestro de carbono, muito disso em decorrência de armazenarem nas árvores e no solo mais carbono que a própria atmosfera

(Vieira et al., 2011). O carbono orgânico do solo encontrado em solos agrícolas, compreende cerca de 10% do total de carbono orgânico armazenado em todos os solos da superfície terrestre (Paustian et al., 2007). Em termos gerais, a maioria dos ecossistemas terrestres retêm mais carbono do que libertam em condições naturais. No entanto, é crucial mapear o território uma vez que diversos ecossistemas têm capacidades variadas de absorção e retenção de carbono, proporcionando benefícios diferentes no processo de sequestro de carbono (Padilla et al., 2010).

Quando há regeneração natural e a implementação de práticas de gestão apropriadas, observa-se um aumento significativo na matéria orgânica presente no solo. Isso implica não apenas um incremento no armazenamento de carbono, mas também uma melhoria substancial da qualidade do solo como um todo. Consequentemente, o solo torna-se mais resistente à erosão e demonstra uma maior capacidade de retenção de água e nutrientes essenciais (Paustian et al., 2007). Essa dinâmica do solo exerce um papel fundamental para o equilíbrio ecológico em diversos ecossistemas, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas e indiretamente a saúde da vegetação e a regulação do clima local. Portanto, a preservação e manejo sustentável do solo são elementos-chave para a promoção da saúde e resiliência de todos os ecossistemas terrestres (IPCC, 2019).

Segundo Pinheiro (2014), para obter estimativas precisas do carbono fixado nos ecossistemas e das taxas em que essa fixação ocorre, é crucial medir o sequestro de carbono em áreas maiores e heterogêneas à escala da paisagem. Isso permitirá a identificação dos ecossistemas que são fontes ou sumidouros de carbono e a avaliação de como eles respondem a mudanças ambientais ou a diferentes estratégias de gestão. Abordagens a esta escala permitem uma avaliação mais precisa dos reservatórios de carbono, o que é especialmente importante na definição de estratégias de mitigação das mudanças climáticas ou no desenvolvimento de mecanismos de comércio de carbono.

2.6 Valoração e mercados de carbono

A quantificação do valor económico do sequestro e armazenamento de carbono é essencial para a implementação de instrumentos de políticas de mitigação da mudança

climática, comparando projetos florestais e ambientais e incentivando a disposição pública em investir em projetos de conservação (Deng et al., 2011). Ademais, a valoração económica é necessária para o comércio de carbono que é considerado um dos processos mais eficientes para reduzir as emissões de carbono (Hong et al., 2017).

Os ecossistemas terrestres desempenham um papel crucial na dinâmica e valoração do carbono, abrangendo desde florestas, pomares e ecossistemas agrícolas (Sil et al., 2017). Na categoria de ecossistemas terrestres, a agricultura muitas vezes atua como fonte de emissão de GEE (Kanime et al., 2013), enquanto florestas e pomares tendem a se envolver no sequestro de carbono atmosférico (Scandellari et al., 2016). Pomares, devido à sua estrutura, ciclo de vida prolongado e práticas de preparo do solo frequentemente mínimas, têm o potencial de reter quantidades consideráveis de carbono atmosférico (Ceschia et al., 2010).

Os impactos das mudanças climáticas na adaptabilidade e integridade das florestas geram uma crescente preocupação visto que as florestas desempenham um papel fundamental como reservatório de carbono (Raihan et al., 2021). A desflorestação e a degradação dos ecossistemas florestais são problemas globais consideráveis pois podem diminuir o armazenamento de carbono e a capacidade de sequestro no planeta (Matthew et al., 2018). Compreender o valor económico do carbono armazenado nas florestas pode incentivar os países a reduzirem as taxas de desflorestação e melhorar a condição dos seus sumidouros naturais de carbono (Yee, 2010).

A valoração económica do carbono florestal é crucial para informar as decisões de políticas públicas e a gestão sustentável dos recursos naturais, promovendo a conservação da biodiversidade e proteção dos ecossistemas florestais (Malik et al., 2015). Além disso, a valoração económica do sequestro de carbono florestal é necessária para a contabilização dos recursos, otimização dos produtos florestais e valores dos serviços ambientais dos ecossistemas florestais (Ninan & Inoue, 2013).

Diversos estudos em diferentes países avaliaram o valor económico do carbono florestal como forma de prevenção às mudanças climáticas (Dhungana & Deshar, 2019; Medina, Medina & Bocardo, 2020). O custo social do carbono, segundo Auffhammer (2018), refere-se à atribuição de um valor monetário sob os impactos causados pelo aquecimento global para a sociedade. Este valor económico pode ser avaliado através da determinação de um valor monetário para cada tonelada ou Mg de CO₂ ou carbono

elementar emitido ou sequestrado, ou seja, uma estimativa monetária dos impactos económicos que a sociedade sofre com a mudança climática gerada pela emissão de uma tonelada adicional de CO₂ na atmosfera (Diaz, 2014).

Existem três principais mecanismos económicos para regular as emissões de GEE a diferentes escalas (Cerqueira, 2021). As abordagens regulatórias diretas definem um limite a partir do qual as emissões excessivas são penalizadas. Os mercados de carbono permitem a troca de créditos de emissão entre entidades que emitem abaixo do limite estabelecido e aquelas que o ultrapassam usando um sistema semelhante de limites de emissão (Figura 2). Finalmente, nos impostos sobre as emissões, onde uma taxa é aplicada em parte do rendimento das atividades que geram quantidades significativas de GEE.

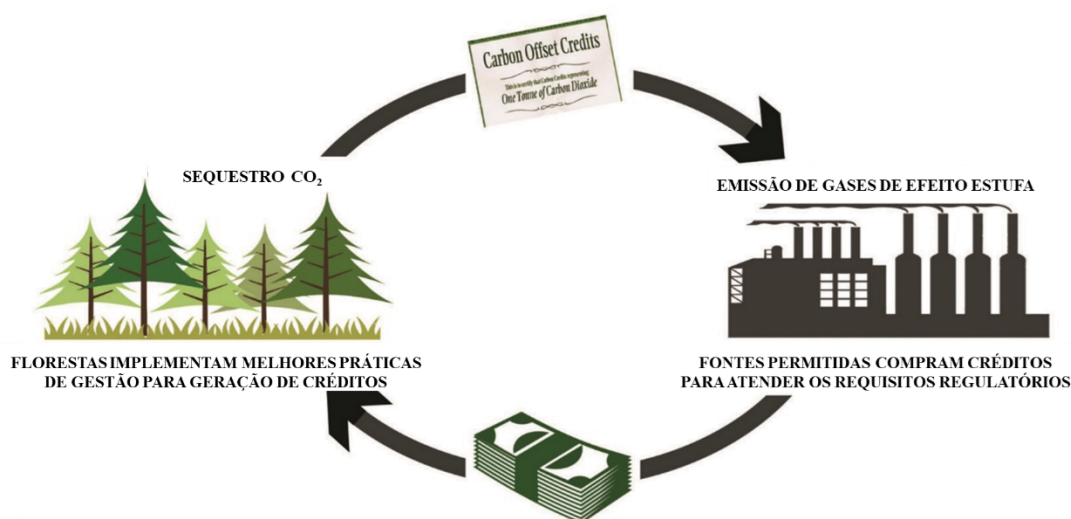


Figura 2: Fluxo de receita com a utilização de créditos de carbono. Adaptado de Attaway (s.d.).

O mercado de carbono, um mecanismo que possibilita a aquisição de licenças em conformidade com a quantidade necessária de emissões de dióxido de carbono (CO₂), teve origem após a ratificação do Protocolo de Quioto em 2002. O objetivo central desse mercado era a redução das emissões de GEE. A União Europeia aprovou o sistema conhecido como Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), que foi implementado a partir de janeiro de 2005 (Vale, 2014).

Cada licença no sistema CELE, equivale a prática de emissão de uma tonelada de CO₂ por empreendimentos ou outras instalações no mercado, nomeadas *European Union Allowances* (EUA). A SENDECO₂, é uma empresa que compra e vende direitos de

emissão; através de dados mensais disponibilizados no sítio eletrónico desta empresa é possível analisar, através de médias anuais, a evolução do valor do CO₂ no mercado europeu. Em 2008, dados iniciais, a média anual de EUA foi de 22,02 € por tonelada de CO₂, sendo o menor valor médio anual de 4,45 € registado em 2013. Em 2018 o mercado de carbono começou a valorizar e em 2022 a média anual do preço da tonelada de CO₂ foi de 80,87 €, o que representa um aumento de 94,5% em relação à média anual de menor valor em 2013 (SENDECO₂, 2023).

Capítulo 3

3. Metodologia

Para o mapeamento da dinâmica do carbono armazenado e sequestrado na Reserva da Faia Brava, utilizou-se o *software* InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs*) e o modelo *Carbon storage and sequestration*. A avaliação baseou-se na interpretação das alterações da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) de 1995 e 2018, e na recolha de dados referente a quatro reservatórios de carbono utilizados na modelação. Foram ainda construídos dois cenários hipotéticos de uso do solo para a região de estudo projetados para o ano de 2041 e por fim, realizou-se uma avaliação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), possibilitando analisar e quantificar a percentagem de coberto vegetal da área de estudo.

3.1 Área de estudo

Este trabalho foi conduzido na Reserva da Faia Brava (RFB) localizada nos concelhos de Figueira de Castelo Rodrigo e Pinhel, distrito da Guarda (Figura 3). A reserva possui atualmente uma área de 945,60 ha, dos quais 214 são classificados como Área Protegida Privada (APP) (ICNF, s.d.). A RFB está inserida no vale do rio Coa, rio de grande importância para a região, para Portugal e para o mundo pois oferece uma combinação de beleza natural, património pré-histórico reconhecido pela UNESCO e cultura vinícola.

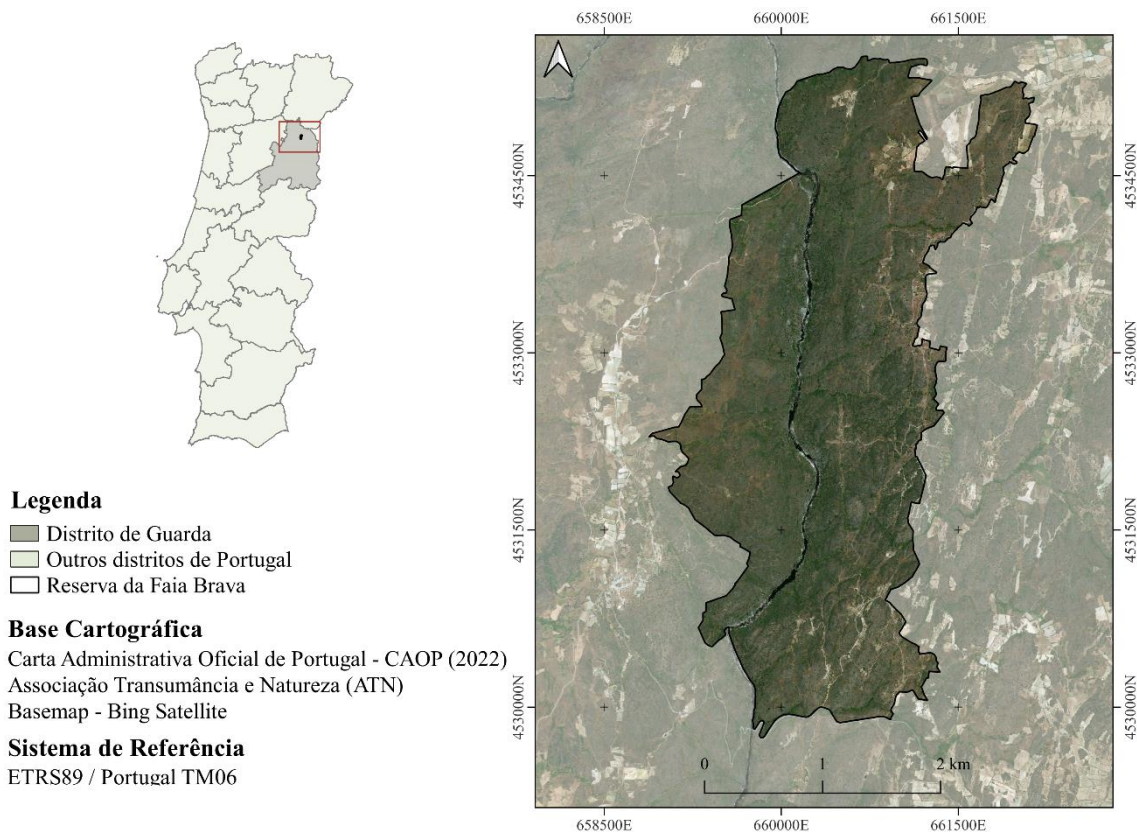


Figura 3: Mapa de localização da Reserva da Faia Brava em Portugal (esquerda) e delimitação da área protegida (direita).

A RFB foi estabelecida em 2010 através do aviso n.º. 206026/2010 de 14 de dezembro. É a primeira APP em Portugal e possui uma elevada biodiversidade, nomeadamente de aves. A reserva foi criada com o objetivo da conservação do britango ou abutre-do-egipto (*Neophron percnopterus*) e da águia de Bonelli (*Aquila fasciata*) embora ocorram na área 149 espécies de vertebrados (6 espécies de peixes, 1 das quais ameaçada; 9 anfíbios; 9 répteis; 100 aves das quais 11 ameaçadas; e 25 mamíferos, 3 dos quais ameaçados) (Gama et al., 2010). Esta reserva está inserida na Zona de Proteção Especial do Vale do Côa (PTZPE0039) e na *Important Bird Area* (IBA) do Vale do Côa (PT006, Birdlife International), demonstrando a grande importância do local de estudo para a conservação da avifauna. Está ainda incluída no Parque Arqueológico do Vale do Côa.

A Associação Transumância e Natureza (ATN), fundada em 2000, é uma Organização Não-Governamental de Ambiente e desde 2010 é responsável pela gestão da reserva. “A missão da ATN é conservar, valorizar, conhecer e divulgar o património

natural de Portugal, por meio da sustentabilidade e com a colaboração da comunidade. Isso é alcançado através da gestão e proteção de áreas naturais, com foco especial na conservação da região dos Vales do Côa, Águeda e Douro, com ênfase na gestão de habitats e espécies de maior valor de conservação.” A ATN realiza diversos projetos de restauração ecológica, que incluem ações de reflorestação, revitalização de atividades agropecuárias tradicionais, adoção de práticas de agricultura biológica, além de promover sensibilização, educação e divulgação ambiental (ATN, s.d.).

O relevo da área da Reserva da Faia Brava é caracterizado por um vale profundo resultante da erosão do rio Coa que atravessa a área de estudo e a geologia do local caracteriza-se por dominância de rochas graníticas. As características do relevo e da geologia, combinadas com um clima de baixa precipitação anual e grandes variações de temperatura, são fatores determinantes para a presença de solos de baixa qualidade nessa região (Gama et al., 2010). Essas condições resultam em uma cobertura vegetal escassa e em um processo limitado de meteorização resultante da pouca quantidade de água que se infiltra no solo e à erosão significativa causada pelo escoamento superficial. Essas condições naturais levam à predominância de solos delgados que se enquadram principalmente nas classes Leptossolos e Regossolos, além da formação rochosa presente em toda a extensão do rio Coa (Gama et al., 2010) (Figura 4).



Figura 4: Detalhe da RFB onde se destaca a dominância de afloramentos rochosos predominantemente graníticos presentes na região de estudo. Foto retirada de ICNF (s.d.).

O leito do rio Coa possui na área da RFB uma altitude média de 200 m, com cota mínima de 170 m, já a altitude média dos planaltos varia de 450 m e 509 m. Em relação à vegetação, segundo o plano de gestão para a reserva, as formações mais comuns são Azinhais (*Quercus rotundifolia*), Montados de sobreiro (*Quercus suber*) e azinheira (*Quercus rotundifolia*), Tamujal (*Securinega tinctoria*), Formações rupícolas de diversas espécies e Mata perenifolia dominada por *Olea europaea* var. *sylvestris* (Gama et al., 2010).

O clima da RFB está inserido na variação do tipo Csb (temperado com verão seco), segundo a classificação climática de Köppen. Devido às características orográficas da RFB, o clima da região pode ser caracterizado por aspetos microclimáticos, onde nos vales podem ser observadas diferenças na descrição geral da área, com estagnação de ar frio, nevoeiros, ocorrência de geadas e vento fraco (Gama et al., 2010).

Com base nos dados das estações Meteorológica de Pinhel (40.771; -7.061) e na Estação Climatológica de Figueira de Castelo Rodrigo (40.866; -6.900), a temperatura média da região varia entre 12,5 e 15°C, com mínimas médias registadas de 0 a 1°C e máximas médias de 30°C. Em relação à precipitação, são identificados baixos índices

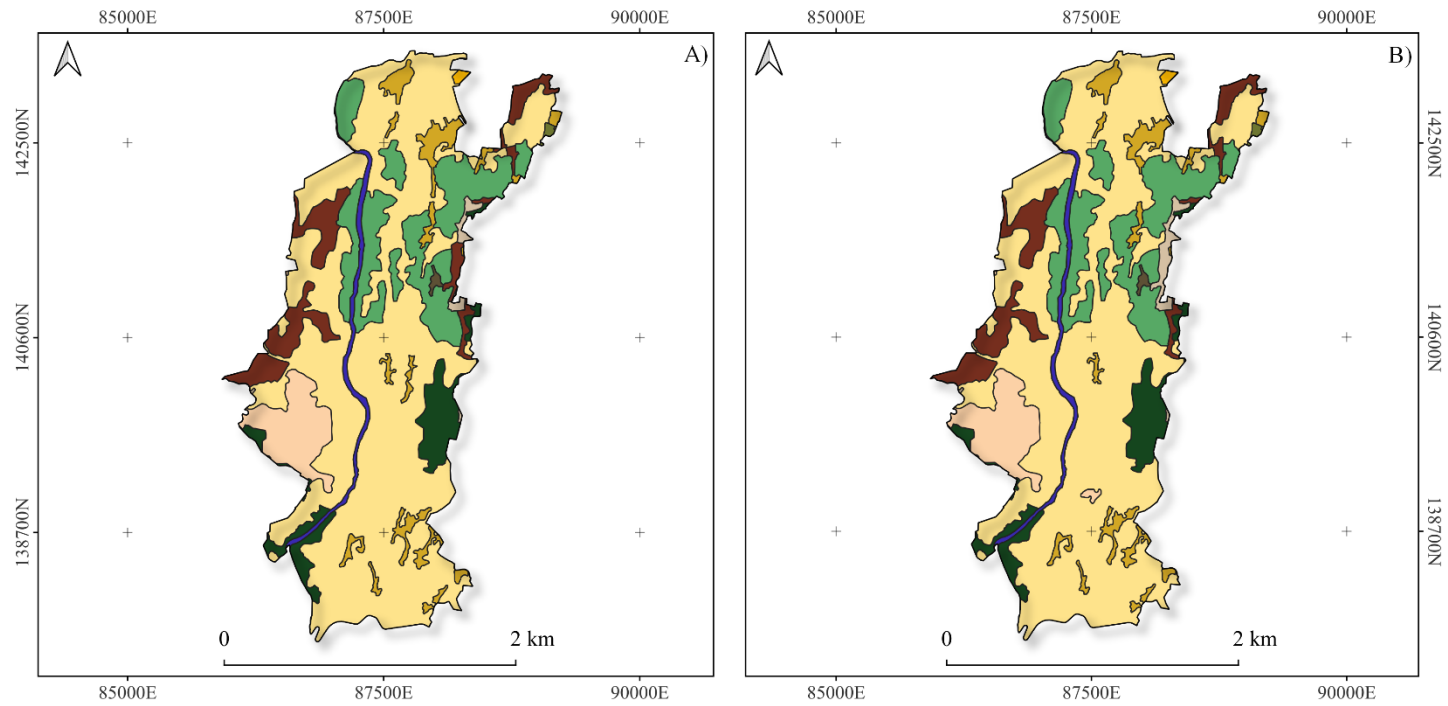
pluviométricos com uma precipitação média anual de 656 mm com três meses muito secos (julho a setembro) correspondentes ao verão. Ademais, a maior concentração de precipitação foi verificada no mês de fevereiro, com 81,1 mm, e a menor no mês de agosto, com 11,2 mm, em média.

Por fim, dentro do limite da RFB não existem habitantes. As moradias mais próximas localizam-se nas aldeias de Cidadelhe, Algodres e Vale de Afonsinho.

3.2 Uso e Ocupação do Solo

O mapeamento da dinâmica do carbono foi efetuado para os anos de 1995 e 2018 com base na Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) para as mesmas datas (DGT, s.d.). A cartografia utilizada está projetada no sistema de coordenadas ETRS89/ Portugal TM06, sendo este o sistema de coordenadas utilizado na produção dos mapas no presente trabalho bem como das simulações.

A cartografia COS segue uma nomenclatura constituída por quatro níveis de detalhes e oitenta e três classes no 4º nível com exceção da carta de 1995 que possui apenas quarenta e quatro classes no 4º nível. Apesar desta discrepância foi possível utilizar para o período analisado no presente estudo (1995 - 2018) as mesmas classes do sistema de classificação hierárquica totalizando 11 classes. As cartas de uso e ocupação do solo na área de estudo são apresentadas na Figura 5.



Legenda

Reserva da Faia Brava

Uso e Ocupação do Solo

Agricultura com espaços naturais e seminaturais

Cursos de água naturais

Florestas de azinheira

Florestas de sobreiro

Mosaicos culturais e parcelares complexos

Matos

Olivais

Pastagens

Pomares

SAF de sobreiro

Vegetação esparsa

Sistema de Referência

ETRS89 / Portugal TM06

Figura 5: Classificação do Uso e Ocupação do Solo para a área de estudo em 1995 (A) e 2018 (B).

As classes de uso e ocupação do solo presentes na RFB, de acordo com as especificações técnicas da COS (DGT, 2022), são, por ordem decrescente de abundância, as seguintes:

Matos: “Os Matos são caracterizados por áreas naturais e de vegetação espontânea, pouco ou muito densa, e em que a cobertura arbustiva é superior ou igual a 25%, além disso, os olivais abandonados, quando inferiores a 45 árvores/ha, são classificados como matos.”

Florestas de azinheira: “As Florestas de azinheira são classificadas quando a espécie dominante é a azinheira (*Quercus rotundifolia*).”

Pastagens: “As Pastagens são categorizadas por áreas com ou sem intervenção humana e ocupadas sobretudo com vegetação herbácea, de forma semeada ou espontânea e que ocupem uma área superior ou igual a 25% da superfície.”

Vegetação esparsa: “A categoria Vegetação esparsa, é classificada como áreas em que a superfície com vegetação arbustiva e herbácea ocupa uma área superior ou igual a 10% e inferior a 25%, e ainda, a superfície sem vegetação ocupa uma área superior ou igual a 75%. Não inclui áreas em que a superfície coberta por árvores seja superior ou igual a 10%.”

Florestas de sobreiro: “As Florestas de sobreiro são classificadas quando a espécie dominante é o sobreiro (*Quercus suber*).”

Olivais: “Os Olivais são áreas com plantações de oliveiras (*Olea europea* var. *Europea*) para a produção de azeitona, ainda assim, possui essa classificação quando o olival constitui a exploração dominante do local sobre outros tipos de cultura, como pomares e vinhas.”

Cursos de água naturais: “Os Cursos de água naturais são aqueles classificados quanto a sua ordem, seja de primeira ordem ou secundário.”

Agricultura com espaços naturais e seminaturais: “A Agricultura com espaços naturais e seminaturais são áreas ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais de dimensão significativa, como espaços de florestas, matos, etc.”

SAF de sobreiro: “O SAF de sobreiro é classificado como superfícies agroflorestais da espécie de sobreiro.”

Pomares: “Os Pomares são parcelas com árvores ou arbustos de uma ou outras espécies com destino à produção de fruto. Inclui também associações de árvores de fruto com vinha ou olival, porém a classificação é destinada a pomares quando se verifica uma dominância das árvores de fruto.”

Mosaicos culturais e parcelares complexos: “Os Mosaicos culturais e parcelares complexos são classificados quando as áreas de uso agrícola ocorrem em mosaicos de parcelas inferiores à Unidade Mínima Cartográfica (UMC), correspondendo a combinações entre culturas temporárias de regadio, culturas temporárias de sequeiro, pastagens. Esta classificação ocorre muitas vezes perto de aglomerados urbanos ou rurais em resultado da produção de frutos.”

Estas coberturas cartográficas de uso e ocupação do solo foram comparadas a fim de detetar e analisar as alterações ocorridas na RFB entre as datas de 1995 e 2018 (23 anos de análise entre as datas), tendo sido também calculada uma matriz de transição para o mesmo período.

3.2.1 Matriz de transição

A avaliação das dinâmicas e padrões de uso e ocupação do solo é de suma importância, principalmente por questões relacionadas com mudanças climáticas, desenvolvimento sustentável e preservação do ambiente (Abrantes et al., 2016). De acordo com Caetano e Marcelino (2017), em Portugal, as florestas e os territórios artificiais aumentaram entre os anos de 1985 e 2012 110 mil e 50 mil hectares, respetivamente. Este crescimento, segundo os autores, é devido à diminuição da área agrícola, no litoral e nas regiões metropolitanas (Abrantes et al., 2016).

Segundo Seripieri (2023), uma matriz de transição refere-se a uma tabela que regista as probabilidades de mudança de uma classe de ocupação do solo para outra ao longo de um período específico. Estas matrizes permitem a análise da propensão das paisagens a sofrerem alterações no futuro, com base em tendências passadas. Dessa maneira, é viável mensurar os efeitos de diversas transformações no uso e cobertura do solo na estrutura e operação das regiões. Adicionalmente, as matrizes de transição podem

ser aplicadas para avaliar a eficácia de distintas estratégias de gestão aplicadas para atingir objetivos particulares de conservação ou utilização do solo (Seripieri, 2023).

Com base nos mapas de uso e ocupação do solo de 1995 e 2018 foi calculada uma matriz de transição utilizando a função *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) desenvolvido por Congedo (2021). Posteriormente, os resultados foram extraídos para uma folha de cálculo.

3.3 Dinâmica do carbono

3.3.1 *Software* InVEST

Diversas ferramentas de modelação dos serviços de ecossistema (SE) têm sido desenvolvidas, permitindo o mapeamento, quantificação e, em alguns casos, a sua valoração em diferentes escalas para melhor visualização (Castro, 2020). Com estas ferramentas é possível compreender, avaliar e também criar possíveis cenários futuros, possibilitando a sua utilização na tomada de decisão (Jax et al., 2018).

O *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs* (InVEST), desenvolvido pelo *Natural Capital Project* da Universidade de Stanford, EUA, é uma das ferramentas mais utilizadas atualmente para modelação dos SE. É software livre e gratuito, disponibilizando guias de uso e fóruns de discussão, estando na base de diversas publicações ao nível global (NCP, 2023).

Segundo Castro (2020), os SE podem ser modelados de forma independente ou no InVEST, obtendo os resultados da análise de dados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Alguns dos modelos de resposta integrados neste *software* são o sequestro e armazenamento de carbono, a taxa de transporte de sedimentos e a taxa de transporte de nutrientes, por exemplo. Estes modelos são utilizados em escalas variadas, desde local até global, gerando mapas de SE finais.

O modelo *Carbon Storage and Sequestration*, utilizado neste trabalho, modela o armazenamento de carbono à escala da paisagem, mapeando e quantificando a quantidade de carbono armazenado em uma paisagem e sequestrado ao longo do tempo bem como o correspondente valor (NCP, 2023), se tornando uma ferramenta útil no estudo do impacto

da mudança do uso e ocupação do solo no armazenamento de carbono de uma dada área (Nie et al., 2020).

O modelo requer como dados de entrada, cartas de uso e ocupação do solo em formato matricial onde em cada célula é atribuída uma classe de uso e ocupação do solo. O carbono que pode ser armazenado por cada classe presente na cartografia e definido numa matriz de acordo com quatro reservatórios:

- I) Carbono armazenado acima do solo (c_{above}), incluindo toda a biomassa vegetal aérea;
- II) Carbono armazenado abaixo do solo (c_{below}), compreendendo a biomassa viva dos sistemas radiculares;
- III) Carbono armazenado no solo (c_{soil}), correspondente à matéria orgânica do solo, e;
- IV) Carbono armazenado no material vegetal morto (c_{dead}), o carbono na folhada e outros resíduos vegetais não degradados à superfície do solo.

O modelo, necessita de informação de pelo menos um dos quatro reservatórios descritos acima, em toneladas métricas de carbono por hectare ($tC\ ha^{-1}$) para estimar os valores de armazenamento e sequestro de carbono, e quanto mais dados dos reservatórios forem disponibilizados, mais completos serão os resultados (NCP, 2023).

Para quantificar o carbono armazenado, o modelo faz a soma dos diferentes reservatórios de carbono para cada classe em cada pixel da carta do uso e ocupação do solo, apresentando a quantidade de carbono armazenado na paisagem. Para a utilização no software InVEST, foi necessário transformar o ficheiro vetorial de origem (*shapefile*) em formato matricial (*raster*), tendo-se adotado um tamanho de pixel de 10 metros.

Para analisar o sequestro de carbono, o modelo necessita de mapas de uso e ocupação do solo em dois momentos diferentes, calculando o sequestro através da diferença dos valores de armazenamento nas duas datas (Equação 1).

$$\text{Sequestro de carbono} = \text{armazenamento}_{t+1} - \text{armazenamento}_t \quad (1)$$

em que: armazenamento $t+1$ é o armazenamento na data posterior e armazenamento t : é o armazenamento na data anterior.

Para valorar o sequestro de carbono, é ainda necessário incorporar um valor monetário para cada unidade de carbono, uma taxa de desconto monetária, e a variação no valor do sequestro de carbono ao longo do tempo de acordo com a equação 1. “A taxa de desconto monetária refere-se ao facto de que as pessoas normalmente valorizam mais os benefícios imediatos do que os benefícios futuros devido à incerteza e a inflação económica presumida ao longo do tempo.” (NCP, 2023). A taxa de variação do valor do sequestro de carbono ao longo do tempo possibilita entender o valor social do sequestro de carbono, por exemplo, “se o carbono sequestrado atualmente tem um impacto maior na mitigação das alterações climáticas do que o carbono sequestrado futuramente, esta taxa deverá ser positiva, caso contrário, negativa.” (NCP, 2023). Ademais, os custos sociais refletem o pagamento monetário por parte de uma sociedade para reverter futuras mudanças climáticas e seus efeitos negativos (Nordhaus, 2017).

O *software* InVEST, no modelo de *Carbon Storage and Sequestration* utiliza a equação descrita por NCP (2023) para valorar o sequestro de carbono ao longo do tempo numa determinada parcela x na paisagem (Equação 2):

$$Valor\ sequestrado_x = V * \frac{S_x}{q - p} * \sum_{t=0}^{q-p-1} \frac{1}{(1 + \frac{r}{100})^t (1 + \frac{c}{100})^t} \quad (2)$$

onde: V é o preço por tonelada métrica de carbono elementar, S_x a quantidade de carbono sequestrado em toneladas métricas na parcela x , q o ano no tempo futuro, p o ano no tempo passado, r a taxa de desconto de mercado anual para o preço do carbono e c a taxa anual de variação no preço do carbono.

O cálculo do valor do sequestro de carbono à escala de paisagem é realizado através do somatório do valor em cada parcela x .

O modelo *Carbon Storage and Sequestration* mesmo que amplamente utilizado, possui algumas limitações na sua conceção e aplicação. A primeira limitação é que o modelo assume que o carbono nos reservatórios é fixo no decorrer do tempo. Portanto

nenhuma das classes de uso e ocupação do solo na paisagem ganha ou perde carbono ao longo do tempo. Mesmo que na realidade haja crescimento da biomassa em áreas de floresta ou outras formações vegetais, por exemplo, o modelo não assume essas variações. O modelo de facto apenas quantifica mudanças de armazenamento quando o uso e ocupação do solo sofre alguma alteração entre o passado e o futuro (NCP, 2023).

Outra limitação do modelo é que não prevê mobilidade de carbono entre reservatórios. Por exemplo, quando uma árvore morre, o carbono armazenado na biomassa acima do solo move-se para outros reservatórios o que não é considerado pelo modelo (NCP, 2023).

3.3.2 Construção de cenários de alteração da paisagem

Com o objetivo de compreender eventuais mudanças no uso e ocupação do solo na RFB no futuro, bem como analisar de que forma estas alterações poderão influenciar a oferta de SE, nomeadamente a regulação do clima, produzindo informação que pode contribuir para a tomada de decisão na gestão da área protegida, estabeleceram-se dois cenários de uso e ocupação para o ano de 2041 com base na matriz de transição calculada para o período 1995 - 2018. O cenário 1 foi gerado tendo como referência o projeto da RFB denominado “Recuperação Florestal na Faia Brava”. Um dos objetivos do projeto é o de aumentar a área de floresta de espécies autóctones com o intuito de melhorar a disponibilidade de água e, melhorar a prevenção de incêndios como estratégia de combate à desertificação. Dessa forma, para este primeiro cenário, foi prevista a expansão das áreas de Floresta de azinheira em 120 ha, considerando que a azinheira é uma das espécies florestais mais resistentes à aridez e melhor adaptada às condições ecológicas da reserva.

O segundo cenário foi construído considerando uma expansão de 30 ha de Olivais em simultâneo com a expansão da Floresta de azinheira do cenário 1, garantindo que no futuro, a paisagem evolua no sentido de aumento da agricultura, não ao seu abandono, podendo promover uma possível conexão com a comunidade e a reserva.

Os dois cenários alternativos foram construídos utilizando o modelo *Scenario Generator: Proximity Based* integrado no *software* InVEST. A ferramenta necessita de um mapa de uso e ocupação do solo, códigos das classes de uso e ocupação do solo que

se irão expandir, códigos das classes de uso e ocupação do solo que serão substituídos, a dimensão da conversão, o número de etapas e de que forma acontecerá esta construção de cenários, possibilitando o usuário escolher entre duas metodologias: distante da borda e mais próximo da borda. Para este trabalho utilizou-se o mapa de uso e ocupação do solo para 2018, inseriu-se o código das Florestas de azinheira (3) no cenário 1 e o código dos Olivais (7) em conjunto com o código 3 no cenário 2, inseriu-se os códigos das classes que poderão ser substituídos, Matos (5) no cenário 1 e Matos (5) e Pastagens (8) para o cenário 2, e o tamanho de área a ser convertida, 120 ha no cenário 1, 30 + 120 ha para o cenário 2. Optou-se por realizar a conversão em apenas uma etapa de e, por fim, escolheu-se a opção “mais próximo da borda”. A escolha da metodologia “mais próxima da borda” significa que a área a ser convertida se encontrará em locais onde o uso do solo desejado a ser expandido já estava presente.

3.3.3 Reservatórios de carbono

Os dados relativos à distribuição do carbono por reservatório e classe de uso e ocupação do solo foram compilados a partir de diversas fontes de informação como artigos científicos, dissertações e relatórios técnicos. Primeiramente buscou-se informações à escala regional ou local para que os dados inseridos fossem o mais próximo da realidade possível (Tallis et al., 2013). Porém, para as classes de uso e ocupação do solo da COS discretizadas para o nível mais detalhado, muitas vezes não foi possível encontrar valores diretos para a escala desejada, sendo utilizados dados relativos a outras escalas, nomeadamente a nacional. Foram necessários quarenta e quatro valores iniciais de carbono para os quatro reservatórios das 11 classes (Tabela 2).

Tabela 2: Estimativas do carbono armazenado por reservatório e classe de uso e ocupação do solo na Reserva da Faia Brava.

Código	Classe de uso e ocupação do solo	Reservatórios de carbono (t ha ⁻¹)			
		c_above	c_below	c_soil	c_dead
1	Agricultura com espaços naturais e seminaturais	11,37	2,40	27,20	1
2	Cursos de água naturais	0	0	0	0
3	Florestas de azinheira	12,90	9,46	120	3,32
4	Florestas de sobreiro	24,97	3,64	120	5,45
5	Matos	8,42	10,16	85	1,15
6	Mosaicos culturais e parcelares complexos	11,52	2,40	27,20	0
7	Olivais	0,80	0,40	31	1
8	Pastagens	5,42	15,60	28,40	1
9	Pomares	0,80	0,40	31	1
10	SAF de sobreiro	33,18	4,73	46	1
11	Vegetação esparsa	1,62	3,04	34,50	0,34

Para a classe “Agricultura com espaços naturais e seminaturais” (Código 1), o valor da concentração de carbono para c_above foi extraído do trabalho de Florindo (2017) que estudou o carbono total na biomassa vegetal e do solo em diferentes usos e ocupações do solo de acordo com a nomenclatura da cartografia Corine Land Cover (CLC) para cinco freguesias na Área Metropolitana de Lisboa (AML). O valor adotado diz respeito à quantidade de carbono na biomassa vegetal (em t ha⁻¹) que foi adaptada de pesquisas de Cruickshank et al. (2000) e Caetano et al. (2009). Para o reservatório c_below da mesma classe, o valor foi obtido através da pesquisa de dissertação de Pinheiro (2009), onde estudou as alterações do uso do solo e stocks de carbono na freguesia de Deilão, concelho de Bragança. O c_soil foi obtido de Patrício (2018) que estudou o carbono armazenado para a bacia hidrográfica do rio Sabor. Para o reservatório c_dead, assumiu-se um valor de 1 para efeitos práticos com base em trabalhos desenvolvidos não publicados.

Relativamente à classe “Florestas de azinheira” (Código 3), para c_above e c_below utilizaram-se dados do 6º Inventário Florestal Nacional (IFN6) (Uva, 2015) para a classe “azinheira - misto dominante” para a região NUTS II – Centro, onde a RFB está inserida. Os valores de c_soil e c_dead, foram extraídos de Sil (2014), trabalho realizado com o

objetivo de quantificar e valorar o sequestro de carbono na bacia superior do rio Sabor, concelho de Bragança.

Para as “Florestas de sobreiro” (Código 4), utilizaram-se igualmente dados do IFN6 para os compartimentos c_{above} e c_{below} e de Sil (2014) para c_{soil} . Por fim, para c_{dead} , foi utilizada informação para manta morta (em $t\ ha^{-1}$) extraída de uma tese em que se quantificou o carbono no Vale do Lima (Garrido, 2009).

Na classe “Matos” (Código 5) calculou-se uma média para todos os valores apresentados por Ramos (2008) para o compartimento c_{above} , c_{below} e c_{soil} . O trabalho de Ramos (2008) foi realizado com o objetivo de estudar a erosão hídrica e a dinâmica do carbono em matos do Parque Natural de Montesinho (PNM). Os valores adotados dizem respeito a giestais, matos dominados por *Cytisus multiflorus* espécie de grande abundância na RFB (Gama et al., 2010). Para c_{above} e c_{below} utilizaram-se dados originalmente em $g\ m^2$, posteriormente convertidos para $t\ ha^{-1}$. Para c_{soil} , converteu-se a informação original de $kg\ m^2$ para $t\ ha^{-1}$. Para c_{dead} , utilizou-se um valor (em $t\ ha^{-1}$) de Sil (2014) relativo à classe “vegetação arbustiva baixa – matos”.

Para “Mosaicos culturais e parcelares complexos” (Código 6), apenas o valor de c_{above} foi encontrado na literatura (Florindo, 2017). Nos restantes reservatórios c_{below} e c_{soil} à falta de melhor informação, utilizou-se os mesmos valores do código 1 considerando que existe alguma agricultura presente neste uso do solo, porém para o c_{dead} optou-se por utilizar um valor nulo.

Para a classe “Olivais” (código 7), adotou-se os valores de carbono extraídos do trabalho de Sil (2014) para c_{above} , c_{below} e c_{soil} . Para c_{dead} , considerou-se o valor de 1, para efeitos práticos, pelas razões apresentadas para a classe de uso do solo com código 1.

De mesmo modo, para a classe “Pastagens” (Código 8), os dados de c_{above} e c_{below} foram extraídos de Sil (2014) e Dôres (2020), respetivamente, para a caracterização de ocupação arbustiva e herbácea, utilizando como base os dados para matos altos pouco densos e para lameiros em uso para a região do PNM. Para o c_{soil} , o valor de carbono foi obtido do artigo de Madeira et al. (2004) para sistemas identificados como pastagens melhoradas. Neste trabalho estudou-se a quantidade de carbono orgânico

nos solos de Portugal Continental. Os dados originais foram convertidos de kg m² para t ha⁻¹. Para o reservatório de c_{dead}, utilizou-se um valor de 1.

Para “Pomares” (Código 9), os dados para os reservatórios de carbono foram os mesmos do Código 7.

Para o uso do solo denominado “SAF de sobreiro” (Código 10), o valor de c_{above} foi obtido de Sistemas agroflorestais (SAF) do trabalho Florindo (2017). Para o c_{below}, utilizaram-se os dados provenientes do IFN6, baseado na subtração de valores da biomassa acima do solo e a biomassa total calculada. Para c_{soil}, utilizou-se uma ponderação de valores de c_{soil} do Código 4 e valores para área de montado para Portugal Continental (Madeira et al., 2004), com um peso de ¼ para as áreas de montado por representar melhor a descrição do uso. Para o reservatório de c_{dead} foi considerado o valor de 1 t ha⁻¹.

No Código 11, “Vegetação esparsa”, assumiu-se valores para todos os reservatórios do trabalho de Pinheiro (2009) para a mesma classe de ocupação do solo.

Para os Cursos de águas naturais (Código 2) atribuiu-se o valor de zero para todos os reservatórios por se considerar não existir carbono nessa classe e pelo facto de a estrutura de compartimentos não se aplica a estes elementos da paisagem.

3.3.4 Valoração do sequestro de carbono

Com o modelo *Carbon Storage and Sequestration* do InVEST foi calculado o valor do sequestro de carbono entre 1995 (tempo passado) e 2018 (tempo futuro) com base em dados de carbono elementar. Para tal houve a necessidade de estabelecer um valor para o carbono, uma taxa de desconto monetária e a taxa de variação no valor do sequestro de carbono ao longo do tempo. A base de dados para os objetivos propostos neste trabalho foi construída de acordo com o manual de usuário do *software* InVEST (NCP, 2023), versão 3.14.

No estudo do Fundo Monetário Internacional, uma faixa de preços entre 25 e 75 \$ por tonelada CO₂, é sugerida (Parry, Black & Roaf, 2021), já Nordhaus (2007) indica valores entre 32 e 326 \$. Um método para estimar o benefício do sequestro por tonelada de carbono, é considerar o custo por instalações públicas, como centrais elétricas

(Socolow & Pacala, 2006). Os autores utilizaram um valor de 110 \$ por tonelada de C, e neste estudo optou-se por utilizar o mesmo critério.

A taxa anual de desconto expressa a preferência da sociedade em relação aos benefícios imediatos e aos benefícios futuros, uma taxa de desconto alta significa que a sociedade impõe a necessidade de benefícios imediatos, ou seja, uma redução dos impactos das alterações climáticas com a maior brevidade possível (NCP, 2023). Neste estudo considerou-se uma taxa de desconto de mercado de 3%, demonstrando alternativas moderadas da sociedade para redução das emissões (GAO, 2020). Este valor corresponde ao valor intermédio utilizado por Sil et al. (2017) na valoração do carbono sequestrado na bacia do rio Sabor.

A taxa de variação anual do preço do carbono é utilizada para analisar o custo do carbono sequestrado mediante a variação na mitigação das alterações climáticas ao longo do tempo (NCP, 2023). Neste estudo, optou-se por adotar um valor de 5%, tal como utilizado por Sil et al. (2017), considerado um pressuposto conservador, visto que não é possível constatar de facto se o preço do carbono irá aumentar ou diminuir no futuro.

3.5 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Adicionalmente ao estudo da dinâmica do carbono, foi feita uma caracterização da vegetação atual da reserva com base no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Em primeiro lugar, como não foi possível realizar visitas de campo à área de estudo para refinamento da informação sobre o uso e ocupação do solo da RFB, foi utilizada somente a informação cartográfica da COS para Portugal Continental. Sabendo que a área da reserva possui uma dimensão pequena e a classificação do uso e ocupação do solo realizada no âmbito da COS, por razões metodológicas, pode não representar o detalhe da realidade, optou-se por analisar o NDVI na reserva. Um dos aspetos críticos é o facto de em diversas áreas da RFB, a percentagem de solo exposto e de afloramentos rochosos é muito elevada, o que não é capturado na cartografia COS (Figura 6). A análise

de sequestro e armazenamento de carbono com base na cartografia COS pode, portanto, subestimar estes processos em zonas com estas características.



Figura 6: Locais na RFB com solo exposto e afloramento rochosos. Fotos de Taiana Vinciguerra.

Existem atualmente esforços para aumentar a área de coberto vegetal arbóreo da RFB considerando que a vegetação é importante para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos e aumentar a fixação do carbono. Analisar padrões espaciais da vegetação através do cálculo de índices de vegetação como o NDVI é importante para a gestão da RFB.

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais criadas para analisar a abundância e atividade da vegetação em imagens (Oliveira et al., 2009; Jensen, 2009) explorando a refletância no espectro visível e infravermelho próximo. Estes índices foram desenvolvidos com o propósito de realçar as características espectrais distintas da vegetação em comparação com o solo e outros elementos da superfície terrestre (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

Neste trabalho, a vegetação foi analisada com base no Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). O NDVI, proposto por Rouse et al. (1974), é utilizado para avaliar a distribuição da vegetação bem como sua densidade. O índice NDVI varia entre -1 e 1. Valores mais altos do índice indicam uma maior cobertura vegetal enquanto valores mais baixos podem indicar solo exposto, área urbana ou presença de afloramentos rochosos.

Para a análise mencionada acima, primeiramente foi adquirida para a área de estudo uma imagem de satélite (Copernicus Sentinel-2) através do complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) desenvolvido por Congedo (2021). Para tal, selecionou-se um polígono de interesse em torno da área de estudo, o satélite desejado, a percentagem máxima do coberto de nuvens (5%) e uma data compreendida entre 01/08/2022 e 31/08/22 para análise atual e de acordo com datas disponíveis no complemento. Foram também definidas as bandas necessárias para cálculo do índice, nomeadamente as bandas 8 e 4, infravermelho próximo (NIR) e vermelho (Red), respetivamente, todas com resolução espacial de 10 metros. A imagem adquirida foi obtida no dia 22/08/22 por conter um coberto de nuvens menor que 1%. Esta imagem representa condições meteorológicas extremas na área de estudo, considerando que em agosto de 2022 se observaram desvios positivos de temperatura máxima e mínima e negativos de precipitação em relação à normal climatológica de 1971 - 2000 (IPMA, 2023).

O índice NDVI (Equação 3) foi calculado através da calculadora raster em SIG a partir da seguinte equação:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3)$$

onde: NIR é o valor de refletância na banda do infravermelho próximo e Red é a do vermelho.

Capítulo 4

4. Resultados e Discussão

4.1 Alterações do uso e ocupação do solo para avaliação da dinâmica do carbono

De um modo geral, na Reserva da Faia Brava não foram observadas alterações significativas no solo entre 1995 e 2018 (Figura 5 e Tabela 3). Observou-se em qualquer das datas uma predominância da classe de uso e ocupação do solo Matos (mais de 60% da área da reserva), seguida por Florestas de azinheira (cerca de 15%), possuindo as restantes classes baixa expressividade na área de estudo. No intervalo de 23 anos compreendido entre 1995 e 2018, observou-se um aumento das áreas associadas a três classes de uso do solo: Agricultura com espaços naturais e seminaturais, Matos e Vegetação Esparsa (Tabela 3). No sentido contrário, observou-se uma diminuição da áreas das classes Olivais e Pastagens (Tabela 3).

Tabela 3: Área ocupada por classes de uso e ocupação do solo em 1995 e 2018 na Reserva da Faia Brava.

Classe de uso e ocupação do solo	1995		2018	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Agricultura com espaços naturais e seminaturais	5,98	0,63	10,65	1,13
Cursos de água naturais	17,03	1,80	17,03	1,80
Florestas de azinheira	138,55	14,65	138,55	14,65
Florestas de sobreiro	48,34	5,11	48,34	5,11
Matos	571,30	60,42	573,03	60,60
Mosaicos culturais e parcelares complexos	1,21	0,13	1,21	0,13
Olivais	43,40	4,59	40,04	4,23
Pastagens	65,61	6,94	61,17	6,47
Pomares	1,44	0,15	1,44	0,15
SAF de sobreiro	1,69	0,18	1,69	0,18
Vegetação esparsa	51,05	5,40	52,45	5,55

A área de Agricultura com espaços naturais e seminaturais, que em 1995 ocupava 5,98 ha na RFB (0,63%) passou a ocupar 10,65 ha (1,13%) em 2018. Outro aumento observado, embora sem muita expressividade, foi nas áreas de Matos: 571,3 ha (60,42%) em 1995 e 573,03 ha (60,6%) em 2018. Finalmente, a classe Vegetação esparsa aumentou de 51,05 ha (5,4%) em 1995 para 52,45 ha (5,55%) em 2018. Em contrapartida, na classe Olivais observou-se uma diminuição de 43,4 ha (4,59%) em 1995 para 40,04 ha (4,23%) em 2018. Na classe Pastagens também se observou uma diminuição de 65,61 ha (6,94%) para 61,17 ha (6,47%) entre as datas em análise. Nas demais classes não foram observadas alterações entre 1995 e 2018.

4.1.1 Matriz de transição

O cálculo de uma matriz de transição entre 1995 e 2018 permitiu identificar com maior detalhe que classes ganham ou perdem, as conversões ocorridas entre classes e a magnitude dessas mudanças. Esta matriz permite uma leitura cruzada (em hectare e em porcentagem) do que mudou de 1995 (linhas) para 2018 (colunas), sendo a sua diagonal indicadora do que se manteve.

Em complemento ao observado anteriormente pela visualização dos mapas referentes aos usos do solo em 1995 e 2018 (Figura 5) e das estatísticas globais da ocupação do solo (Tabela 3), é possível observar em detalhe na matriz de transição quais as categorias transformadas em outras e em que grau (Tabela 4). Por sua vez, a Tabela 5 apresenta as transições da Tabela 4 em termos de probabilidades de transição entre 1995 e 2018, obtida pela divisão das áreas de cada classe da Tabela 4 pelo total das linhas (1995). Esta matriz representa as tendências de transformação no período de análise (23 anos). Observa-se que, em geral, os usos tendem a manter-se inalterados com valores da diagonal de 1 ou próximos desse valor. Apenas algumas classes tendem a mudar, como, por exemplo, os Olivais que apresentam uma probabilidade de se transformarem em Matos de 0,07.

Na Tabela 6, apresentam-se os resultados da aplicação das probabilidades de transição observadas entre os anos 1995 e 2018 às áreas das classes em 2018, para projetar

o uso e ocupação do solo nos próximos 23 anos. Tal foi realizado multiplicando a área total de cada classe em 2018 pelas probabilidades de transição da Tabela 5.

Tabela 4: Matriz de transição em área entre classes de uso e ocupação do solo entre 1995 (linhas) e 2018 (colunas) na Reserva da Faia Brava.

1995 / 2018	Agricultura com espaços naturais e seminaturais	Cursos de águas naturais	Florestas de azinheira	Florestas de sobreiro	Matos	Mosaicos culturais e parcelares complexos	Olivais	Pastagens	Pomares	SAF de sobreiro	Vegetação esparsa	Total área (ha)
Agricultura com espaços naturais e seminaturais	5,98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,98
Cursos de águas naturais	0	17,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,03
Florestas de azinheira	0	0	138,55	0	0	0	0	0	0	0	0	138,55
Florestas de sobreiro	0	0	0	48,34	0	0	0	0	0	0	0	48,34
Matos	0	0	0	0	569,38	0	0	0,52	0	0	1,40	571,30
Mosaicos culturais e parcelares complexos	0	0	0	0	0	1,21	0	0	0	0	0	1,21
Olivais	0	0	0	0	3,36	0	40,04	0	0	0	0	43,40
Pastagens	4,67	0	0	0	0,29	0	0	60,65	0	0	0	65,61
Pomares	0	0	0	0	0	0	0	0	1,44	0	0	1,44
SAF de sobreiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,69	0	1,69
Vegetação esparsa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51,05	51,05
Total área (ha)	10,65	17,03	138,55	48,34	573,03	1,21	40,04	61,17	1,44	1,69	52,45	945,60

Tabela 5: Matriz de probabilidades de transição entre classes de uso e ocupação do solo na Reserva da Faia Brava entre 1995 e 2018.

1995 / 2018	Agricultura com espaços naturais e seminaturais	Cursos de águas naturais	Florestas de azinheira	Florestas de sobreiro	Matos	Mosaicos culturais e parcelares complexos	Olivais	Pastagens	Pomares	SAF de sobreiro	Vegetação esparsa
Agricultura com espaços naturais e seminaturais	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cursos de águas naturais	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Florestas de azinheira	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Florestas de sobreiro	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Matos	0	0	0	0	0,996	0	0	0	0	0	0,002
Mosaicos culturais e parcelares complexos	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Olivais	0	0	0	0	0,077	0	0,922	0	0	0	0
Pastagens	0,071	0	0	0	0,004	0	0	0,924	0	0	0
Pomares	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
SAF de sobreiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Vegetação esparsa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

As projeções das áreas ocupadas por classe de uso e ocupação do solo para 2041 refletem assim as tendências passadas (Tabela 6). Por exemplo, os Olivais mantêm a sua tendência para diminuir em área passando de 40,04 ha em 2018 para 36,94 ha em 2041 (-7,74%), bem como as Pastagens (61,17 ha em 2018 e 57,07 ha em 2041; variação de -6,7%). No entanto, a Agricultura com espaços naturais e seminaturais bem como os Matos e a Vegetação esparsa, tendem a aumentar no futuro. A agricultura aumenta 40,85%, os Matos apenas 0,25% e a Vegetação esparsa 2,67%.

Tabela 6: Ocupação das classes para os anos de análise (1995, 2018 e 2041).

Uso e Ocupação do Solo	Área (ha)		
	1995	2018	2041
Agricultura com espaços naturais e seminaturais	5,98	10,65	15,00
Cursos de águas naturais	17,03	17,03	17,03
Florestas de azinheira	138,55	138,55	138,55
Florestas de sobreiro	48,34	48,34	48,34
Matos	571,3	573,03	574,47
Mosaicos culturais e parcelares complexos	1,21	1,21	1,21
Olivais	43,40	40,04	36,94
Pastagens	65,61	61,17	57,07
Pomares	1,44	1,44	1,44
SAF de sobreiro	1,69	1,69	1,69
Vegetação esparsa	51,05	52,45	53,85

4.2 Armazenamento e sequestro de carbono

A aplicação da metodologia seguida com base no Modelo InVEST e cartografia do uso e ocupação do solo permitiu quantificar o carbono presente na paisagem distribuído pelos quatro reservatórios utilizados na simulação (Figura 7). A análise desta distribuição permite uma melhor identificação de quais reservatórios possuem mais carbono após compilação dos dados nos diferentes usos e ocupações do solo de acordo com as suas respetivas áreas.

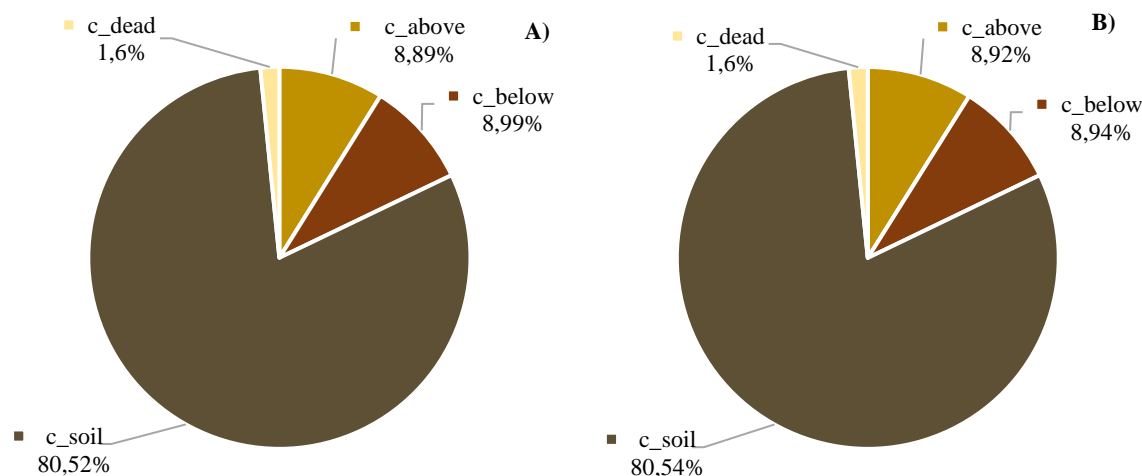


Figura 7: Percentagem de carbono na paisagem para cada reservatório em 1995 (A) e 2018 (B).

É possível observar que em ambas as datas a maior percentagem de carbono na RFB está armazenado no solo, contribuindo com mais de 80% (76 275,20 e 76 367,32 tC em 1995 e 2018, respetivamente) para o carbono total fixado na paisagem da RFB. Tal é expectável de acordo com o conhecimento atual. No estudo de Roscoe et al. (2006) é relatado que o maior reservatório de carbono dos ecossistemas terrestres é a matéria orgânica acumulada nos solos. A segunda maior contribuição é do carbono da biomassa viva abaixo do solo (c_below), com valores entre 8,99% (8 512,94 tC) para 1995 e 8,94% (8 475,38 tC) para 2018. A biomassa acima do solo possui uma contribuição semelhante, entre 8,89% (8 416,88 tC) em 1995 e 8,92% (8 460,06 tC) em 2018, e os detritos vegetais sobre o solo representam apenas 1,6% do total de carbono nas duas datas (1 515,91 e 1 515,25 tC em 1995 e 2018, respetivamente). Com referido anteriormente, estas estimativas não têm em consideração as variações internas ao nível das classes de uso e ocupação do solo no carbono, tanto acima quanto abaixo do solo, resultantes dos processos metabólicos das plantas em resposta aos diferentes tipos de solo e às flutuações climáticas. Isso pode levar a estimativas que podem ser tanto superestimadas quanto subestimadas, dependendo das características específicas da vegetação local (Kappes, 2023).

A Figura 8 identifica o carbono armazenado nos quatro reservatórios considerados no estudo para as diferentes classes de uso e ocupação do solo. Tal como observado anteriormente, o reservatório solo é o mais importante em todas as classes.

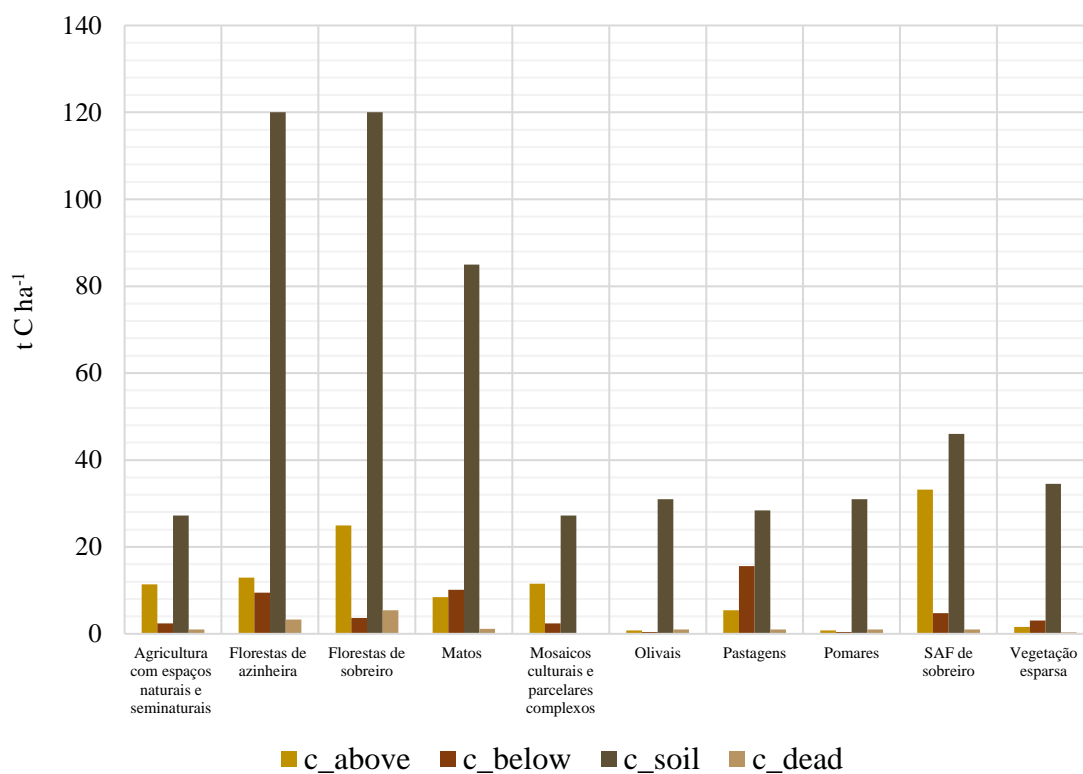


Figura 8: Carbono armazenado por reservatório e classe de uso e ocupação do solo na RFB.

Analisando os resultados à escala da paisagem, estima-se que entre 1995 e 2018 ocorreu um pequeno aumento do carbono armazenado nos 945,60 ha da RFB (Tabela 7). Os valores de carbono armazenado na paisagem resultam da multiplicação do carbono total pela a respetiva área de cada uso e ocupação do solo em cada uma das duas datas.

Tabela 7: Carbono armazenado por classe de uso e ocupação do solo (tC ha^{-1}) e na paisagem (tC) na RFB.

Classe de uso e ocupação do solo / Códigos	Carbono total armazenado por classe de uso do solo (tC ha^{-1})	Carbono armazenado na paisagem (tC)	
		1995	2018
Agricultura com espaços naturais e seminaturais (1)	41,97	251,0	447,0
Florestas de azinheira (3)	145,68	20 184,0	20 184,0
Florestas de sobreiro (4)	154,06	7 447,3	7 447,3
Matos (5)	104,73	59 832,2	60 013,4
Mosaicos culturais e parcelares complexos (6)	41,12	49,8	49,8
Olivais (7)	33,2	1 440,9	1 329,3
Pastagens (8)	50,42	3 308,1	3 084,2
Pomares (9)	33,2	47,8	47,8
SAF de sobreiro (10)	84,91	143,5	143,5
Vegetação esparsa (11)	39,5	2 016,5	2 071,8
		94 720,93	94 818,1

As classes dominadas por árvores (Florestas de azinheira e sobreiro e SAF de sobreiro) e por arbustos (Matos) são as que armazenam maiores quantidades de carbono. Os maiores valores totais de carbono armazenado foram observados nas classes de uso do solo de Florestas, com valores próximos e superiores de 150 tC ha^{-1} , seguidas de Matos com valores superiores a 100 tC ha^{-1} , e SAF de sobreiro, com mais de 80 tC ha^{-1} . Nos demais usos, o total de carbono possui valores abaixo de 60 tC ha^{-1} (Tabela 7).

Em 1995, a paisagem da RFB armazenava $94 720,93 \text{ tC}$. Do total armazenado, $59 832,2 \text{ tC}$ são provenientes da classe Matos. Este uso, mesmo não possuindo os maiores valores carbono por unidade de área, ocupa uma extensa área na RFB ($571,3 \text{ ha}$). Assim, o carbono armazenado para este uso torna-se mais expressivo que os demais. Os usos 3 e 4 de Florestas apresentam os segundo e terceiro maiores valores de carbono armazenado na paisagem, $20 184,0$ e $7 447,3 \text{ tC}$ para Florestas de azinheira e Florestas de sobreiro, respectivamente. No trabalho de Forte (2014), também foram encontrados os maiores valores de carbono para as florestas e matas, respectivamente.

Os demais usos possuem pouca expressividade, variando entre $3 308,1 \text{ tC}$ nas Pastagens e $47,8 \text{ tC}$ em Pomares.

Em 2018 o carbono armazenado passou para 94 818,1 tC devido ao aumento das áreas das classes com maior densidade de carbono bem como à diminuição daquelas em que o carbono armazenado é menor. Houve um aumento de carbono armazenado em três classes: Agricultura com espaços naturais e seminaturais (aumento de 196,0 tC), Matos (aumento de 181,2 tC) e Vegetação esparsa (55,3 tC). Contudo, pôde-se observar uma diminuição na classe dos Olivais (111,6 tC) e de Pastagens (223,9 tC). O armazenamento de carbono na paisagem corresponde a um SE de grande importância, especialmente em ecossistemas com vegetação natural, como florestas e pastagens contribuindo para a regulação do clima. Para além deste, há outros SE que dependem, de forma direta e indireta, do carbono armazenado na paisagem (MEA, 2005a), como a fertilidade do solo, manutenção da biodiversidade e proteção contra erosão, por exemplo.

A Figura 9 apresenta espacialmente o armazenamento de carbono (tC ha^{-1}) à escala de paisagem em 1995 (A) e 2018 (B). As quantidades de C armazenado foram distribuídas por cinco classes. A classe identificada como 0 refere-se ao curso de água presente na RFB, não sendo considerado para este trabalho valores de carbono em nenhum dos reservatórios. A classe que integra os valores de 0 a 34 tC ha^{-1} corresponde a áreas de agricultura como a presença de Olivais e Pomares. Quanto à classe que compreende valores de 34 e 51 tC ha^{-1} , esta refere-se a regiões com pouca vegetação, como regiões com Vegetação esparsa, Mosaicos culturais e parcelares complexos, Agricultura com espaços naturais e seminaturais e Pastagens. A classe entre 51 e 123 tC ha^{-1} descreve maioritariamente as classes Matos e SAF de sobreiro. Por fim, a classe que abrange as maiores quantidades, superiores a 123 tC ha^{-1} , corresponde às áreas de Florestas de azinheira e sobreiro.

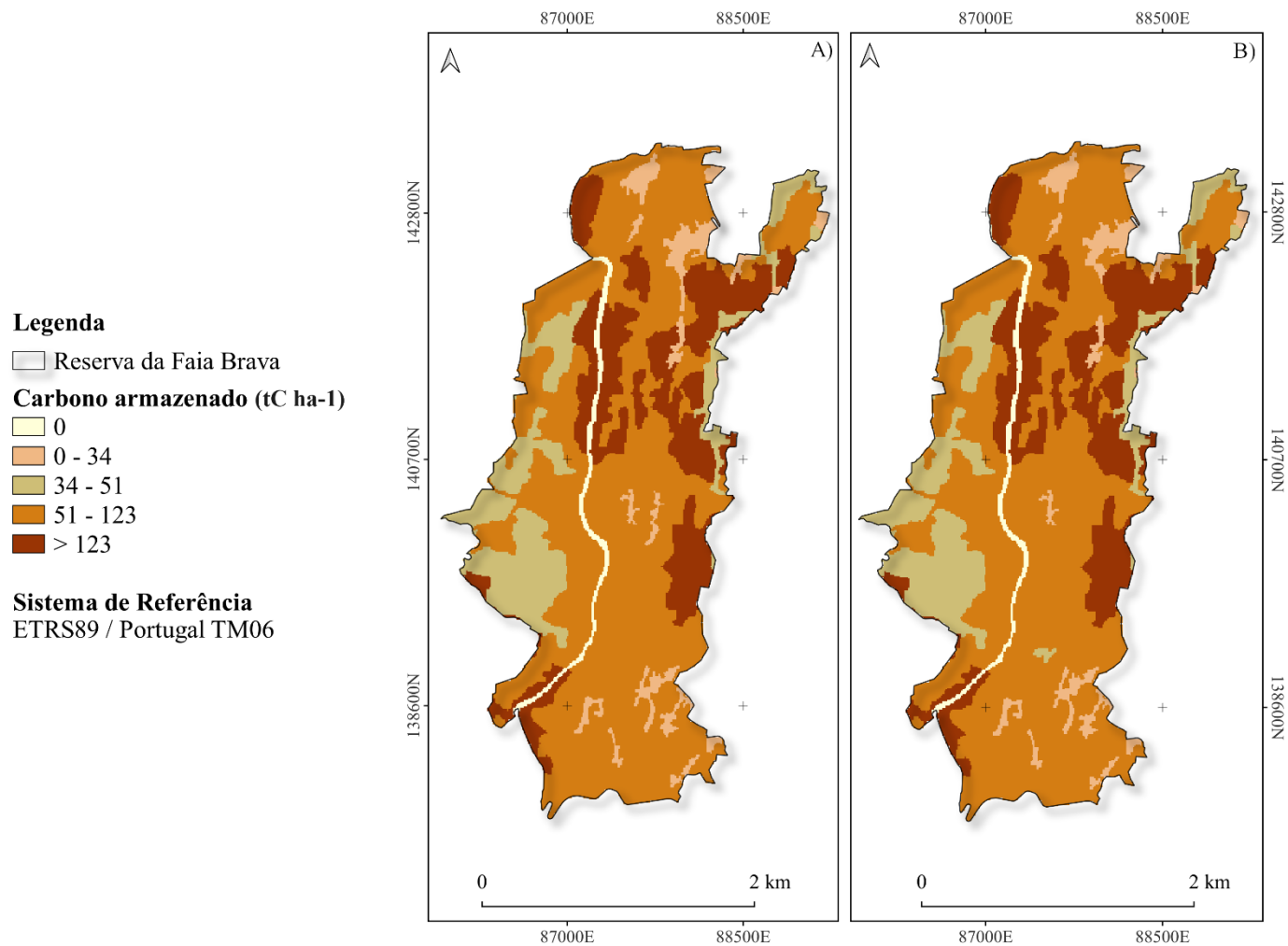


Figura 9: Armazenamento de carbono na Reserva da Faia Brava (tC ha⁻¹) em 1995 (A) e 2018 (B).

É ainda possível observar espacialmente à escala de paisagem que o armazenamento de carbono de 1995 a 2018 não sofreu alterações significativas na área de estudo. Como dito anteriormente, foi possível observar um aumento e diminuição de alguns usos e ocupações do solo, bem como perceber a magnitude dessas mudanças quanto ao armazenamento total na paisagem da reserva. Ao analisar a distribuição espacial do carbono obtiveram-se informações importantes sobre a dinâmica do carbono na paisagem, o que é deveras importante para perceber a importância desses sistemas na regulação do clima na mitigação das mudanças climáticas. Além disso, essa análise pode fornecer percepções úteis para a gestão do ambiente e a implementação de estratégias para sequestro de carbono e redução de emissões.

A distribuição à escala da paisagem do carbono armazenado por compartimento é apresentada no Anexo.

As diferenças na quantidade de carbono armazenado entre os anos em estudo correspondem às alterações do uso do solo ocorridas no período de simulação. Verificou-se que na RFB foram sequestradas 97,17 tC em 23 anos o que corresponde a uma taxa anual média de fixação de carbono de $0,0045 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No estudo de Pinheiro et al. (2014), foi observada uma taxa anual média de fixação de carbono de $0,272 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e no estudo de Sil (2014) de $0,509 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Porém, as áreas avaliadas nesses trabalhos apresentaram taxas de alteração de usos do solo muito elevadas com substituição de áreas agrícolas e matos por floresta em grandes extensões. Forte (2014), no entanto, relatou uma taxa média anual de sequestro de $0,00676 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no Parque Natural da Arrábida, de 17.000 ha, em 32 anos.

Mesmo com uma taxa de fixação de carbono relativamente baixa, no que concerne a mitigação das mudanças climáticas e seus impactos associados, qualquer quantidade de carbono sequestrado é positiva.

4.3 Valoração do carbono sequestrado (1995 - 2018)

Em relação à valoração do carbono, o software InVEST disponibiliza de forma geral, dados de valor económico do carbono sequestrado entre datas simuladas, com base

nos parâmetros preço do carbono, taxa de desconto anual e a variação do preço anual do preço do carbono.

O valor atual do carbono sequestrado na RFB em 2018 foi de 10 054,68 €, (conversão de dólar para euro de acordo com a taxa do dia 18/10/2023). O valor anual do carbono sequestrado na RFB neste período foi assim de 437,16 €/ano.

É considerado um valor bastante reduzido, mas em linha com a baixa variação de carbono armazenado na área. Além disso, o modelo não considera valoração referente a variações internas nas classes de uso do solo. Foram encontrados resultados semelhantes em relação ao baixo valor do sequestro de carbono na pesquisa de Ghafoor et al. (2022). Os autores referem um valor de 3.888,80 € para um período de 11 anos; o estudo foi realizado em uma reserva no Paquistão de 1.652 ha com usos do solo dominados por florestas, vegetação escassa, áreas construídas e agricultura.

4.4 Dinâmica do carbono associada a cenários de alterações na paisagem (2018 - 2041)

A utilização da ferramenta *Scenario Generator: Proximity Based* possibilitou a geração de dois cenários do uso e ocupação do solo (Figura 10). Posteriormente, estes mapas foram inseridos novamente no modelo *Carbon Storage and Sequestration* para análise da dinâmica do carbono com estes cenários.

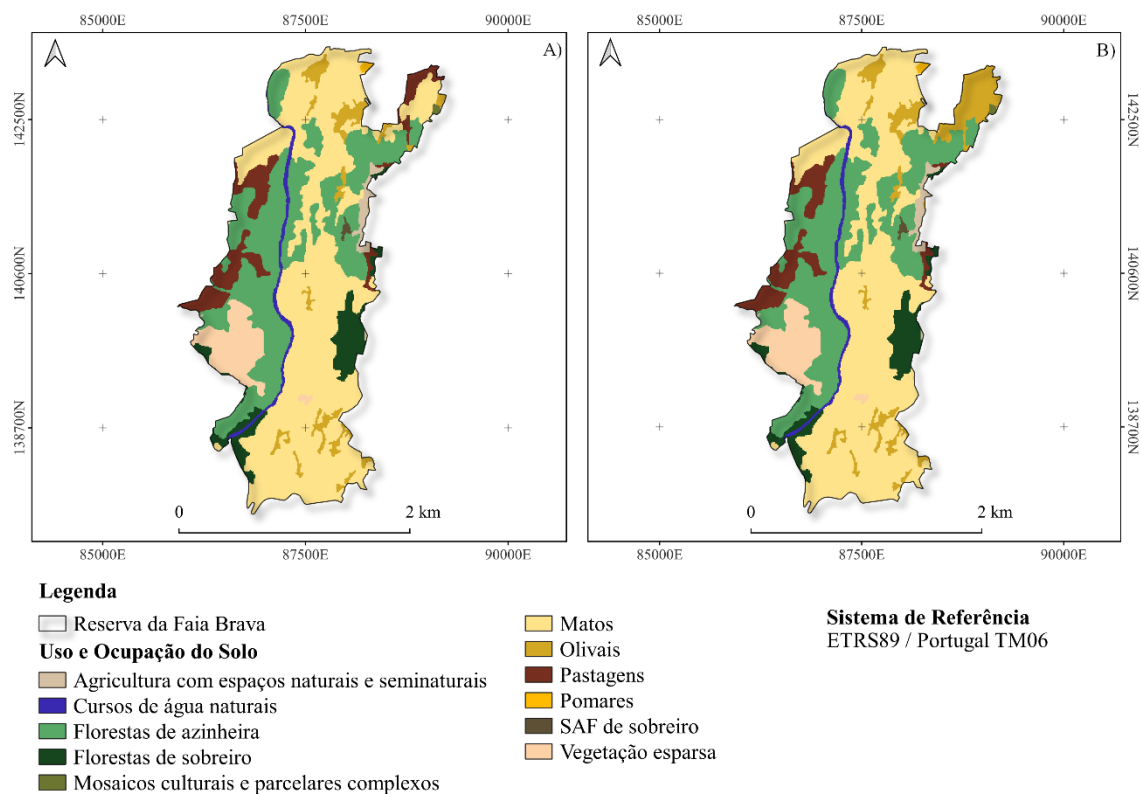


Figura 10: Mapas do uso e ocupação do solo na RFB de acordo com as projeções dos cenários 1 (A) e 2 (B).

A construção de dois cenários hipotéticos possibilitou a estimativa da quantidade de carbono na Reserva da Faia Brava no futuro (2041) e correspondente dinâmica espacial e valoração (Figuras 11 e 12). No cenário 1, observou-se a presença de uma maior cobertura florestal em praticamente toda a extensão do rio Coa que atravessa a reserva e, conseqüentemente, maior quantidade de carbono armazenado (37 665,56 tC).

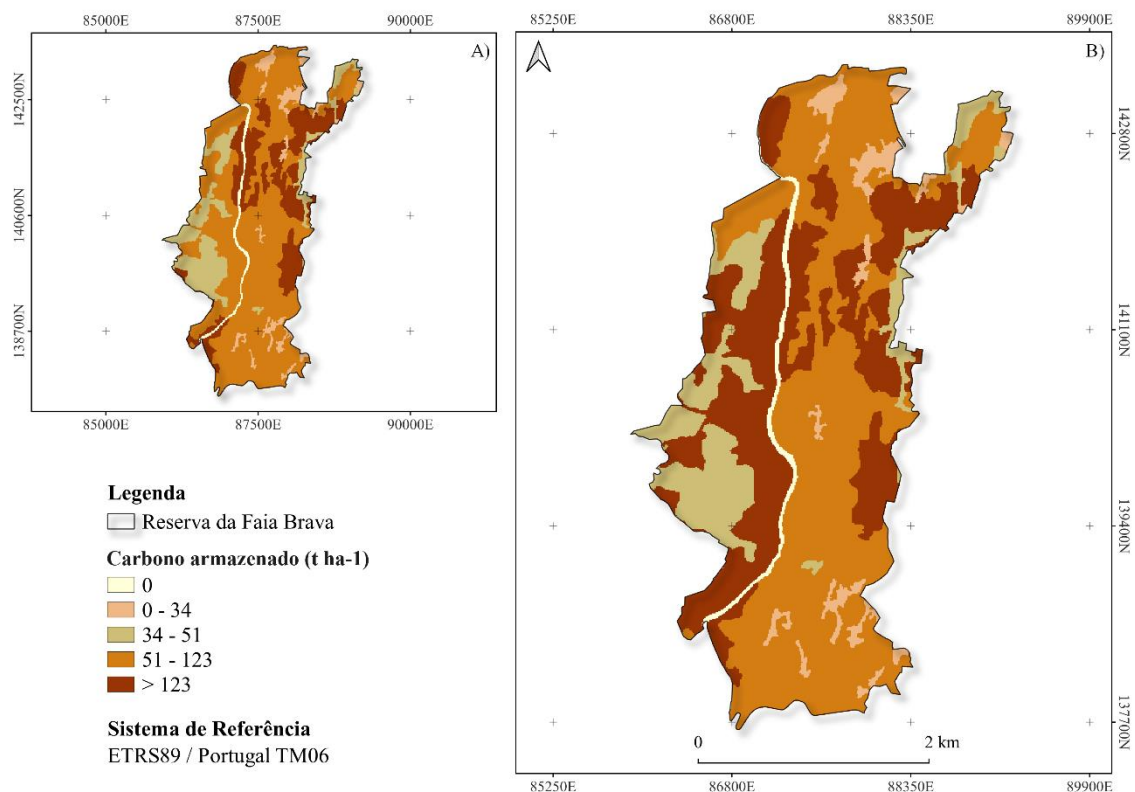


Figura 11: Armazenamento de carbono ($t\ ha^{-1}$) em 2018 (A) e cenário 1 (B).

O carbono armazenado na Figura 11 refere-se a 2018 e 2041 para o cenário 1, com a expansão de 120 ha de áreas de Florestas de azinheira. O carbono armazenado em 2018 foi de 94 818,1 tC, aproximadamente $100,27\ tC\ ha^{-1}$ (A). Já para o cenário 1, para o ano de 2041, o armazenamento de carbono passou para 99 793,52 tC (em média $105,53\ tC\ ha^{-1}$), ocasionando um aumento de aproximadamente 5,25 % do armazenamento total na RFB, explicado pela expansão das áreas de floresta.

Em relação ao sequestro de carbono neste cenário hipotético, observa-se que a reserva, de acordo com a simulação, possui um potencial de sequestrar um valor adicional de 4 975,42 tC até 2041, o que corresponde a uma taxa média de fixação anual de $0,22\ tC\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ em escala de paisagem. Em 2018 este sequestro era de $97,17\ tC$ (entre 1995 e 2018).

Por fim, em relação à valoração deste sequestro, nota-se que com a expansão das áreas de Florestas de azinheira, a simulação de valores agregados passou para 516 284,30

€, já convertidos. Anualmente, esta valoração seria de aproximadamente 22 447,14 € para a RFB, um valor superior ao de 2018.

O cenário 2 considera a expansão das áreas de Florestas de azinheira (120 ha) e um aumento de Olivais (30 ha) na região nordeste da reserva (Figura 12). Neste cenário foi estimado um armazenamento de carbono de 98 220,13 tC ou 103,87 tC ha⁻¹ em 2041 promovendo um aumento de 3 402,03 tC, aproximadamente 4% no armazenamento total na RFB em relação a 2018. As classes de armazenamento seguem o mesmo padrão observado no ano base (2018), bem como no cenário 1, e o aumento de 3 402,03 tC de carbono pode ser explicado pela expansão das áreas de florestas em conjunto com a expansão das áreas de agricultura. Neste cenário, o armazenamento de carbono é menor que no cenário 1. Tal deve-se ao facto de que a expansão dos Olivais foi projetada em áreas em que anteriormente ocorriam classes de uso do solo com mais carbono armazenado. Porém, este aumento no armazenamento corresponderia a uma taxa anual média de fixação do carbono de 0,15 tC ha⁻¹ ano⁻¹ para a paisagem.

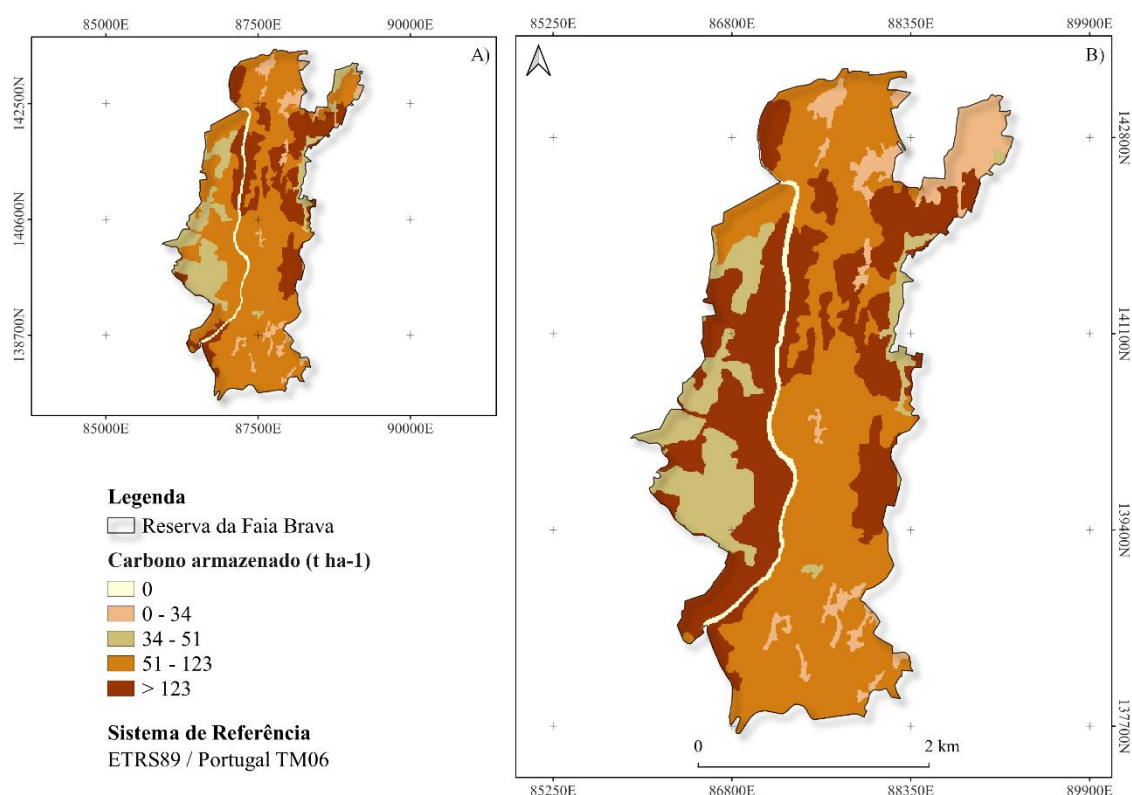


Figura 12: Armazenamento de carbono (t ha⁻¹) em 2018 (A) e no cenário 2 (B).

Sobre a valoração para este cenário, conclui-se que, a reserva pode ter uma valoração de 354 270,02 € em 2041, com a expansão de áreas de florestas e agricultura na região. A valoração anual para este cenário seria de aproximadamente 15 403,04 €.

4.5 Avaliação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O índice NDVI foi calculado para a área de estudo. Os valores obtidos estão compreendidos entre -0,006413 e 0,561328. Com base nos valores obtidos, a área foi classificada com base nas classes estabelecidas de acordo com os intervalos descritos na Tabela 8: solo descoberto e/ou rochoso, corpos d'água, vegetação baixa (arbustos) e vegetação mais densa (Figura 13).

Tabela 8: Distribuição das áreas da Reserva da Faia Brava por classes definidas com base no índice NDVI.

Classe	Intervalo do índice NDVI	Área (ha)	Área (%)
Corpo hídrico	valores negativos	4,6	0,5
Solo descoberto e/ou rochoso	0,1 a 0,2	426,8	45,1
Vegetação baixa (arbustos)	0,2 a 0,3	507,8	53,7
Vegetação mais densa	> 0,3	6,4	0,7

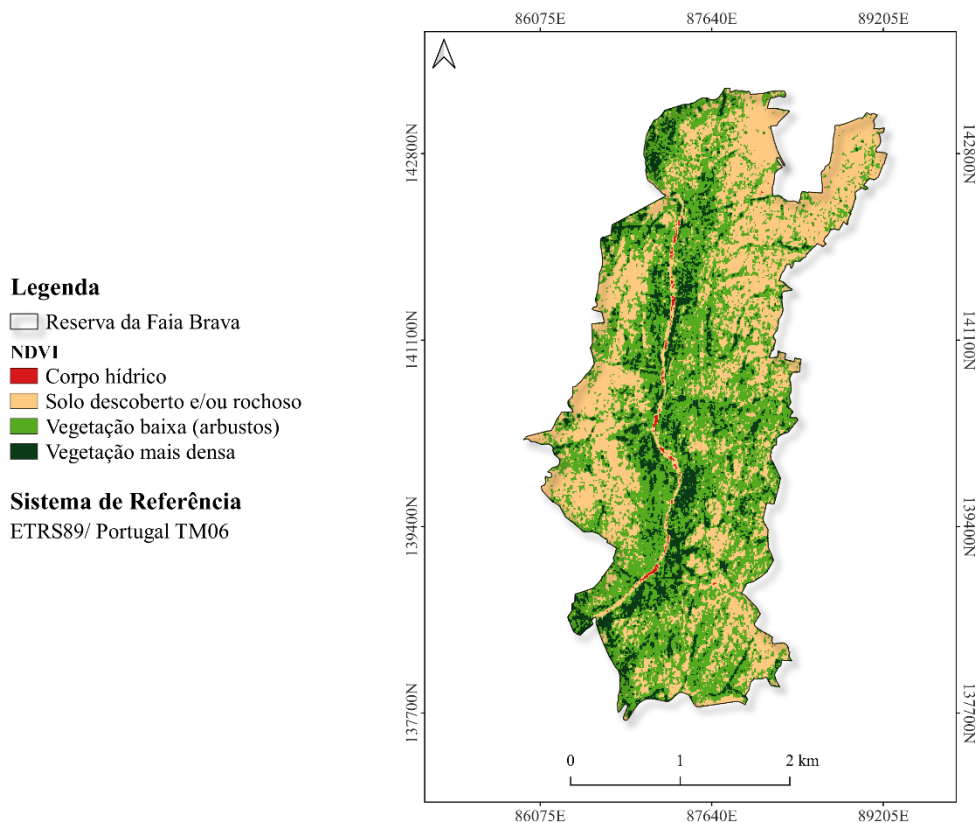


Figura 13: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para a RFB.

É possível observar que os valores mais elevados correspondem à vegetação mais densa na área de estudo, e os valores negativos ao corpo hídrico presente na região, o rio Coa, que percorre praticamente toda a extensão da reserva (Figura 13). Nas margens do rio Coa é possível identificar solo descoberto e/ou afloramentos rochosos. Segundo Sartori et al. (2009), áreas que apresentam corpos hídricos e possuem a presença de solo descoberto e/ou rochoso na proximidade, como é o caso da RFB, podem apresentar índices de vegetação baixos.

De acordo com a classificação da área de estudo baseada no índice NDV, é possível verificar que grande parte do território da RFB é composto por solo descoberto e/ou rochoso (45,1% da área) e que, em contrapartida, apenas 0,7% da área é composta por vegetação mais densa. Observa-se também que a maior parte da área da reserva (53,7%) está ocupada por vegetação mais baixa.

De acordo com a classificação da COS de 2018 e a classificação do índice NDVI, é possível observar que grande parte da classe identificada como Vegetação mais densa,

está inserida em locais com classificação de uso e ocupação referente a áreas de Florestas. A classe de Vegetação baixa (arbustos) é identificada em praticamente todo o território da reserva e em todos os usos e ocupações do solo, bem como a classe de Solo descoberto e/ou rochoso, que também se manifesta em diversos locais da área da reserva.

Capítulo 5

5. Conclusões e trabalhos futuros

Este estudo permitiu a aplicação do modelo InVEST para a avaliação do armazenamento e sequestro de carbono para a RFB entre 1995 e 2018 e também para diferentes cenários futuros para 2041. De um modo geral, não se observaram mudanças significativas no que diz respeito ao uso e ocupação do solo entre os anos estudados (1995 a 2018) na Reserva da Faia Brava, o que se traduz em alterações pouco pronunciadas ao nível do armazenamento e sequestro do carbono e correspondente valor. Observou-se que a maior quantidade de carbono armazenado se encontra no solo e que os usos do solo Matos e áreas de florestas são as classes que mais carbono armazenam, neste caso devido a área ocupada por estas classes na paisagem.

O trabalho permitiu ainda analisar a distribuição espacial do carbono armazenado e sequestrado à escala de paisagem, bem como a dinâmica associada a cenários hipotéticos para a área de estudo no futuro e sua possível valoração em mercado de carbono.

Porém, devido à falta de dados recolhidos no terreno, utilizaram-se dados genéricos, ou seja, dados não específicos para a região da RFB, o que poderá ter consequências ao nível dos resultados. São necessárias, portanto, para trabalhos futuros, amostragens dos quatro reservatórios de carbono em diferentes locais para a área de estudo, a fim de validar os resultados obtidos neste trabalho. Adicionalmente, será necessário realizar um levantamento do atual uso e ocupação do solo a uma escala fina, visto que para este trabalho foram utilizados dados da COS para Portugal Continental, sem o detalhe necessário para aplicações locais muito dependentes da informação do uso e ocupação do solo, como é o caso da modelação em InVEST.

Em relação à valoração do sequestro de carbono, esta foi realizada frente ao ano de 2018 e outros dois cenários hipotéticos para o ano de 2041. Do trabalho realizado conclui-se que, maiores valores económicos do carbono são oriundas de alterações particulares do uso da terra na região, ou seja, expandindo áreas de cobertura florestal por exemplo, a fim de aumentar o carbono armazenado e sequestrado. Assim, este trabalho permitiu oferecer um contributo valioso para a definição dos usos do solo e localizações

onde devem ser introduzidas intervenções de gestão apropriadas, para aumentar o potencial de armazenamento e sequestro de carbono.

Em relação à avaliação do coberto vegetal utilizando o índice NDVI, constatou-se que grande parte da reserva é ocupada por vegetação de porte baixo, e que existem grandes extensões de solo descoberto e/ou rochoso. Esta informação pode contribuir para uma avaliação complementar da vegetação na área, de forma a contornar os problemas relativos à resolução da informação cartográfica do uso e ocupação do solo para a RFB.

Por fim, sabendo que o sequestro e armazenamento de carbono integra o SE de regulação do clima, o tema desta dissertação continuará a ser uma questão de grande importância para a área protegida e a sociedade em geral. Desse modo, as ferramentas de análise e modelação desses serviços, como a plataforma InVEST utilizada neste trabalho, são importantes instrumentos para suportar a gestão do ambiente e do território, e podem ser utilizadas em diferentes esferas e por diferentes órgãos e grupos profissionais.

6. Bibliografia

- Auffhammer, M. (2018). Quantifying Economic Damages from Climate Change. *Journal of economic perspectives*, 32, 33-52. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.33>
- Abrantes, P., Fontes, I., Gomes, E., & Rocha, J. (2016). Compliance of land cover changes with municipal land use planning: Evidence from the Lisbon metropolitan region (1990–2007). *Land Use Policy*, 51, 120-134. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.10.023>
- Amaral, R., Costa, S.D.A.P., & Muzzi, M.R.S. (2017). O sequestro de carbono em trechos da floresta urbana de Belo Horizonte: Por um sistema de espaços livres mais eficiente no provimento de serviços ecossistêmicos urbanos. *Paisagem e ambiente*, 39, 163-179. <https://doi.org/10.11606/issn.2359-5361.v0i39p163-179>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (s.d.). Protocolo de Quioto. <https://apambiente.pt/clima/protocolo-de-quioto>
- Attaway, D. (s.d.). South Carolina Forest Landowners Learn About Carbon Market. Clemson University. <https://sc.audubon.org/news/south-carolina-forest-landowners-learn-about-carbon-market>
- Associação Transumância e Natureza. (s.d.). Quem somos e os nossos projetos. <https://www.faiabrava.pt/>
- Başkent, E. Z. (2021). Assessment and valuation of key ecosystem services provided by two forest ecosystems in Turkey. *Journal of Environmental Management*, 285, 112135. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112135>
- Braat, L.C., & de Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem Services*, 1, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>
- Brulle, R.J., & Dunlap, R.E. (2015). *Climate change and Society: Sociological Perspectives* 1. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199356102.003.0001>
- Caetano, M., Nunes, V., & Nunes, A. (2009). CORINE Land Cover 2006 for Continental Portugal. Lisboa, Instituto Geográfico Português.

- Caetano, M. & Marcelino, F. (2017). CORINE Land Cover de Portugal Continental 1990-2000-2006-2012. Relatório Técnico. Direção-Geral do Território (DGT). https://www.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/documentos-publicos/2017-6-7-14-34-50-93__RTC-61.pdf
- Carvalho, J.L.N., Avanzi, J.C., Silva, M.L.N., Mello, C.R., & Cerri, C.E.P. (2010). Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 277-289. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001>
- Castro, J. I. A. (2020). Utilização da plataforma Invest para estimar os serviços ecossistêmicos no planalto do Rio Grande do Sul. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Repositório digital LUME. <http://hdl.handle.net/10183/233207>
- Ceschia, E., Béziat, P., Dejoux, J.F., Aubinet, M., Bernhofer, C., Bodson, B., Buchmann, N., Carrara, A., Cellier, P., Di Tommasi, P., Elbers, J.A., Eugster, W., Grünwald, T., Jacobs, C.M.J., Jans, W.W.P., Jones, M., Kutsch, W., Lanigan, G., Magliulo, E., Marloie, O., Moors, E.J., Moureaux, C., Olioso, A., Osborne, B., Sanz, M.J., Saunders, M., Smith, P., Soegaard, H., & Wattenbach, M. (2010). Efeitos de gestão no carbono líquido do ecossistema e nos orçamentos de GEE em Locais de cultivo europeus. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139, 363–383. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.09.020>
- Cerqueira, H. M. (2021). Sequestro de Carbono no Solo: Mitigação das Alterações Climáticas em Ecossistemas Mediterrâneos. [Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa]. Repositório Universidade NOVA. <http://hdl.handle.net/10362/117658>
- Common International Classification of Ecosystem Services. (2012). Consultation Briefing Note. <https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/07/CICES-v-4-Consultation-Briefing-Note.pdf>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>

- Cunha, A. S. P. P. (2020). Hidrodinâmica de escoamentos turbulentos na interface de áreas com vegetação – Estudo experimental. [Dissertação de mestrado, Universidade da Beira Interior]. Repositório digital da UBI. <http://hdl.handle.net/10400.6/10580>
- Cruickshank, M. M., Tomlinson, R. W., & Trew, S. (2000). Application of CORINE land-cover mapping to estimate carbon stored in the vegetation of Ireland. *Journal of Environmental Management*, 58, 269-287. <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0330>
- Deng, S., Shi, Y., Jin, Y., & Wang, L. (2011). A GIS-based approach for quantifying and mapping carbon sink and stock values of forest ecosystem: A case study. *Energy Procedia*, 5, 1535- 1545. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.263>
- Direção-Geral do Território. (2022). Especificações técnicas da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) de Portugal Continental para 1995, 2007, 2010, 2015 e 2018. Relatório Técnico. Direção-Geral do Território. <https://www.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/documentos-publicos/ET-COS-1995-2007-2010-2015-2018-v1.pdf>
- Direção-Geral do Território. (s.d.). Cartas de Uso e Ocupação do Solo para Portugal Continental. <https://www.dgterritorio.gov.pt/dados-abertos>
- Dhungana, A., & Deshar, R. (2019). Forest Ecosystem Service Valuation: A Case of the Kalika Community Forest, Dhading, Central Nepal. *Journal of Forests*, 6, 1-14. <https://doi.org/10.18488/journal.101.2019.61.1.14>
- Diaz, D. B. (2014). Evaluating the Key Drivers of the US Government’s Social Cost of Carbon: A Model Diagnostic and Inter-Comparison Study of Climate Impacts in DICE, FUND, and PAGE. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2655889>
- Dôres, L. A. (2020). Armazenamento de carbono e produtividade de lameiros no nordeste de Portugal. [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança]. Biblioteca digital do IPB. <http://hdl.handle.net/10198/24558>
- Duarte, A. S. (2007). Impacto das alterações climáticas na gestão da água. *Revista Águas e Resíduos. Série III*: 2, 58-73.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils – FAO and ITPS. (2015). Status of the world’s soils resources (SWSR) - Main Report. <https://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf>

- Feng, H. (2005). The dynamics of carbon sequestration and alternative carbon accounting, with an application to the upper Mississippi River Basin. *Ecological Economics*, 54(1), 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.02.003>
- Fermanian, T. D. L. (2019). *Relações Internacionais e os Desafios Ambientais. A posição do Brasil nas negociações multilaterais sobre as mudanças climáticas*. [Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.5/18112>
- Fonseca, F., & Figueiredo, T. (2018). Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under four forest species in the Mediterranean region. *Spanish Journal of Soil Science*, 8(1), 42-56. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N1.04>
- Florindo, M. I. R. (2017). *A capacidade de armazenamento de carbono nos ecossistemas em áreas periurbanas da AML*. [Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.5/13409>
- Forte, D. M. C. R. C. (2014). *Identificação dos serviços dos ecossistemas e quantificação do armazenamento e sequestro do carbono na Arrábida utilizando SIG*. [Dissertação de mestrado, Universidade nova de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10362/13204>
- Gallant, K., Withey, P., Risk, D., van Kooten, G.C., & Spafford L. (2020) *Medição e avaliação econômica do sequestro de carbono nas zonas úmidas da Nova Escócia*. *Eco Eco*, 171, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106619>
- Gama, A., Smit, H., Berliner, A., Figueiredo., F., & Gaspar, P. (2010). *Plano de Gestão Área Protegida Privada Faia Brava 2009 - 2019*. Associação Transumância e Natureza - ATN. <https://www.icnf.pt/api/file/doc/506c2fd2fc547374>
- Government Accountability Office (U.S. GAO). (2020). *Social Cost of Carbon: Identifying a Federal Entity to Address the National Academies' Recommendations Could Strengthen Regulatory Analysis*. <https://www.gao.gov/products/gao-20-254>
- Ghafoor, G. Z., Sharif, F., Shahid, M, G., Shahzad, L., Rasheed, R., & Khan, A. U. (2022). Assessing the impact of land use land cover change on regulatory ecosystem services of subtropical scrub forest, Soan Valley Pakistan. *Scientific Reports*, 12, 10052. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14333-4>

- Gallardo, J. F., & Merino, A. (2007). El Ciclo del Carbono y la dinámica de los sistemas forestales. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/35792/1/Elpapel200743.pdf>
- Garrido, N. R. T. (2009). Quantificação da absorção de carbono no Vale do Lima. [Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro]. Repositório Institucional da Universidade de Aveiro. <http://hdl.handle.net/10773/880>
- Gonçalves, I., Fonseca, F., & de Figueiredo, T. (2013). Evolução Temporal do Carbono Armazenado em Povoamentos Florestais Jovens: Efeito da Intensidade de Preparação do Terreno. ISSN 0870-6352. 21, 111-125. Biblioteca digital do IPB. <http://hdl.handle.net/10198/8999>
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2013). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012. https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/07/CICES-V43_Revised-Final_Report_29012013.pdf
- Hisamoto, B. H. T. (2022). A ambição climática sob o Acordo de Paris: as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e a governança híbrida. [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital USP. <https://doi.org/10.11606/T.101.2022.tde-29082022-162920>
- Hong, L. C., Hemati, Z., & Zakaria, R. (2017). Carbon stock evaluation of selected mangrove forests in peninsular Malaysia and its potential market value. *Journal of Environmental Science and Management*, 20(2), 77-87. https://doi.org/10.47125/jesam/2017_2/09
- Hörtenhuber, S. J., Theurl, M. C., Piringer, G., & Zollitsch, W. J. (2018). Consequences from Land Use and Indirect/Direct Land Use Change for CO₂ Emissions Related to Agricultural Commodities. In: *Land Use-Assessing the Past, Envisioning the Future*. IntechOpen. <https://doi:10.5772/intechopen.80346>
- Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. (s.d.). Conservação e caracterização. Área Protegida Privada da Faia Brava. <https://www.icnf.pt/conservacao/rnapareasprotegidas/areasprotegidasprivadas/appfaiabrava>

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva, Switzerland. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Intergovernmental panel on climate change. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In press. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2023). Boletim anual de 2022. https://www.ipma.pt/pt/media/noticias/documentos/2022/Resumo_Climatologico_Ano2022_2.pdf
- Jax, K., Furman, E., Saarikoski, H., Barton, D.N., Delbaere, B., Dick, J., Duke, G., Görg, C., Gómez-Baggethun, E., Harrison, P. A., Maes, J., Pérez-Soba, M., Saarela, S., Turkelboom, F., Dijk, J., & Watt, A. D. (2018). Handling a messy world: Lessons learned when trying to make the ecosystem services concept operational, *Ecosystem Services*, 29, p. 415-427. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.08.001>
- Jensen, J. R. (2009). Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. 2ª ed., São José dos Campos.
- Kanime, N., Kaushal, R., Tewari, S.K., Raverkar K.P., Chaturvedi, S., & Chaturvedi, O.P. (2013). Biomass production and carbon sequestration in different tree-based systems of Central Himalayan Tarai region. *Forests, Trees and Livelihoods*, 22, 38–50. <https://doi.org/10.1080/14728028.2013.764073>
- Kappes, B. B. (2023). Integração de modelagem espacial e sensoriamento remoto como método de avaliação para a lista vermelha de ecossistemas: campo com Barba-de-Bode, Rio Grande Do Sul, Brasil.[Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <http://hdl.handle.net/10183/259337>
- Rattan, L., Pete, S., Hermann, F. J., William., J. M., Johannes L., P.K. Ramachandran. N., Alex B. M., Sá, J.C.M.S., Schneider. J., Zinn, Y.L., Alba, L.A.S., Hai-Lin, Z., Budiman, M., Cherukumalli, S., & Nijavalli, H.R. (2018) *Journal of Soil and Water Conservation*, 73 (6), 145-152. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.6.145A>

- Machado, P. L. (2005). Carbono do Solo e a Mitigação da Mudança Climática Global. *Química Nova*, 28(2). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200026>
- Madeira, M., Ricardo, R.P., Correia, A.C., Garcez, A., Monteiro, F., Raposo, J.A., Constantino, A.T., & Duarte, J.M. (2004). Quantidade de carbono orgânico nos solos de Portugal Continental e particularidades dos solos do Noroeste e dos montados do Sul. *Edafologia*, 11, 279-293. <https://www.researchgate.net/publication/260157800>
- Madureira, L., Magalhães, P., Silva, P. G., Marinho, C., & Oliveira, R. (2013). Economia dos Serviços de Ecossistema – Um guia para conhecer e valorizar serviços de agroecossistemas em áreas protegidas de montanha. <https://saveserradaestrela.files.wordpress.com/2014/05/madureira-et-al-2013-economia-dos-servicos-de-ecossistema.pdf>
- Malik, A., Fensholt, R., & Mertz, O. (2015). Economic Valuation of Mangroves for Comparison with Commercial Aquaculture in South Sulawesi, Indonesia. *Forests*, 6, 3028–3044. <https://doi.org/10.3390/f6093028>
- Malinga, R., Gordon, L.J., Jewitt, G., & Lindborg, R. (2015). Mapping ecosystem services across scales and continents – a review. *Ecosystem Services*, 13, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.01.006>
- Matthew, N. K., Shuib, A., Muhammad, I., Eusop, M.E.M., Ramachandran, S., Mohammad, S.H., & Samdin, Z. (2018) Carbon Stock and Sequestration Valuation in a Mixed Dipterocarp Forest of Malaysia. *Sains Malaysiana*, 47(3), 447-455. <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2018-4703-04>
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI. (s.d.). Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/mecanismo_de_de_senvolvimento_limpo/Mecanismo_de_Developmento_Limpo.html.
- Millennium Ecosystem Assessment - MEA. (2005a). Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press. <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Millennium Ecosystem Assessment - MEA. (2005b). Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis. World Resources Institute. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.355.aspx.pdf>

- Medina, C. E., Medina, Y. K., & Bocardo, E. F. (2020). Economic valuation of carbon capture and storage in the Puna dry of southwestern Peru. *Bosque*, 41(2), 165-172. <https://www.revistabosque.org/index.php/bosque/article/view/249>
- Natural Capital Project - NCP. (2023). InVEST 3.14.0. User's Guide. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences.
- Nie X., Lu B., Chen Z., Yang Y., Chen S., Chen Z., & Wang H. (2020). Increase or decrease? Integrating the CLUMondo and InVEST models to assess the impact of the implementation of the Major Function Oriented Zone planning on carbon storage. *Ecological Indicators*, 118, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106708>
- Ninan, K. N., & Inoue, M. (2013). Valuing forest ecosystem services: Case study of a forest reserve in Japan. *Ecosystem Services*, 5, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.006>
- Nordhaus, W. (2007). Critical assumptions in the stern review on climate change. *Science*, 317, 201–202. <https://doi.org/10.1126/science.1137316>
- Nordhaus, W. D. (2017). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114(7), 1518-1523. <https://doi.org/10.1073/pnas.160924411>
- Nunes, A. C. P. (2019). Influência da presença da raposa nas populações de coelho-bravo na Reserva da Faia Brava. [Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho]. RepositóriUM. <https://hdl.handle.net/1822/65196>
- Olaya, V. (2009). Sistemas de Información Geográfica libres y geodatos libres como elementos de desarrollo. Universidade de Extremadura. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/7584/08_TIG_05_victor.pdf;jsessionid=3930436456DA616DF65040040167D9F7?sequence=1
- Oliveira, T. H., Galvêncio, J. D., Silva, J. S., Silva, C. A.V., Santiago, M. M., Menezes, J. B., Silva, H. A., & Pimentel, R. M. M. (2009). Avaliação da Cobertura Vegetal e do Albedo da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó com Imagens do Satélite Landsat 5. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2865-2872. <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.18.02.00/doc/2865-2872.pdf>

- Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Van Der Linden, P. J., & Hanson, C. E. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf
- Parry, I.W..H., Black, S., & Roaf, J. (2021). Proposal for na Internacional Carbon Price Floor Among Large Emitters. <https://www.imf.org/en/Publications/staff-climate-notes/Issues/2021/06/15/Proposal-for-an-International-Carbon-Price-Floor-Among-Large-Emitters-460468>
- Paustian, K., Andrén, O., Janzen, H.H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., Noordwijk, V., & Woomeer, P.L. (2007). Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use and Management*, 13, 203-244. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00594.x>
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., & Smith, P. (2016) Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- Pinheiro, H. (2009). *Alteração do uso do solo e stocks de carbono na freguesia de Deilão, Bragança*. [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança]. Biblioteca digital do IPB. <http://hdl.handle.net/10198/10964>
- Pinheiro, H., Castro, J. P., & Azevedo, J. (2014). Alterações na paisagem e sequestro de carbono na freguesia de Deilão, nordeste de Portugal. *Revista Árvore*, 38(1), 41-52. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000100004>
- Ponzoni, F. J., Shimabukuro, Y. E., & Kuplich, T. M. (2007). *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. Parêntese Editora. (1 ed.). São Paulo-Brasil. 144 p.
- Raihan, A., Begum, R. A., Said, M. N. M., & Pereira, J.J. (2021). Assessment of Carbon Stock in Forest Biomass and Emission Reduction Potential in Malaysia. *Forests*, 12(10), 1294. <https://doi.org/10.3390/f12101294>
- Ramos, M. A. B. (2008). *Matos do Parque Natural de Montesinho - Erosão Hídrica e Dinâmica do Carbono: Um estudo à micro-escala com Simulação de Chuva*. [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança/Universidade dos Açores]. Biblioteca digital do IPB. <http://hdl.handle.net/10198/1051>

- Roscoe, R., Boddey, R. M., & Salton, J.C. (2006). Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: Modelagem matemática e métodos auxiliares. Embrapa Agropecuária Oeste. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/192419/1/livro-Dinamica....pdf>
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Pp 309–317 in Freden SC (ed) Third Earth Resources Technology Satellite—1 Symposium. Volume I: Technical Presentations. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>
- Sartori, A. A. C, Silva, R. F. B, Pianucci, M. N, Zimback, C. R. L. Influência do período de estiagem no Índice de Vegetação (NDVI), no município de Botucatu-SP. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4363-4369. <http://mar.te.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.11.17.31/doc/4363-4369.pdf>
- Scandellari, F., Caruso, G., Liguori, G., Meggio, F., Palese, A. M., Zanutelli, D., Celano, G., Gucci, R., Inglese, P., Pitacco, A., & Tagliavini, M. (2016). A survey of carbon sequestration potential of orchards and vineyards in Italy. *European Journal of Horticultural Science*. 81(2). 106–114. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2016/81.2.4>
- Schaeffer, M., Eickhout, B., Hoogwijk, M., Strengers, B., Van Vuuren, D., Leemans, R., & Opsteegh, T. (2006). CO₂ and albedo climate impacts of extratropical carbon and biomass plantations. *Global Biogeochemical Cycles*, 2. <https://doi.org/10.1029/2005GB002581>
- Seeberg-Elverfeldt, C. (2010). Carbon Finance Possibilities for Agriculture , Forestry and Other Land Use Projects in a Smallholder Context. <https://www.fao.org/documents/card/ru/c/8722d6d7-0a4f-5541-955f-766eda491a98>
- SENDECO₂. (2023). Precios CO₂ - SendeCO₂. <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- Seripieri, V. H. M. (2023). A transformação da paisagem pastoril no Parque Natural Montesinho (1995 – 2022). [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança]. Biblioteca digital do IPB. <http://hdl.handle.net/10198/28745>

- Sil, Â. R. (2014). Alterações da paisagem e serviços de ecossistema: Quantificação e valorização do sequestro de carbono na bacia superior do Rio Sabor. [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança]. Biblioteca digital do IPB. <http://hdl.handle.net/10198/11578>
- Sil, Â., Fonseca, F., Gonçalves, J., Honrado, J., Marta-Pedroso, C., Alonso, J., Ramos, M., & Azevedo, J. C. (2017) Analysing carbon sequestration and storage dynamics in a changing mountain landscape in Portugal: insights for management and planning, *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13, 82-104. <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1297331>
- Silva, B. B., Galvíncio, J. D., Montenegro, S. M. G. L., Machado, C. C. C., Oliveira, L. M. M, & Moura, M. S. B. (2013). Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(1). <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000100006>
- Socolow R.H., & Pacala S.W. (2006). A Plan to Keep Carbon in Check. *Environment. Scientific American*, 295, 50–57. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0906-50>
- Turetta, A., Farias, C., & Prado, R. B. (2020). O papel dos solos na segurança alimentar. A importância dos solos na agricultura e no meio ambiente. *Embrapa*, 1, 61-76. <https://www.embrapa.br/documents/1355219/57772407/Radar+Solos+-+Dezembro+2020/7355f645-e862-1fba-f68a-7120ffb14558>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2004). *Fisiologia vegetal*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed. p.184-188.
- Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Sharp, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., and Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. (2013). *InVEST 2.5.6 User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford.
- United Nations Climate Change. The Paris Agreement. (s.d.). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. Process and meetings. (s.d.). <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>

- Uva, J. S. (2015). 6º Inventário Florestal Nacional. Relatório Final. <https://www.icnf.pt/api/file/doc/c8cc40b3b7ec8541>
- Vale, D. M. M. (2014) Sequestro de carbono pela floresta portuguesa: possíveis cenários de valorização económica. [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. Repositório aberto da Universidade do Porto. <https://hdl.handle.net/10216/76846>
- Vieira, S. A., Alves, L. F., Duarte-Neto, P. J., Martins, S. C., Veiga, L. G., Scaranello, M. A., Picollo, M. C., Camargo, P.B., Carmo, J. B., Sousa, N. E., Santos, F. A. M., Joly, C. A., & Martinelli, L. A. (2011). Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above-and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range. *Ecology and Evolution*, 1, 421-434. <https://doi.org/10.1002/ece3.41>
- Vieira, J. A. (2019). Estimativa do estoque de carbono presente na biomassa vegetal arbórea do Parque Municipal Américo Renné Giannetti – Belo Horizonte/MG. [Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Minas Gerais]. Repositório institucional do IFMG. <https://repositorio.bambui.ifmg.edu.br/index.php/mpsta/article/view/59>
- Wolff, C. B. (2017). Avaliação dos serviços ecossistêmicos em paisagens agrícolas dos municípios de Ibirubá e Quinze de Novembro (RS) com o protocolo ECOSER. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. <http://hdl.handle.net/10183/174090>
- Yee, S. (2010). REDD and BLUE Carbon: Carbon Payments for Mangrove Conservation. Center for Marine Biodiversity and Conservation. <https://escholarship.org/uc/item/2bc6j8pz>

Anexo

Cartografia do carbono na paisagem da Reserva da Faia Brava

Legenda
 □ Reserva da Faia Brava
c_above (t ha⁻¹)
 0
 0,008
 0,0162
 0,0542
 0,0842
 0,1137
 0,1152
 0,129
 0,2497
 0,3318

Sistema de Referência
 ETRS89 / Portugal TM06

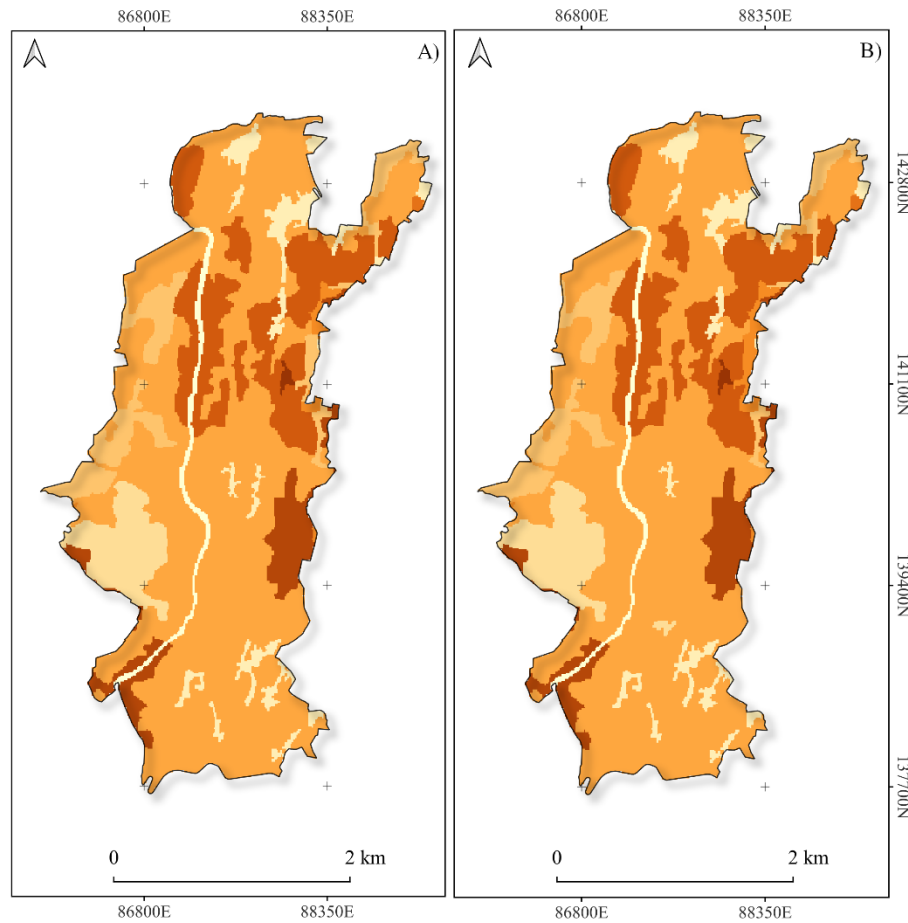


Figura A1: Cartografia da variável c_{above} ($tC\ ha^{-1}$) em 1995 (A) e 2018 (B) na Reserva da Faia Brava.

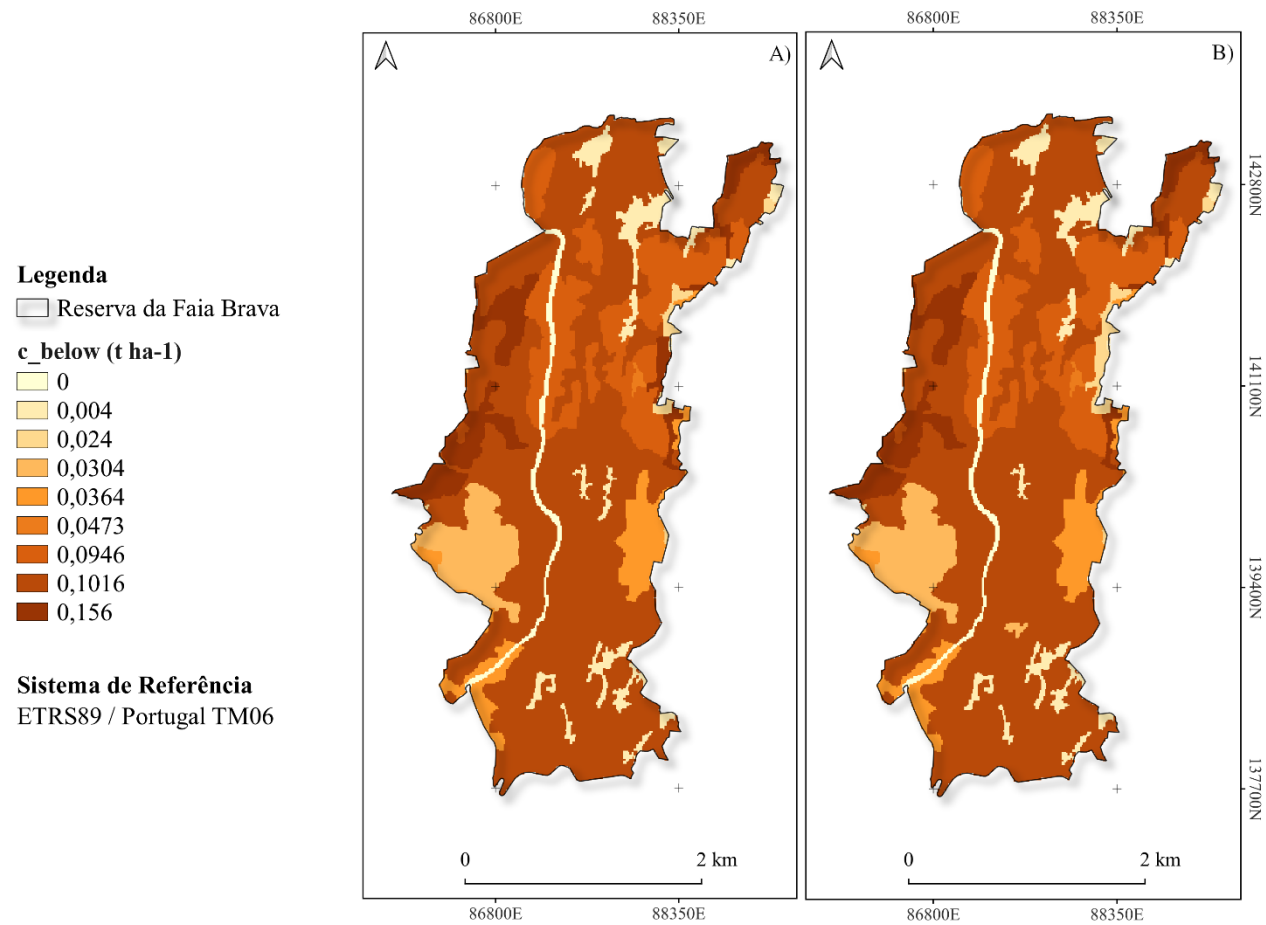


Figura A2: Cartografia da variável c_below (tC ha⁻¹) em 1995 (A) e 2018 (B) na Reserva da Faia Brava.

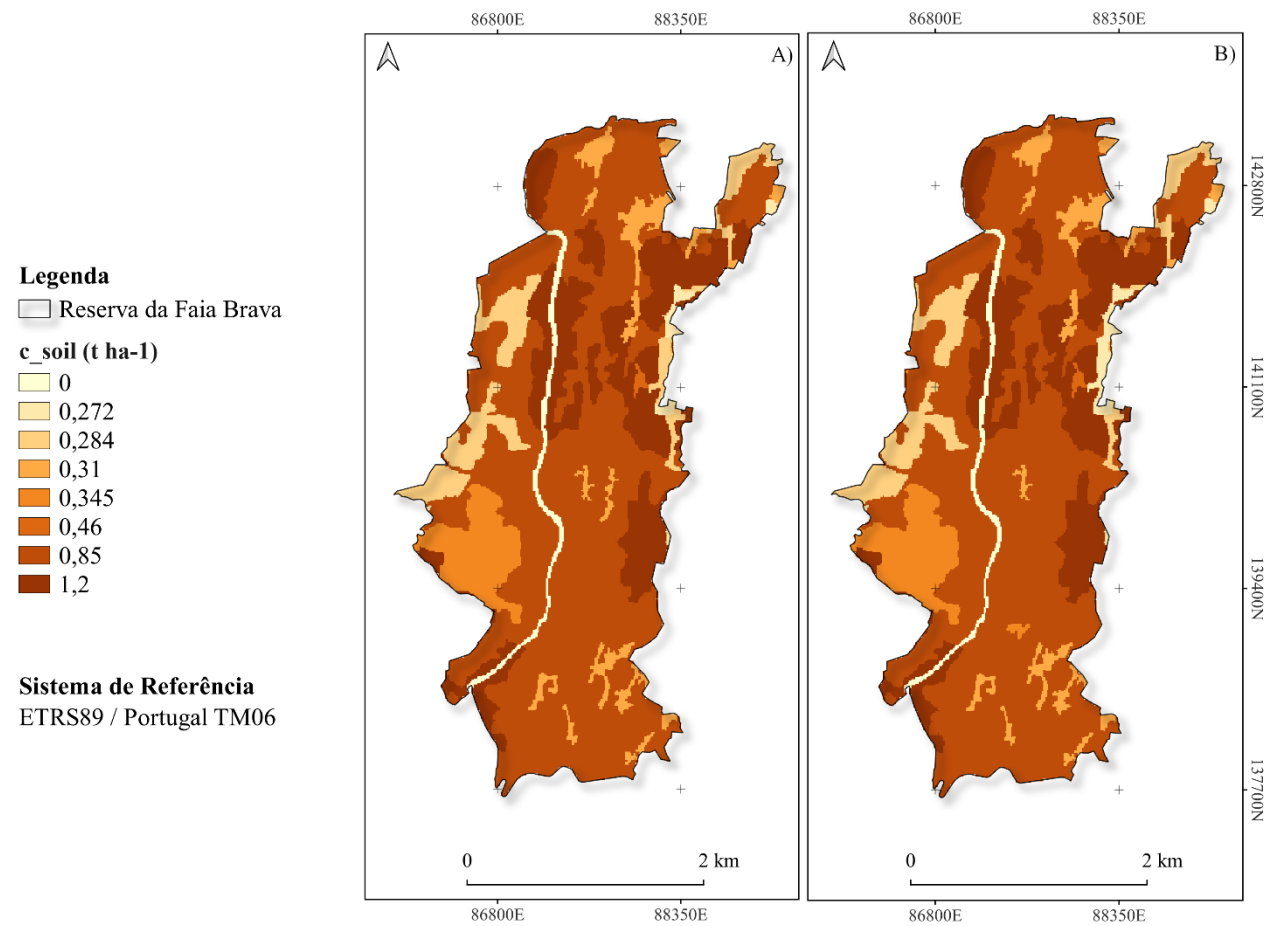


Figura A3: Cartografia da variável c_{soil} (tC ha⁻¹) em 1995 (A) e 2018 (B) na Reserva da Faia Brava.

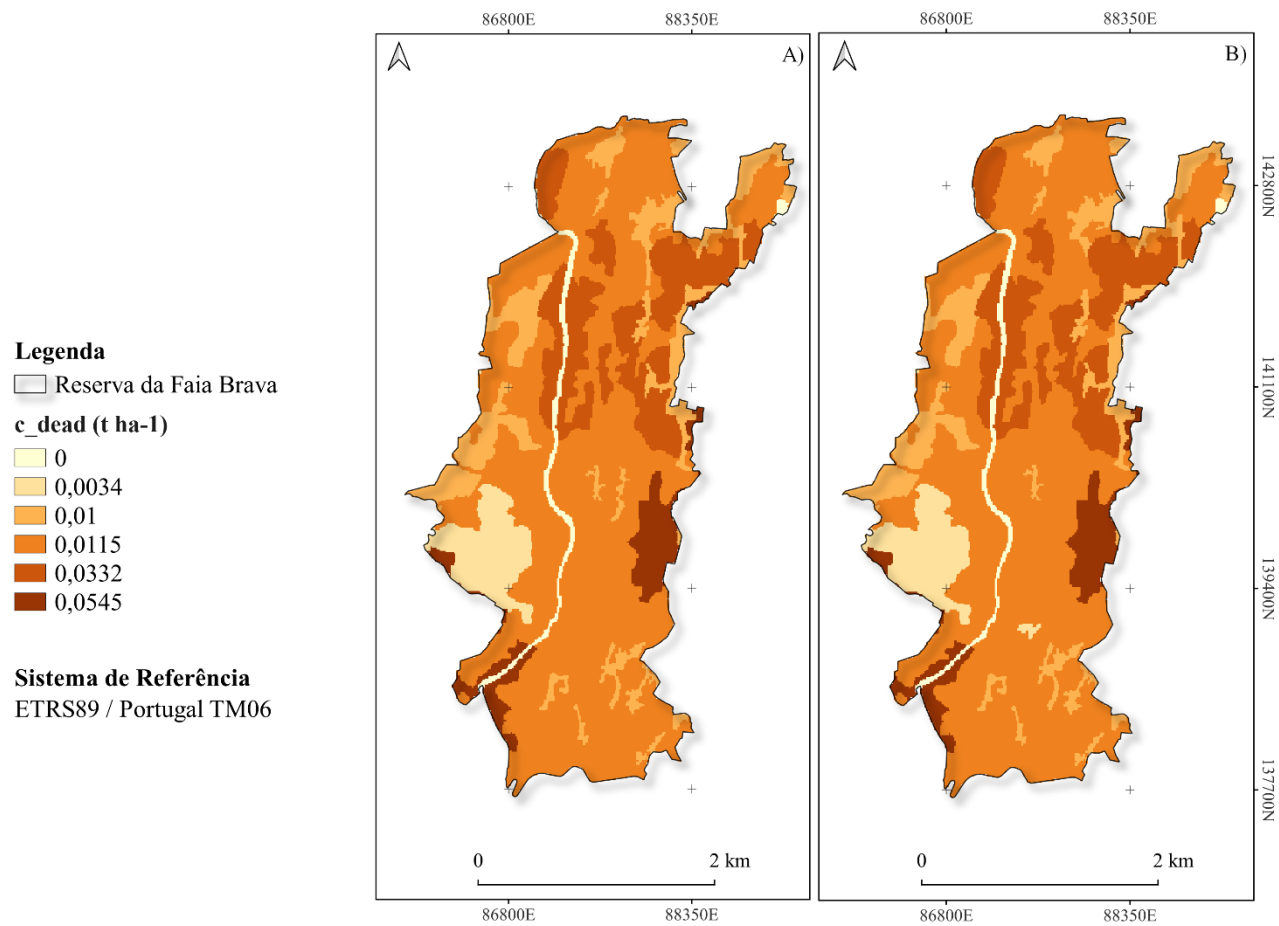


Figura A4: Cartografia da variável c_{dead} ($tC\ ha^{-1}$) em 1995 (A) e 2018 (B) na Reserva da Faia Brava.