



FACULDADE DE LETRAS
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Paulino Edgar Rodrigues Duarte

**AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DE CARBONO ORGÂNICO
EM DIFERENTES REGIMES DE USO DO SOLO: UMA
COMPARAÇÃO ENTRE EXTENSIVO E INTENSIVO EM
SISTEMAS AGRO-PASTORIS**

Dissertação de Mestrado em Geografia Física - Ambiente e Ordenamento do Território,
orientada pelo Professor Doutor Albano Augusto Figueiredo Rodrigues e Professora
Adélia de Jesus Nobre Nunes, apresentada ao Departamento Geografia e Turismo da
Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra

Outubro de 2022

FACULDADE DE LETRAS

AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM DIFERENTES REGIMES: UMA COMPARAÇÃO ENTRE EXTENSIVO E INTENSIVO EM SISTEMAS AGRO-PASTORIS

Tipo de trabalho	Dissertação
Título	Avaliação da quantidade de carbono orgânico do solo em diferentes regimes: uma comparação entre extensivo e intensivo em sistemas agro-pastoris
Autor/a	Paulino Edgar Rodrigues Duarte
Orientador/a(s)	Albano Augusto Figueiredo Rodrigues Adélia de Jesus Nobre Nunes
Júri	Presidente: Doutor Rui Ferreira de Figueiredo Vogais: 1. Doutor Doutor António Campar de Almeida 2. Doutor Doutor Albano Augusto Figueiredo Rodrigues
Identificação do Curso	2º Ciclo em Geografia Física - Ambiente e ordenamento do Território
Área científica	Ciências da Terra
Especialidade/Ramo	Geografia Física
Data da defesa	21 Outubro de 2022
Classificação	16 valores

Índice

Agradecimentos.....	4
Resumo.....	5
Abstract	6
Índice de figuras	7
Índice de Tabelas.....	9
Índice de Gráficos	10
Lista de Acrónimos	11
1. Introdução	12
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 Problemática do trabalho.....	17
1.3 Divisão do trabalho	18
2. Enquadramento Teórico.....	19
3. Revisão da Literatura Científica	24
4. Caracterização da Área de Estudo	30
4.1 Localização Geográfica e Características Físicas	30
4.2 Caracterização Climática.....	36
5. Metodologia.....	40
6. Apresentação e discussão dos resultados	45
6.1 Propriedades Físicas do Solo.....	45
6.1.1 Areia Grossa.....	45

6.1.2 Areia Fina.....	48
6.1.3 Limo	50
6.1.4 Argila	52
6.1.5 Densidade Aparente (DA).....	55
6.2 Propriedades Químicas do solo	57
6.2.1 pH do solo	57
6.2.2 Fósforo (P)	60
6.2.3 Potássio (K).....	62
6.2.3 Matéria orgânica (MO)	66
6.2.4 Carbono Orgânico (CO).....	69
7. Conclusão.....	72
8. Bibliografia	74

Agradecimentos

A dissertação de mestrado, além de ser um trabalho de realização pessoal, é também um esforço de outras pessoas, nomeadamente, professores, família e amigos. Sem o seu especial contributo tal concretização não seria possível.

Na presente dissertação apresento os meus mais sinceros agradecimentos e ao mesmo tempo parablenizo todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para o resultado que é aqui apresentado.

Deste modo, deixo um agradecimento em especial às seguintes pessoas:

Ao meu orientador, o Professor Albano Figueiredo por todo o apoio, disponibilidade, atenção, conhecimento e ensinamentos transmitidos desde à vários anos. Agradecer todo o esforço no acompanhamento e logística que o difícil trabalho de campo obedeceu.

Em segundo, agradecer à minha coorientadora, a Professora Adélia Nunes, também por toda a disponibilidade atenção e ensinamentos transmitidos. Agradecer também todo o esforço dedicado no acompanhamento e logística no trabalho de campo.

Por último, não posso deixar de agradecer a todos os professores desde o ensino primário até à presente conclusão do mestrado, pelos conhecimentos e competências que foram transmitidos ao longo deste longo percurso académico. Todo este esforço conjunto, ajudaram a moldar a pessoa que sou hoje, certamente um ser humano mais capaz para enfrentar todos os desafios esperados e inesperados ao longo de toda a carreira, académica e profissional.

Agradecer ao projeto CULTIVAR (www.icultivar.pt) pelo apoio financeiro para desenvolvimento dos trabalhos realizados em campo e em laboratório.

Resumo

Avaliação da Quantidade de Carbono Orgânico do Solo em Diferentes Regimes: Uma Comparação Entre Extensivo e Intensivo em Sistemas Agro-Pastoris

As alterações climáticas, nomeadamente o aumento da temperatura média do ar da atmosfera, são uma realidade, e a sua mitigação uma necessidade urgente. Este aumento deve-se sobretudo ao aumento da concentração de dióxido de carbono presente na atmosfera, que por consequência perturba o normal ciclo hidrológico. Esta perturbação origina eventos hidrológicos extremos como períodos de seca prolongados ou curtos períodos de precipitação intensa, o que por sua vez provoca inúmeras consequências negativas para os solos e ecossistemas. É do conhecimento geral da comunidade científica que parte do dióxido de carbono presente na atmosfera é de origem antrópica. O sequestro e armazenamento deste gás nos solos é uma possível solução natural para o problema. As práticas agrícolas, se ajustadas, podem também contribuir para aumentar a capacidade de sequestro de carbono nos solos.

O presente trabalho procura avaliar qual dos regimes de uso do solo, intensivo ou extensivo, pode contribuir para uma maior capacidade de sequestro de carbono no solo, considerando o contexto climático mediterrâneo. Para este estudo foram recolhidas amostras de solo a diferentes profundidades em diferentes regimes de uso do solo, tendo sido considerados os usos do solo com maior representatividade na área de estudo, ou seja, as pastagens e os pomares. Para cada amostra de solo foram avaliados parâmetros físicos (Areia grossa, Areia Fina, Limo, Argila, Densidade Aparente) e químicos (pH, Potássio, Fosforo, Matéria Orgânica e Carbono Orgânico). Os resultados obtidos indicam que os solos analisados são genericamente solos franco-argilosos, pobres, com baixo teor em carbono orgânico, não se tendo identificado diferenças significativas entre os usos intensivos e extensivos.

Palavras-chave: Alterações Climáticas, Matéria Orgânica, Solo, uso intensivo vs extensivo.

Abstract

Assessment of the quantity of soil organic carbon in different land use regimes: a comparison between extensive and intensive in agro-pastoral systems

Climate change, namely the increase in the average air temperature of the atmosphere, is a reality and its mitigation an urgent need. This trend is largely due to the increase in the amount of carbon dioxide in the atmosphere, which disturbs the normal hydrological cycle, promoting drought events or short periods of intense precipitation, which in turn causes negative impacts in ecosystems. It is estimated that part of the carbon dioxide in the atmosphere is of anthropogenic origin, and its capture and storage in the soil is seen as a natural solution to this problem. Adjusted agricultural practices might contribute to carbon sequestration, promoting mitigation of climate change. This work aims to evaluate which of the regimes, intensive or extensive, in agricultural practices, has the greatest capacity for carbon sequestration. For this study, soil samples were collected at different depths in different land use regimes, having by reference land use types with higher prevalence in the study area, ie, pastures and orchards. Each soil sample was subjected to laboratory analysis, where physical (coarse sand, fine sand, silt, clay, apparent density) and chemical properties were assessed (pH, Potassium, Phosphorus, organic matter and organic carbon). The results obtained indicate that the analysed soils are generically loamy soils with low organic carbon content. Based on results, no significant differences between intensive and extensive land uses were found considering organic carbon content.

Keywords: climate change; organic matter, soil

Índice de figuras

Figura 1: Localização Geográfica da área de estudo.....	30
Figura 2: Carta de Ocupação dos solos de áreas de pastagens e áreas agrícolas.	31
Figura 3: Carta de ocupação do solo.	31
Figura 4: Carta hipsométrica da área de estudo.	34
Figura 5: Carta de declives da área de estudo.	35
Figura 6: Recolha de amostras de solo aos 10, 20 e 30 centímetros de profundidade em pastagens intensivas.	41
Figura 7: Recolha de amostras de solo aos 10, 20 e 30 centímetros de profundidade em pastagens extensivos	41
Figura 8: Recolha de amostras de solo aos 10, 20 e 30 centímetros de profundidade em pomares intensivos.....	42
Figura 9: Recolha de amostras de solo aos 10, 20 e 30 centímetros de profundidade em pomares extensivos.....	42
Figura 10: Diagrama de classificação da textura do solo.....	47
Figura 11: Percentagem de areia grossa para diferentes profundidades e usos do solo.....	47
Figura 12: Percentagem de areia fina para diferentes profundidades e usos do solo.....	49
Figura 13: Percentagem de limo para diferentes profundidades e usos do solo	51
Figura 14: Percentagem de argila para diferentes profundidades e usos do solo.....	54
Figura 15: Densidade aparente do solo para as diferentes profundidades e usos do solo.....	56
Figura 16: Variação do pH do solo para as diferentes profundidades e uso do solo.	59
Figura 17: Variação dos valores de Fósforo extraível para diferentes profundidades e usos do solo	62
Figura 18: Variação dos valores de Potássio para diferentes profundidades e usos do solo....	65

Figura 19: Percentagem de matéria orgânica para diferentes profundidades e usos do solo ... 68

Figura 20: Percentagem de carbono orgânico para diferentes profundidades e usos do solo .. 71

Índice de Tabelas

Tabela 1: Pesquisa base dados SCOPUS, ano 2000-2020.	27
Tabela 2: Valores médios mensais de temperatura e precipitação 1981-2010.	39
Tabela 3: Valores médios anuais de temperatura e precipitação 1986 – 2015.	39
Tabela 4: Resultados Teste Anova para diferentes usos do solo.....	46
Tabela 5: Escala de Acidez dos solos.....	58
Tabela 6: Classes de fertilidade do Fósforo no solo.....	61
Tabela 7: Classes de fertilidade do Potássio no solo.....	64
Tabela 8: Classe de fertilidade dos solos de matéria orgânica.	67

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Número de artigos publicados por ano. Palavra-chave: alterações climáticas.	24
Gráfico 2: Percentagem de documentos produzidos por área de investigação sobre as Alterações Climáticas.....	25
Gráfico 3: Variação da precipitação total anual e da temperatura média anual entre 1986 e 2015.	36
Gráfico 4: Gráfico termopluviométrico para o distrito de Castelo Branco.	38
Gráfico 5: Valores médios mensais de temperatura para o distrito de Castelo Branco. Série Climática 1981-2010.....	38

Lista de Acrónimos

- 1- CICES ---- Common International Classification of Ecosystem Services
- 2- CO₂ ---- Carbono Orgânico
- 3- IPCC ---- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 4- ISO - International Organization for Standardization
- 5- ISSS - International Society for the Systems Sciences
- 6- Ha --- Hectares
- 7- K ---- Potássio
- 8- P ---- Fósforo
- 9- PH ----- Acidez do Solo
- 10- PPM---- Parte por Milhão
- 11- CH₄ ---- Metano
- 12- N₂O ---- Óxido nitroso
- 13- SF₆ ---- Hexafluoreto de enxofre
- 14- HFC --- Hidrofluorcarboneto
- 15- PFC -----Perfluorcarbono
- 16- µm ---- Micrómetro
- 17- FAO ---- Food and Agriculture Organization

1. Introdução

A subida da temperatura média do ar da atmosfera é, atualmente, a maior adversidade que o planeta enfrenta, pelos efeitos extremamente negativos que o aumento de temperatura pode vir a gerar (Adiaha *et al.*, 2019; Nakazawa, 2020).

Este aumento produz os mais variados efeitos negativos nos ecossistemas terrestres e marinhos, entre eles a fusão do permafrost; a perda de massa dos glaciares; registo de eventos hidrológicos extremos (secas e precipitação); aumento da quantidade e dimensão dos incêndios florestais, entre outros (Dunn *et al.*, 2020; Potschin, 2018).

As consequências negativas verificam-se também no solo, mais especificamente na capacidade de fornecimento dos diversos serviços dos ecossistemas (Pereira *et al.*, 2018), desde serviços de aprovisionamento a suporte (Hackbart *et al.*, 2017; Haines-Young & Potschin-Young, 2018).

A atmosfera é composta por diversos gases, entre eles, 78% nitrogénio, 21% oxigénio e o restante 1% é composto por outros gases. No grupo dos outros gases encontra-se o CO₂, que se estima que represente cerca de 0.04% de todos os gases da atmosfera (Matthes *et al.*, 2021; Nakazawa, 2020).

No protocolo de Quioto foram identificados seis diferentes gases da atmosfera que contribuem para o efeito de estufa, entre eles o CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFC e PFC (Dentener *et al.*, 2001; Mohajan, 2011). Todos estes gases são eliminados da atmosfera através de processos fotoquímicos, da própria atmosfera, à exceção do CO₂ (Dentener *et al.*, 2001).

No processo de mitigação das alterações climáticas encontram-se a ser implementadas algumas medidas, identificadas no relatório elaborado pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022) entre elas, medidas industriais e naturais.

Algumas medidas industriais de captura de CO₂ implementadas, surgem através da aplicação de solventes nos gases produzidos pelas indústrias antes de serem libertados para a atmosfera, de modo a evitar a libertação do CO₂. Também a substituição dos mecanismos de combustão que produzem CO₂ por outros mecanismos que não emitam este tipo de gás para a atmosfera tem sido promovida.

Para além da captura industrial deste gás, outras medidas podem ser equacionadas para o sequestro de CO₂, através do aumento da área florestal, do melhoramento de práticas agrícolas, da diminuição da desflorestação e do aumento da qualidade dos solos, com vista a torna-los mais produtivos (Barbosa *et al.*, 2013). É importante salientar que este mecanismo de captura de CO₂ da atmosfera de forma natural realiza-se através dos processos de fotossíntese ou através de reações químicas do CO₂ em contacto com superfície do oceano (Adams & Caldeira, 2008; Toniolo & Carneiro, 2015).

As medidas de captura e sequestro de carbono orgânico tornam-se necessárias devido ao aumento dos gases com efeito de estufa na atmosfera, consequência direta da atividade antrópica, responsável por cerca de 76% de todo o dióxido de carbono emitido (Adiaha *et al.*, 2019; Farquhar *et al.*, 2001; Franks & Hadingham, 2012; Mohajan, 2011; Nakazawa, 2020; Sil *et al.*, 2017).

Segundo Farquhar *et al.* (2001) e Lal (2004) as duas principais fontes antrópicas de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera são a queima de combustíveis fósseis e as alterações no uso dos solos (principalmente devido a processos de desflorestação).

O primeiro tratado internacional onde foi alcançado um acordo com o objetivo comum de reduzir as emissões de gases com efeito estufa com foco nos países desenvolvidos foi o protocolo de Quioto, onde cerca de cerca de 175 países participaram (Barbosa *et al.*, 2013). No debate da redução de emissões de gases com efeito de estufa, a União Europeia fixou como meta para a neutralidade carbónica o ano de 2050. Entre as soluções para a atingir a meta fixada

pela união europeia da neutralidade carbónica, destaca-se o sequestro carbono no solo, como uma robusta resposta natural e imediata (Lal, 2004b; Rumpel & Chabbi, 2021).

Apenas metade das emissões totais de dióxido de carbono são enviadas para a atmosfera, sendo que, a outra metade se divide entre a dissolução no oceano e o sequestro pelos diversos serviços do ecossistema (Farquhar *et al.*, 2001). É nesta emissão e captura que se verifica um desequilíbrio (verificando-se um superavit), devido ao aumento das emissões deste gás através da intensa atividade humana, o que resulta num aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (Farquhar *et al.*, 2001).

No sistema terrestre estão identificados os quatro grandes reservatórios de carbono, entre eles: a atmosfera, a biosfera, os oceanos e os solos. As trocas entre estes quatro reservatórios de carbono constituem o ciclo do carbono (Nakazawa, 2020). Entre os grandes reservatórios, o solo é o segundo maior, contendo aproximadamente 3.3 vezes mais carbono que a atmosfera (Lal, 2004a). O maior destes reservatórios é o oceano, com cerca de 50 vezes mais carbono que a atmosfera (Farquhar *et al.*, 2001).

Apesar de ser uma fonte importante de sequestro de carbono, o solo é também uma fonte de emissão deste gás, através da erosão dos solos, da alteração no seu uso e ocupação, de práticas agrícolas aplicadas incorretamente e pela desflorestação. Caso fosse possível restituir ao solo todo o dióxido de carbono libertado pelas alterações no uso do solo, calcula-se que a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera seria reduzida entre 40 a 70 ppm (Farquhar *et al.*, 2001; House *et al.*, 2002).

Na sequência da revolução industrial e com a utilização de combustíveis fósseis como fontes energéticas, a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera teve um aumento significativo, registando atualmente um valor de 418 ppm¹. Valores de CO₂ tão elevados como

¹ - Valores para Julho de 2021. Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) - <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>.

os da atualidade nunca foram registados na atmosfera. Para verificar a quantidade de CO₂ na atmosfera no passado um conjunto de investigadores realizaram uma investigação utilizando bolhas de ar presas no gelo ártico, e calcularam que no final século XVIII e início do século XIX o dióxido de carbono na atmosfera apresentava aproximadamente valores de 280 ppm (Farquhar *et al.*, 2001; Hellevang & Aagaard, 2015). Na mesma investigação foi também acentuado que desde há 800 milhões de anos, os valores de dióxido de carbono presentes na atmosfera nunca haviam ultrapassado as 300 ppm (Beerling & Royer, 2002).

Na atualidade, com o aumento da quantidade de gases com efeito de estufa na atmosfera, estima-se que a temperatura média do ar possa aumentar entre 1.5°C a 2°C até ao ano de 2100 (Bindi *et al.*, 2019).

Como consequência do aumento do dióxido de carbono na atmosfera, são conhecidos alguns dos seus efeitos diretos na superfície terrestre e nos ecossistemas tais como: fusão das calotas polares e aumento do nível do mar, alterações nos ecossistemas, migrações humanas e de animais, aumento da acidez dos oceanos, extinção de espécies, ocorrência de fenómenos meteorológicos extremos e frequentes, entre outras (Bindi *et al.*, 2019; Haddaway *et al.*, 2015).

A utilização de práticas agrícolas sustentáveis, a utilização de culturas de cobertura e pousio, a expansão de sistemas agroflorestais, a longo prazo aumentar e/ou mantêm a quantidade e a qualidade da matéria orgânica no solo, e assim contribuem para melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, além de aumentar o sequestro de carbono (Haddaway *et al.*, 2015; Lal, 2004a).

A degradação do solo é um problema grave na Europa, provocado ou acentuado por práticas agrícolas e silvícolas inadequadas, atividades industriais, turismo, expansão urbana e industrial. Estas atividades têm impactos negativos, diminuindo a capacidade do solo para fornecer funções e serviços. No relatório da Comissão Europeia (Comissão Europeia, 2020)

foram identificadas as principais ameaças que os solos apresentam na Europa, nomeadamente: a erosão, a diminuição da matéria orgânica, a contaminação do solo, a impermeabilização do solo, a diminuição da biodiversidade, a salinização, cheias e desabamentos de terras.

Em Portugal, estima-se que aproximadamente 70% do território português não possui elevada aptidão agrícola (H. M. Pereira *et al.*, 2009) o que resulta em cerca de 30% dos solos em território nacional com aptidão elevada para a agricultura. Somado a isso, tem sido observado uma tendência em Portugal de perda de usos de solo tradicionais, como culturas agrícolas de sequeiro (Nunes *et al.*, 2012).

Para o desenvolvimento da presente investigação foi selecionada a área de estudo na Beira Baixa, administrativamente no distrito de Castelo Branco. Nesta área os solos ocupam uma posição central nos desafios agroalimentares, sendo necessário um conhecimento mais aprofundado do tipo de solo e das suas características. A área em estudo necessita de estratégia de desenvolvimento territorial, que promova e consolide a colaboração entre instituições de ciência, tecnologia e ensino superior e agroalimentar.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo geral avaliar a existência de diferenças na capacidade de sequestro de carbono entre usos do solo de regime intensivo e extensivo, procurando contribuir para esclarecer qual regime de uso do solo é mais eficaz com o objetivo de aumentar a capacidade de sequestro de carbono nas paisagens de matriz agrícola.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão sistemática no âmbito das áreas temáticas do trabalho, com base em artigos científicos na plataforma SCOPUS, utilizando diferentes combinações de palavras-chave.
- Avaliar as condições dos solos (propriedades físicas e químicas) na área em estudo e considerando diferentes usos do solo.
- Avaliação de diferenças no solo, nomeadamente em termos de carbónico orgânico, nos pomares e pastagens, sujeitos a diferentes regimes ou sistemas (extensivo ou intensivo) para avaliar a capacidade de retenção carbono orgânico no solo.

1.2 Problemática do trabalho

Tendo em vista que grande parte dos resultados publicados relativamente à relação entre usos do solo e carbono orgânico centram-se sobretudo na comparação e quantificação da quantidade de carbono orgânico nos solos segundo os diferentes usos (agrícola, florestal ou pastagens), subsistem dúvidas se dentro do mesmo uso pode haver diferenças significativas

considerando diferenças no regime ou sistema de manejo, nomeadamente entre o intensivo e o extensivo. Neste contexto, colocou-se a seguinte pergunta:

- Existem diferenças significativas em termos de capacidade de sequestro de carbono orgânico no solo entre os sistemas intensivos e extensivos?

1.3 Divisão do trabalho

A presente dissertação de mestrado encontra-se dividida em quatro capítulos. O capítulo 1 introduz a importância do estudo, seguindo-se a abordagem teórica nos diferentes âmbitos. O capítulo 2 contempla a descrição da área em estudo e a metodologia aplicada na recolha de amostras. O capítulo 3 apresenta e discute os resultados obtidos. O capítulo 4 apresenta as principais conclusões.

2. Enquadramento Teórico

O solo é um recurso natural, por si só não renovável, e de suporte à vida na terra (Dominati, 2013; Vasu *et al.*, 2020), com capital natural de múltiplas funções e fornecedor de diversos serviços, com o potencial de contribuir significativamente para as economias nacionais e para o bem-estar humano (Dick, 1994; J. Ö G. Jónsson *et al.*, 2017). Todavia, este recurso, encontra-se sob crescente pressão devido às atividades antrópicas (Jón Örvar G. Jónsson & Davíðsdóttir, 2016), tornando-se a sua degradação uma das maiores ameaças à existência de vida na superfície terrestre (Baer & Birgé, 2018; Vasu *et al.*, 2020).

Este recurso fornece a base a todas as funções dos ecossistemas, sendo composto por vários elementos, nomeadamente pela fração mineral, organismos vivos, matéria orgânica, água e oxigénio (Coelho *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2005).

A fração mineral do solo resulta da decomposição da rocha por processos de meteorização, que levam à sua desagregação em diferentes tamanhos, desde partículas mais grosseiras, até partículas mais finas, como a areia, o limo ou a argila. Para estes processos de meteorização contribuem as condições climáticas (precipitação, vento e temperatura) as formas do relevo e os organismos vivos (Coelho *et al.*, 2013).

A matéria orgânica surge da decomposição dos restos de animais e plantas por parte dos microrganismos, como bactérias, fungos. Depois de toda a matéria se decompor forma-se o húmus, que se encontra sobretudo nas camadas superficiais do solo. Este nutriente favorece a fertilidade, a permeabilidade ao ar e à água e contribui para melhorar a qualidade dos solos (Coelho *et al.*, 2013).

A quantidade de água presente no solo também é importante na dinâmica dos ecossistemas, uma vez que as plantas a absorvem através do sistema radicular, transportando os nutrientes para a sua parte superior, além de aumentar a atividade dos microrganismos

existentes. A retenção de água no solo possui relação com a sua textura (mecânica do solo), sendo que quanto mais arenoso o solo, menor é a sua capacidade de retenção (Coelho *et al.*, 2013).

A discussão sobre a qualidade dos solos intensificou-se no início dos anos 1990, quando a comunidade científica, consciente da sua importância, começou a abordar, nas suas investigações e publicações, a preocupação com a degradação dos recursos naturais, a sustentabilidade agrícola e a função do solo neste âmbito (Araújo *et al.*, 2012; Vezzani & Mielniczuk, 2009).

A primeira tentativa de registo científico do conceito de solo é datada dos finais do século XVIII (Hartemink, 2016). A partir dessa época a comunidade científica propôs uma definição para este conceito, com base na sua composição e demais características (Hartemink, 2016). Com o desenvolvimento científico, o conceito de solo foi reformulado, tendo surgido diversas definições. O autor Hartemink (2016) em “*The Definition of Soil Since the Early 1800s*” encontrou 81 definições de solo, sublinhando a evidente ausência de uma definição consensual, visto que as definições de solo variam dependendo da área científica ou da função atribuída (Araújo *et al.*, 2012; Hartemink, 2016; Nortcliff *et al.*, 2011).

Em termos gerais, e em conformidade com os objetivos da presente dissertação, o solo pode ser entendido como a camada superior da crosta terrestre formado na interseção da litosfera, biosfera, atmosfera e hidrosfera (Nortcliff *et al.*, 2011), atuando como um regulador natural na maioria dos processos dos ecossistemas, fornecendo a base física para inúmeras atividades humanas (Pereira *et al.*, 2018).

Dada a grande variedade de funções essenciais, manter um solo saudável, rico e em bom estado é fundamental para a sustentabilidade dos ecossistemas do planeta. Contudo, o solo encontra-se ameaçado por toda uma série de atividades antrópicas que reduzem a sua

disponibilidade e viabilidade a longo prazo, contribuindo para a sua rápida degradação (Jón Örrvar G. Jónsson & Davíðsdóttir, 2016).

O solo é um recurso não renovável, que se degrada rapidamente, sendo os processos de recuperação relativamente lentos (Dick, 1994). Para promover a sustentabilidade agrícola, foi necessário a definição de diversos indicadores de qualidade do solo (Dick, 1994). Assim, é possível identificar a qualidade do solo através de diversos indicadores, nomeadamente visuais, químicos, físicos e biológicos (Drobnik *et al.*, 2018; Muñoz-Rojas, 2018).

Os indicadores visuais do solo identificam-se pelas observações realizadas em campo das propriedades qualitativas do solo, como a estrutura, a consistência, manchas, a profundidade das raízes, o desenvolvimento radicular, a população de minhocas, a atividade de roedores, etc. São facilmente interpretados e não são analisados laboratorialmente.

Os principais indicadores químicos do solo, (também conhecidos como nutrientes) são o potássio, o fósforo e o nitrogénio, além de outros indicadores químicos como a acidez ou a quantidade de matéria orgânica (Muñoz-Rojas, 2018).

Os indicadores físicos, como a textura do solo (percentagem de particular finas ou areias, grosseiras, silte e argila) e a densidade aparente, entre outros, também são utilizados para definir a qualidade de um solo (Dominati, 2013).

Os indicadores biológicos estão relacionados com a presença de microrganismos que desempenham um papel importante na decomposição da matéria orgânica e na reciclagem de nutrientes. É a matéria orgânica que permite que se verifiquem várias funções e processos biológicos, físicos e químicos no solo (Vasu *et al.*, 2020; Vezzani & Mielniczuk, 2009).

No âmbito biológico, a existência de vegetação protege os solos da degradação, da erosão, e aumentam a capacidade de sequestro de carbono. Os diferentes serviços prestados pela vegetação são extremamente importantes para o status social, económico e humano (saúde)

da sociedade (Adhikari & Hartemink, 2016; Jón Örvar G. Jónsson & Davíðsdóttir, 2016; Nortcliff *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2018).

A agricultura surge neste contexto como um uso do solo importante e ao mesmo tempo como uma atividade prejudicial, sobretudo quando a utilização de maquinaria acelera o processo de erosão, aumentando a libertação de gases com o efeito de estufa, e a perda da biodiversidade (Baer & Birgé, 2018). O aumento da produção agrícola intensiva, as curtas rotações de culturas, o uso de herbicidas e pesticidas, a criação industrial de gado, são consideradas práticas insustentáveis e prejudiciais para os solos, da biota, da matéria orgânica, aumentando assim a compactação, acidificação, erosão e salinização do solo (Pereira *et al.*, 2018; Vasu *et al.*, 2020).

Vários estudos na temática dos usos do solo e do carbono orgânico afirmam que as alterações no uso do solo podem originar ganhos ou perdas de carbono orgânico, sendo as conversões para uso agrícola geradoras de perdas significativas na quantidade de carbono orgânico (Ahirwal *et al.*, 2021; Jiao *et al.*, 2009; Nadal-Romero *et al.*, 2021; Ploepplau & Don, 2013; Tang *et al.*, 2019).

Em processo inverso, conversão de uso agrícola por pastagens ou uso florestal, promove o aumento significativo da percentagem de carbono orgânico disponível no solo (Ahirwal *et al.*, 2021; Bell *et al.*, 2020; Nadal-Romero *et al.*, 2021; Yellajosula *et al.*, 2020).

Nas alterações do uso do solo, de uso florestal para pastagens, ou vice-versa, conclui-se que, em regra, não se verificam alterações significativas na quantidade de carbono orgânico nos solos. No entanto, é indispensável algum cuidado nesta análise, devido a fatores que poderão influenciar os valores de carbono orgânico. Fatores como a idade da floresta e a sua composição têm influência, pois florestas adultas sequestram maior quantidade de carbono do que florestas jovens. Em termos de composição, salienta-se as espécies nativas, pelo facto de estarem melhor adaptadas ao clima, apresentando uma maior eficácia no sequestro de carbono, em comparação

com florestas de espécies não autóctones (Ahirwal *et al.*, 2021; Aryal *et al.*, 2018; Schwendenmann & Pendall, 2006; Tau Strand *et al.*, 2021).

Os processos de ganhos/perdas de carbono orgânico podem ainda ser retardados ou acelerados, pela influência de alguns fatores como a quantidade de precipitação, o número de horas de exposição solar entre outros, e deste modo em zonas de clima árido registam-se perdas de carbono orgânico a um ritmo mais acelerado devido a uma menor quantidade de precipitação comparativamente a zonas húmidas, onde a precipitação é mais regular e abundante (Tang *et al.*, 2019; Yellajosula *et al.*, 2020).

A iniciativa internacional denominada *4 per 1000: Soils for Food Security and Climate Initiative*, que ocorreu em França em 2015, durante a COP 21, reuniu mais de uma centena de países e/ou instituições dos diversos continentes. A reunião teve como principal objetivo incentivar os diferentes países a sequestrarem mais carbono do que aquele que emitem, e a armazená-lo nos solos, onde o objetivo passa por alcançar uma cooperação entre diferentes setores da sociedade, como: investigadores, empresas públicas e privadas, políticas e o público a fim de aumentar o armazenamento de carbono nos solos agrícolas em 0,4% a cada ano, e assim contribuir para a mitigação das alterações climáticas, mas também da segurança alimentar.

3. Revisão da Literatura Científica

No presente capítulo da dissertação são apresentados os resultados de uma revisão da literatura das temáticas desta dissertação, firmada sob uma abordagem sistemática incidindo na consulta de artigos disponíveis na plataforma *SCOPUS*. Na realização da pesquisa foi utilizada a língua inglesa por ser o idioma em que se encontram redigidos a grande maioria dos artigos publicados.

Nos resultados da pesquisa na plataforma *SCOPUS* confirma-se um aumento das investigações nos últimos 20 anos (de 2000 a 2020) em alguns dos temas desta dissertação, como as alterações climáticas (Gráfico 1). Este crescente interesse pelas alterações climáticas justifica-se pelo crescente aumento das preocupações da comunidade científica global com as consequências dos seus efeitos a curto, médio e longo prazo do aumento da temperatura média do ar da atmosfera (Junges & Massoni, 2018).

Documents by year

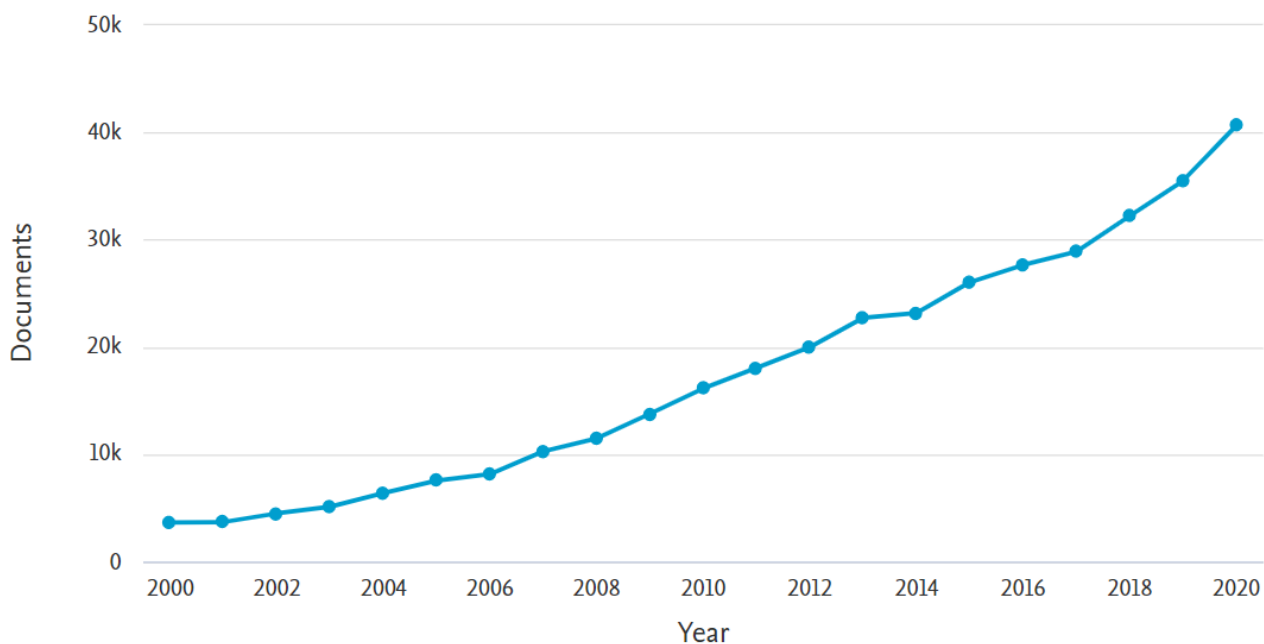


Gráfico 1: Número de artigos publicados por ano. Palavra-chave: alterações climáticas.

*Fonte dados: SCOPUS, 2022

As áreas de investigação científica onde mais se produzem publicações sobre o tema das alterações climáticas, segundo dados do *SCOPUS*, são sobretudo as áreas das ciências do ambiente e das ciências da terra, e em terceiro lugar as áreas agrícolas e na área da biologia (Gráfico 2).

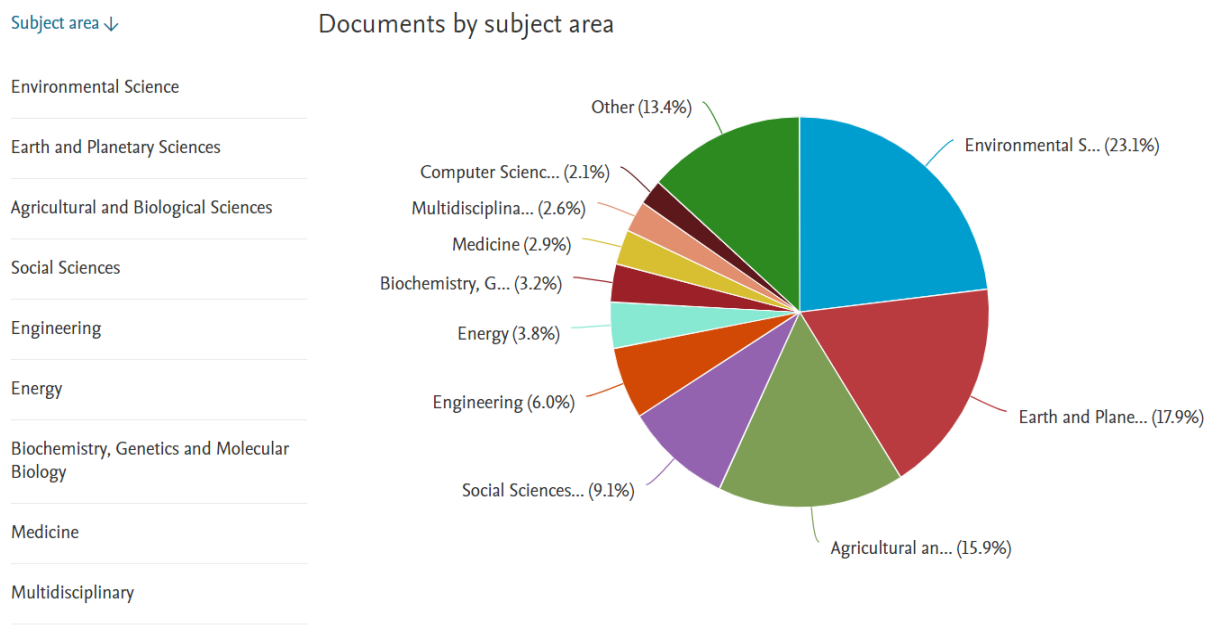


Gráfico 2: Percentagem de documentos produzidos por área de investigação sobre as Alterações Climáticas.

*Fonte dados: SCOPUS, 2022

De modo a orientar a revisão sistemática de forma mais pormenorizada foram adicionados diversos filtros na plataforma *SCOPUS*. Na pesquisa realizada foi elaborada uma filtragem das publicações com base numa série histórica, para amostragem das obras publicadas no período compreendido entre os anos 2000 e 2020.

A primeira pesquisa realizada utilizou palavras-chaves de forma individual (nomeadamente *Climate Change*, *Soil Organic Carbon* e *Land use*), o que apresentou um número muito elevado de artigos, dificultando a análise (Tabela 1). Por isso, foram combinados conjuntos de palavras relacionadas com o tema da dissertação de modo orientar a pesquisa no aprimoramento dos resultados.

No caso do conjunto de palavras-chave *climate change and Soil Organic Carbon* (alterações climáticas e carbono orgânico no solo) foi obtido um resultado de 7668 artigos publicados. Numa outra pesquisa realizada, foram utilizadas as palavras-chave *land use and climate change* (uso do solo e alterações climáticas) obtendo como resultado o valor de 50070 artigos publicados na plataforma (Tabela 1). Já na combinação das palavras-chave *land use and Soil Organic Carbon* (uso do solo e carbono orgânico no solo), obteve-se um resultado de 12194 artigos científicos publicados (Tabela 1).

Foram ainda combinadas as três principais palavras-chave da pesquisa (*Soil Organic Carbon and land use and climate change*) os quais os resultados obtidos foram de 2279 artigos publicados a nível internacional (Tabela 1).

Para além de considerar as palavras-chave mais generalistas já evidenciadas (Carbono Orgânico no Solo, uso do solo e alterações climáticas) foi considerado também um outro conjunto (mais detalhado) de palavras-chave nesta pesquisa.

O primeiro grupo de palavras pesquisado refere-se às expressões *irrigated agricultural and soil organic carbon* (agricultura de regadio e carbono orgânico no solo) que resultou em 405 artigos científicos publicados (Tabela 1). O segundo grupo de palavras pesquisado considerou as seguintes expressões: *rainfed agricultural and soil organic carbon* (agricultura de sequeiro e carbono orgânico no solo), que obteve um resultado de 244 artigos publicados (Tabela 1).

Para quantificar a produção científica nacional do tema, foi utilizada a mesma ferramenta de pesquisa de artigos científicos nacionais e estrangeiros, a plataforma *SCOPUS*, utilizando o filtro para restringir os resultados apresentados a autores portugueses e/ou artigos publicados e/ou realizados em Portugal, utilizando o mesmo período temporal (ano de 2000 a 2020).

Na compilação das palavras-chave “*Climate change and Soil Organic Carbon*” (alterações climáticas e carbono orgânico no solo) verificou-se um total de 42 artigos publicados (Tabela 1).

Na utilização de “*Soil organic carbon and land use*” (carbono orgânico no solo e uso do solo) verificou-se um resultado de 54 artigos publicados e, por fim, na junção das três palavras-chave “*land use and Soil Organic Carbon and Climate Change*” verificou-se um resultado de 17 artigos publicados (Tabela 1).

Seguindo a mesma linha de pesquisa, foi inserido, na SCOPUS, as palavras-chave em conjunto “*irrigated agricultural and soil organic carbon*” (agricultura de regadio e carbono orgânico no solo) obtendo um resultado de 5 artigos publicados por autores portugueses e/ou artigos publicados e/ou realizados em Portugal (Tabela 1).

Seguidamente foi utilizada o conjunto das palavras-chave “*rainfed agricultural and soil organic carbon*” (agricultura de sequeiro e carbono orgânico no solo) apresentado um resultado de 4 artigos publicados autores portugueses e/ou artigos publicados e/ou realizados em Portugal (Tabela 1).

Tabela 1: Pesquisa base dados SCOPUS, ano 2000-2020.

Palavra-chave	INT	NAC
Climate change	362967	4305
Soil orgnic carbon	56881	300
Land use	493947	4288
Climate change and land use	50070	589
Soil orgnic carbon and climate change	7668	42
Soil orgnic carbon and land use	12194	54
Soil organic carbon, climate change and land use	2279	17
Irrigated agricultural and soil organic carbon	405	5
Rainfed agricultural soil and organic carbon	244	4

*Pesquisa internacional (INT); Pesquisa Nacional (NAC). Fonte de dados: Scopus.

Os resultados apresentados confirmam uma reduzida investigação sobre a quantificação da quantidade de carbono orgânico na comparação de culturas de regadio e sequeiro realizados em Portugal ou por autores portugueses (Tabela 1).

Dos artigos analisados, pode-se afirmar com algum cuidado que em diferentes latitudes, e em diferentes climas, o padrão de ganho e perdas de carbono orgânico é semelhante nos regimes de regadio e de sequeiro, verificando-se maiores ganhos de carbono orgânico em sistemas de regadio em comparação com a utilização de sistemas de sequeiro (Campos *et al.*, 2020; Emde *et al.*, 2021; Giubergia *et al.*, 2013).

Esta afirmação é corroborada por Yellajosula *et al.* (2020) e Tang *et al.* (2019) que afirmam que a quantidade de água disponível influencia a quantidade de carbono orgânico nos solos.

Na Europa Mediterrânea (clima mediterrâneo marcado por verões quentes e invernos com precipitação abundante) o padrão mantém-se, onde a alteração do uso do solo de agrícola de sequeiro para agricultura de regadio tem um impacto significativo na quantidade de carbono orgânico nos solos, na medida que se verifica um aumento de carbono orgânico nos sistemas de regadio (Pareja-Sánchez *et al.*, 2020).

Na compilação dos artigos analisados, verificou-se, que nas últimas duas décadas (2000-2020) os temas são bastante debatidos, investigados, atuais e que relevam grande interesse por parte da comunidade científica.

Numa segunda fase, procurou-se analisar de forma sucinta os principais usos do solo no contexto do clima mediterrâneo, nomeadamente, uso florestal, uso do solo em pastagens e usos agrícolas, segundo publicações apresentadas na plataforma *SCOPUS*.

Reduzindo a escala de análise, foram analisados artigos com referência às diversas alterações nos usos do solo no continente europeu.

Os resultados analisados indicam que as alterações no uso do solo perturbam significativamente a percentagem de carbono orgânico em todos os tipos de uso do solo, com exceção na conversão do uso do solo para pastagens e florestas (Muhammed *et al.*, 2018). Os resultados indicam ainda que converter solos agrícolas para pastagens ou florestas pode

umentar a quantidade de carbono orgânico no solo (Ahirwal *et al.*, 2021; Bell *et al.*, 2020; Muhammed *et al.*, 2018; Schwendenmann & Pendall, 2006).

Em síntese, os resultados indicam:

- a) **Alteração do uso agrícola para pastagens** promove de forma significativa o sequestro de carbono orgânico, sendo o aumento mais significativo de entre todas as alterações analisadas (Evrendilek *et al.*, 2004).
- b) **Alteração de pastagens para uso agrícola** promove uma perda significativa em termos de capacidade de sequestro de carbono (Evrendilek *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2019).
- c) **Alteração de pastagens para uso florestal** e vice-versa – os resultados publicados não registam alterações significativas na quantidade total de carbono orgânico no solo (Jiao *et al.*, 2009); Ploepplau and Don (2013); (Schwendenmann & Pendall, 2006).
- d) **Alteração de uso agrícola para florestal** - também regista um valor aproximado ao das pastagens, ou seja, verifica-se um aumento da quantidade de carbono no solo (Ahirwal *et al.*, 2021; Koga *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020), o que revela um aumento da capacidade de sequestro.
- e) **Alteração do uso florestal para uso agrícola** verifica-se o processo inverso da alínea anterior, ou seja, verifica-se uma perda significativa de carbono orgânico no solo (Jiao *et al.*, 2009; Nadal-Romero *et al.*, 2021; Schwendenmann & Pendall, 2006).

Também o abandono agrícola, tal como confirmado por Nadal-Romero *et al.* (2021), para clima mediterrâneo, considerando o restabelecimento da dinâmica da vegetação, promove o aumento de carbono orgânico no solo.

4. Caracterização da Área de Estudo

4.1 Localização Geográfica e Características Físicas

O presente estudo foi desenvolvido na Beira Baixa, Região centro de Portugal Continental, administrativamente no distrito de Castelo Branco (Figura 1). Um território que integra o Maciço Hespérico, na designada "Zona Centro-Ibérica" (Clamote, 2011). A área de estudo possui uma superfície total de 560521ha, dos quais 115448ha (20,6%) representam um uso agrícola, 59436ha (10,6%) estão associados a pastagens (Figura 2), e os restantes (385 637ha) a outros usos (florestas, zonas agroflorestais, territórios artificializados, matos, incultos, espaços descobertos ou com pouca vegetação e corpos de água superficiais).

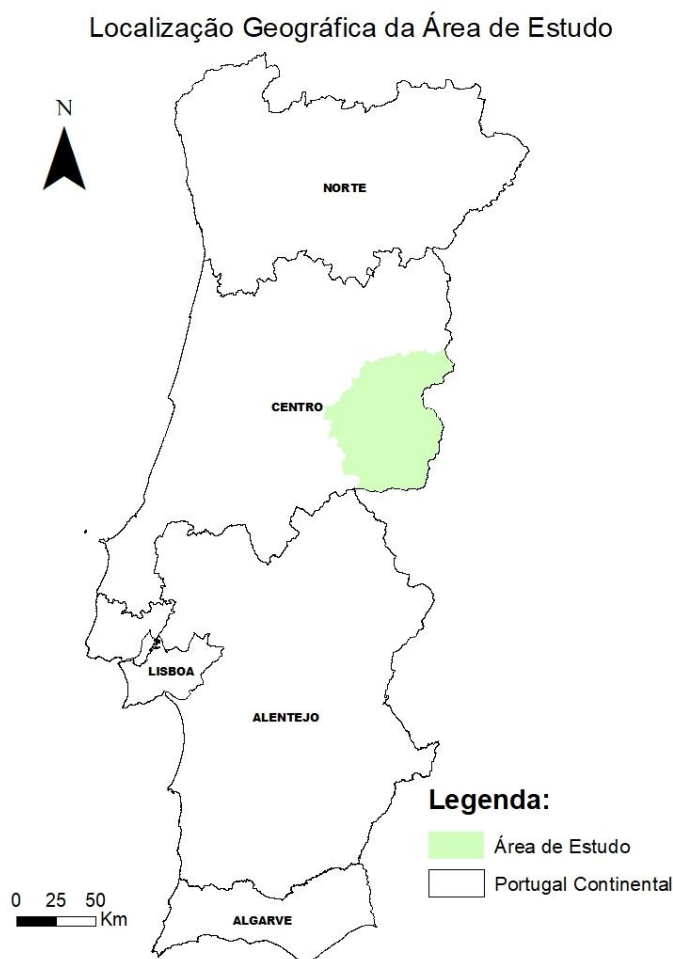


Figura 1: Localização Geográfica da área de estudo.

Uma área que recentemente tem registado um aumento significativo das culturas de regadio, nomeadamente pomares explorados em regime intensivo.

No que se refere aos dois tipos de sistemas de uso do solo em questão, estes correspondem a cerca de 31,2 % de toda a área de estudo, ou seja aproximadamente 1/3 da área total, onde 20,6% se referem a solos agrícolas e 10,6% a pastagens (Figura 2).

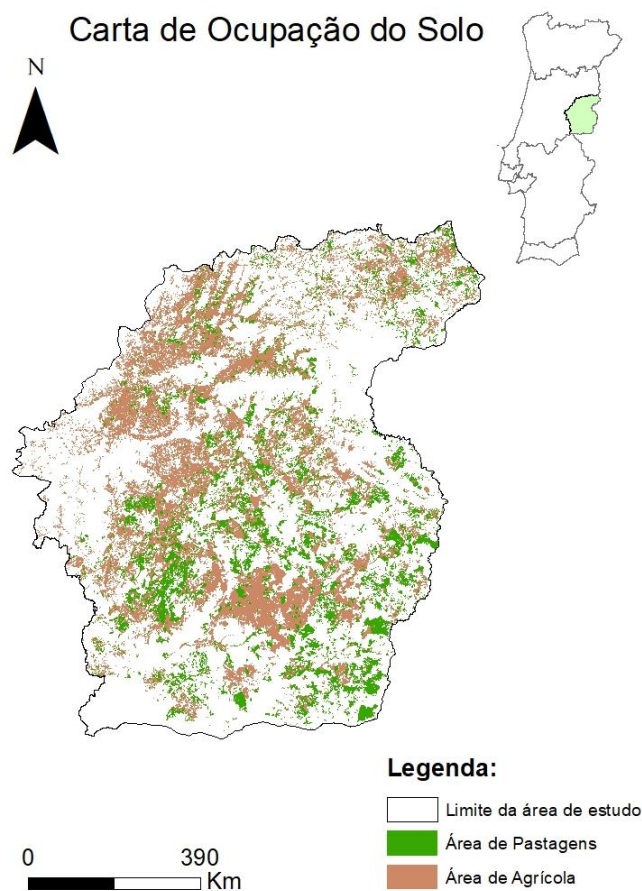


Figura 2: Carta de Ocupação dos solos de áreas de pastagens e áreas agrícolas.

*Fonte de dados: COS, 2018

Geologicamente, a área de estudo é composta por rochas de formação antiga, paleozoicas e ante-paleozoicas, que sofreram deformações ao longo dos diferentes ciclos tectónicos das orogenias hercínica e alpina, e que estão na origem das “falhas de direção NE-SW ou ENE-WSW, que balizam o grande horst da cordilheira central e que são responsáveis

pelas serras da Estrela e da Gardunha, pelo fosso da Cova da Beira e pela passagem da “superfície de Castelo Branco” para as “campinas de Idanha” (Pinheiro, 2014).

No âmbito da litologia, de um modo geral a área é constituída principalmente por rochas de natureza granitoide e por diferentes metassedimentos que integram o designado complexo xisto-grauváquico (Clamote, 2011).

Na área de estudo encontramos 3 (três) tipos de solo, nomeadamente cambissolos, litossolos e luvisolos (Figura 3), segundo a nomenclatura estabelecida na classificação universal proposta pela *Food and Agriculture Organization* (FAO, 1981).

Os solos do tipo cambissolos são os mais representativos em Portugal continental (Carvalho *et al.*, 2019; V. Pereira & FitzPatrick, 1995) e também na área de estudo (Figura 5). Estes solos são normalmente franco-arenosos (com grande quantidade de areia), apresentam baixos teores de matéria orgânica ($\leq 1\%$), baixa capacidade de retenção de água e elevada acidez. Estas características dos solos, conjugadas com o padrão climático mediterrâneo vigente, são compatíveis com a existência de sistemas de pastagens e sistemas agroflorestais, também denominados popularmente de montados (Carvalho *et al.*, 2019), e agricultura de sequeiro, como se verifica na área de estudo.

No caso dos litossolos, estes caracterizam-se por apresentarem elevada quantidade de fragmentos líticos, não apresentando horizontes pedológicos diferenciados, e normalmente com uma camada inferior a 10 cm de espessura até à rocha mãe. Caracterizam-se também por serem solos muito pobres, de baixa produtividade agrícola e baixo teor de matéria orgânica (Figueiredo, 2005; Nachtergaele, 2010) (Figura 3).

Os luvisolos são solos que por norma são usados para a agricultura, especialmente para culturas de pomares e vinhas. São solos que raramente ultrapassam 1 m de profundidade e apresentam usualmente mudança textural abrupta, sendo característicos de zonas aplanadas (Silva, 2018) (Figura 3).

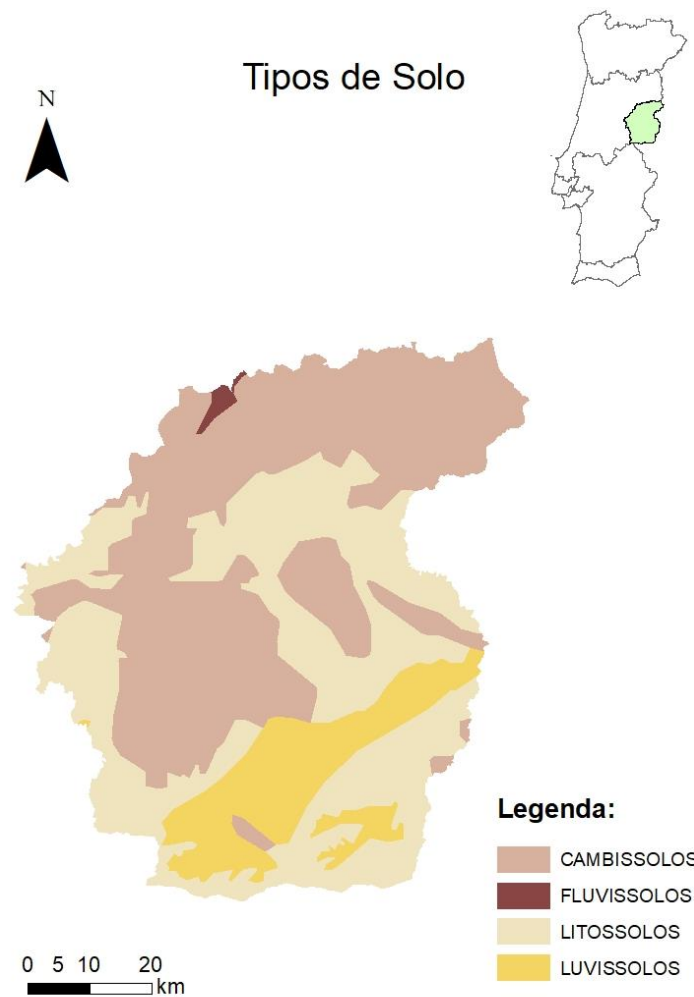


Figura 3: Tipos de solo presente na área de estudo.

A altitude da área de estudo varia entre os 100 metros (vales fluviais) e os 1227 metros acima do nível do mar (Figura 4), sendo o valor máximo de altitude correspondente a serra da Gardunha.

A área de estudo divide-se em duas grandes unidades se considerarmos a altimetria. A primeira secção é definida por valores inferiores a 500 metros de altitude localizando-se a sul da área de estudo, como ilustrado na figura 4, e está dominada pela plataforma de Castelo Branco (A) e pelas campinas da Idanha (B). A segunda secção é definida por valores superiores a 500 metros de altitude, como ilustrado na figura 4, localizam-se a norte da área de estudo. Esta última

secção apresenta os relevos mais acentuados da área de estudo, incluindo a serra da Gardunha (C), a serra da Malcata (E) e as cristas quartzíticas de Penha Garcia (D).

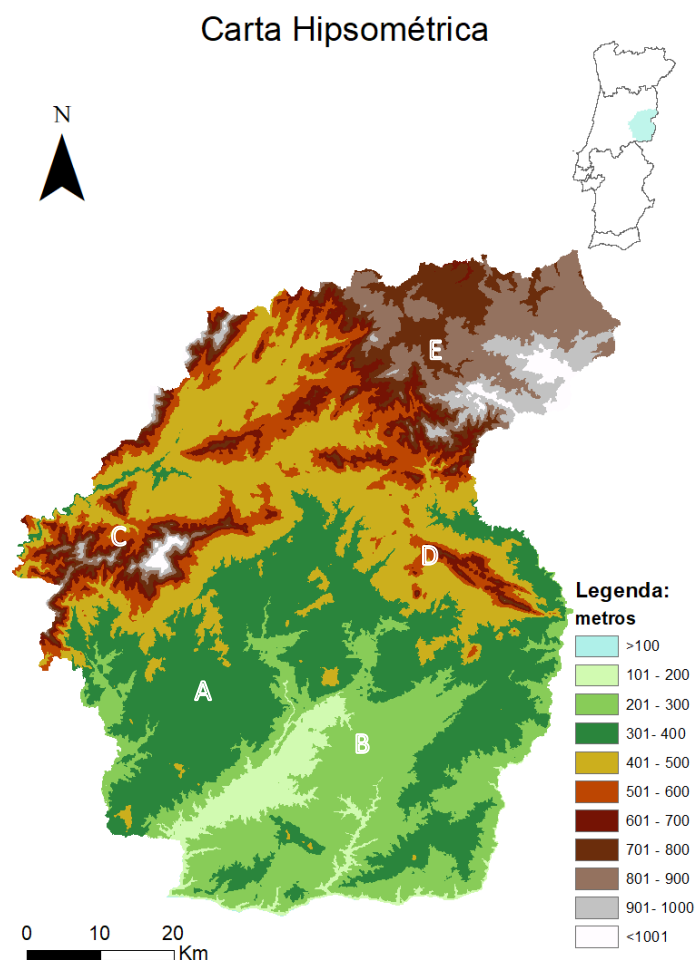


Figura 4: Carta hipsométrica da área de estudo.

Segundo os dados apresentados na figura 5, referente ao declive, observa-se quase na sua totalidade pela presença de fracos declives, o que indica de se tratar de uma área com predomínio de sectores aplanados, com exceção das áreas de serra

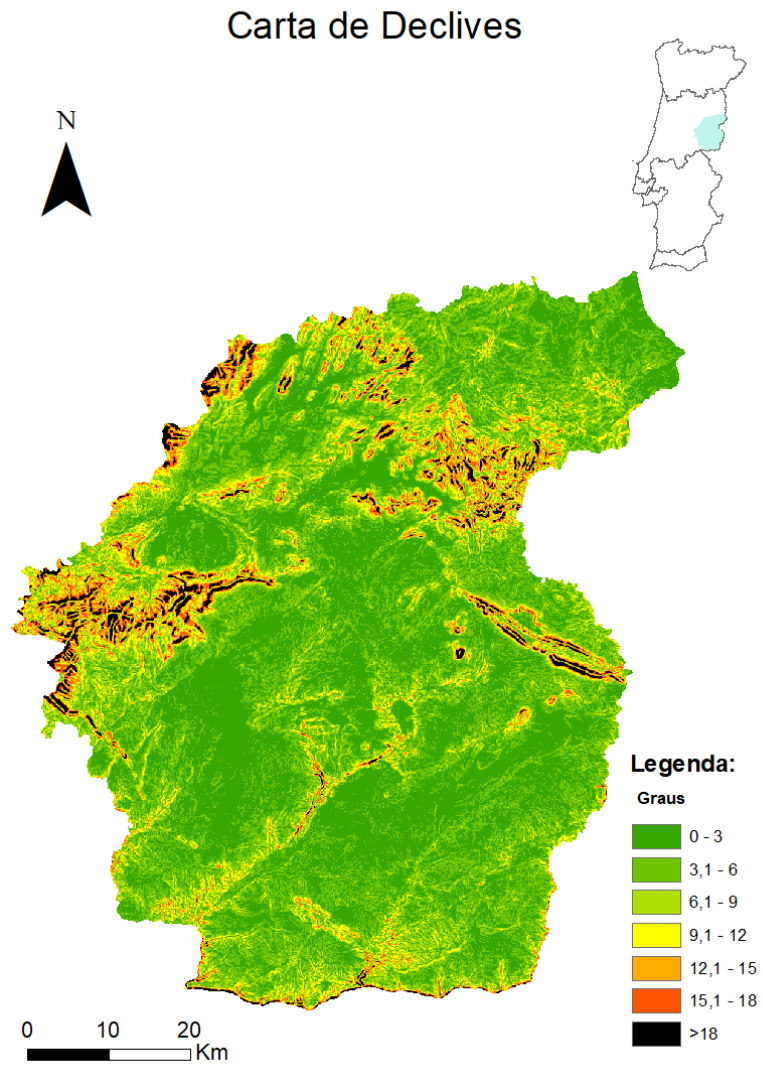


Figura 5: Carta de declives da área de estudo.

4.2 Caracterização Climática

Com base nos dados climáticos disponíveis da estação meteorológica de Castelo Branco (Gráfico 3), para o período de 1986 a 2015, verifica-se que a precipitação média anual registada foi de 735 mm, a máxima de 1142 mm em 1997, e a precipitação mínima foi de 420 mm em 1992 (Tabela 3), o que remete para uma significativa variabilidade nos totais anuais de precipitação. Na série histórica analisada destaca-se os anos de 1986, 1991, 1992 e 2015 como os mais secos, com valores de precipitação entre 420mm e 480 mm. Em oposição, os anos de 1996, 1997, 2006 e 2010 registaram os maiores valores de precipitação, superiores a 1000 mm. Como verificado nos dados da precipitação, a temperatura também regista uma variabilidade considerável onde se destaca o ano de 2000 como o mais frio (13,1°C) e o ano de 2015 como o mais quente (16,2°C) (Tabela 3). O ano de 2015 foi o ano onde se registou a média da temperatura mais elevada e os menores valores de precipitação, tanto na área de estudo como no território continental. O valor médio anual da temperatura média do ar no ano de 2015 (15.99°C) foi o 7º mais quente desde 1931 e o 2º desde 2000 (IPMA, 2016).

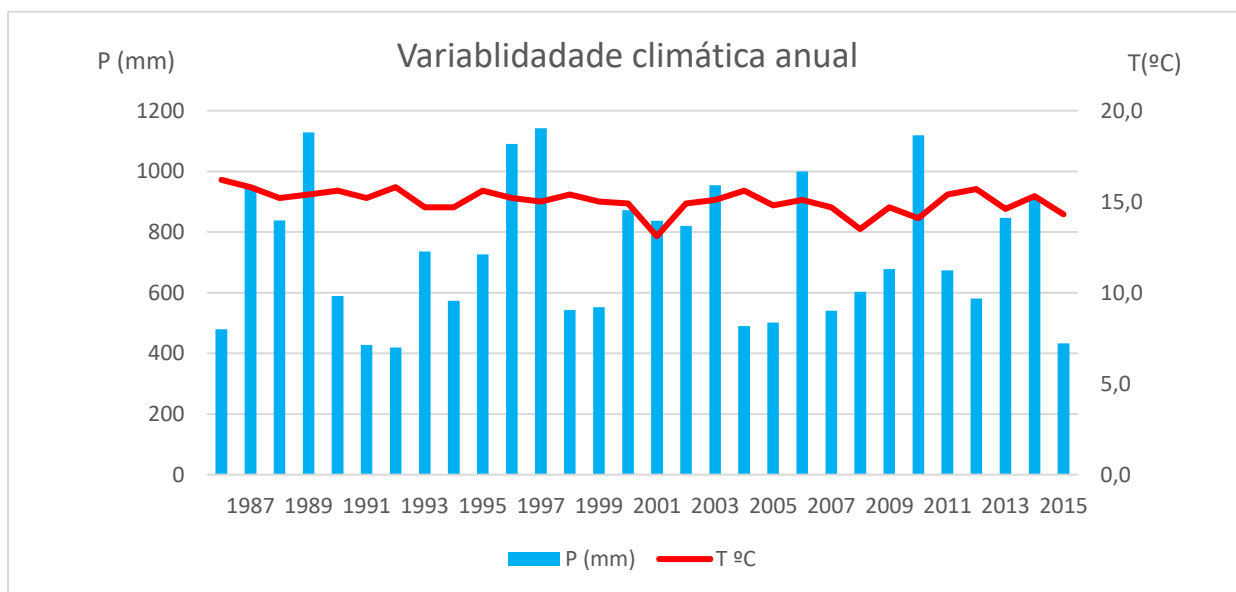


Gráfico 3: Variação da precipitação total anual e da temperatura média anual entre 1986 e 2015.

*Fonte de Dados: Estação Meteorológica de Castelo Branco – ESACB – Instituto Politécnico de Castelo Branco

Para caracterizar o contexto climatológico da área de estudo, foi utilizada a última série histórica 1981-2010, disponibilizada pelo IPMA, que apresenta a variação mensal da precipitação média e da temperatura média no período compreendido (Tabela 2).

Como é observado no Gráfico 4, verifica-se que a área de estudo apresenta verões com precipitação reduzida, (com valores inferiores a 8 mm) e temperaturas médias elevadas, sendo os meses mais quentes junho, julho, agosto e setembro, onde a média da temperatura atinge 21,7°C; 24,7°C; 24,6°C e 21,7°C, respetivamente, e o valor da temperatura média anual é de 15,0°C (Gráfico 4). Por sua vez, a estação do inverno para a área de estudo compreende os períodos do ano onde se verifica a menor temperatura (aproximadamente 8°C) e a maior quantidade de precipitação (aproximadamente 120mm). Os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro registam os valores médios de precipitação mais elevados, que superam os 100 mm (Gráfico 4).

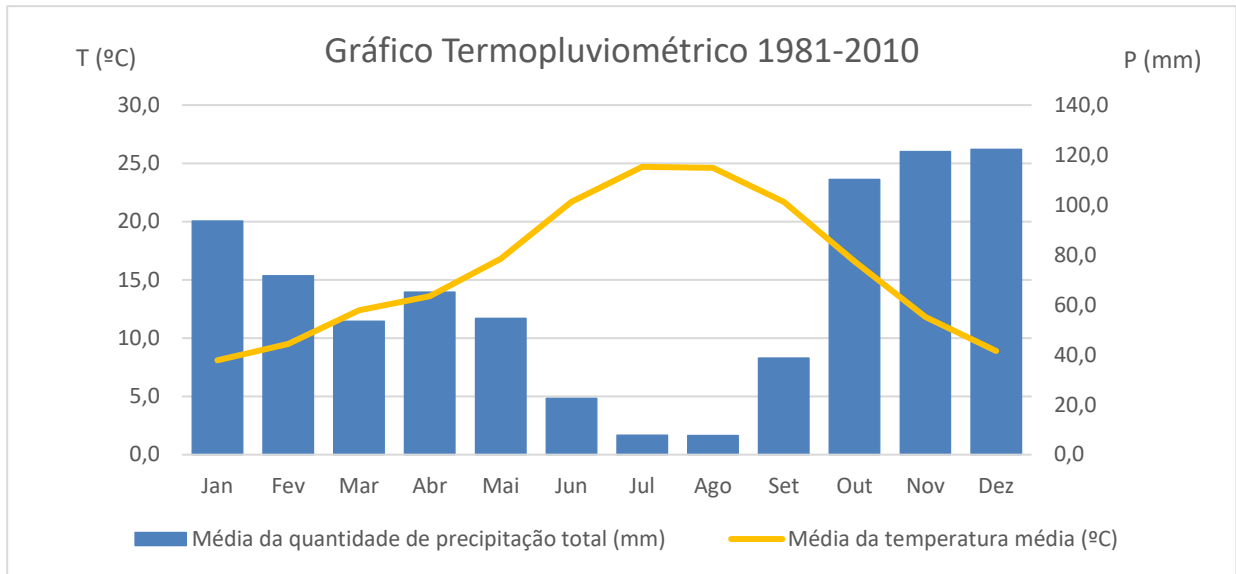
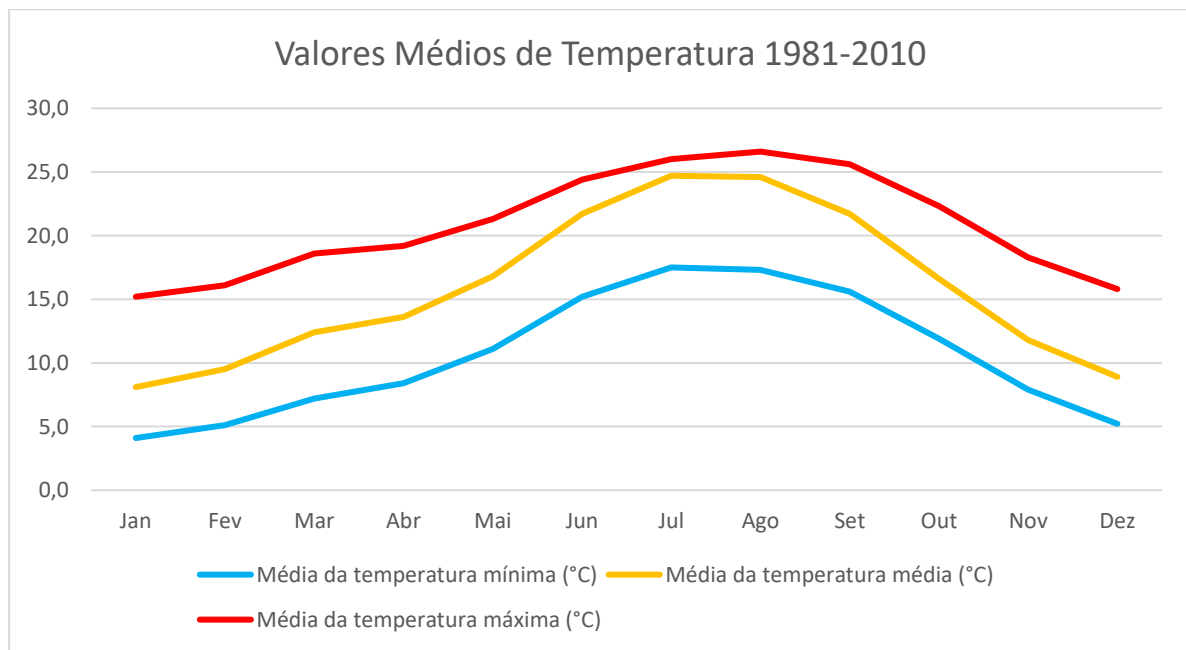


Gráfico 4: Gráfico termopluviométrico para o distrito de Castelo Branco.

* Fonte de dados IPMA



* Fonte de dados IPMA

Gráfico 5: Valores médios mensais de temperatura para o distrito de Castelo Branco. Série Climática 1981-2010

Tabela 2: Valores médios mensais de temperatura e precipitação 1981-2010.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
MTMin. (°C)	4,1	5,1	7,2	8,4	11,1	15,2	17,5	17,3	15,6	11,9	7,9	5,2
MTMed. (°C)	8,1	9,5	12,4	13,6	16,8	21,7	24,7	24,6	21,7	16,6	11,8	8,9
MTMax. (°C)	15,2	16,1	18,6	19,2	21,3	24,4	26,0	26,6	25,6	22,3	18,3	15,8
MPT (mm)	93,6	71,6	53,4	65,1	54,6	22,6	7,8	7,7	38,7	110,2	121,4	122,3

*Média da temperatura mínima (MTMin); Média da temperatura média (MTMed.); Média da temperatura máxima (MTMax.); Média da quantidade de precipitação total (MPT). Fonte de dados IPMA.

Tabela 3: Valores médios anuais de temperatura e precipitação 1986 – 2015.

	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001
T °C	16,2	15,8	15,2	15,4	15,6	15,2	15,8	14,7	14,7	15,6	15,2	15,0	15,4	15,0	14,9
P (mm)	433,1	910,2	846,6	580,9	673,6	1119,4	677,5	602,5	540,8	1000	501,1	489,7	954,6	820,5	837,6
	2000	1999	1998	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990	1989	1988	1987	1986
T °C	13,1	14,9	15,1	15,6	14,8	15,1	14,7	13,5	14,7	14,1	15,4	15,7	14,6	15,3	14,3
P (mm)	871,7	552	542,5	1142	1090,8	726,4	573,6	735,5	419,5	427,4	588,7	1128,9	837,9	953,3	479,6
	Média	Mínimo	Máximo	Média			Mínimo	Máximo							
T °C	15,0	13,1	16,2				P (mm)	735,3	419,5	1142,0					

*Temperatura (T); Precipitação (P). Fonte de Dados: Estação Meteorológica de Castelo Branco.

5. Metodologia

Na presente dissertação são considerados, sobretudo, quatro classes de uso do solo estabelecidas na Carta de Ocupação do Solo para Portugal (COS, 2018), entre elas: culturas agrícolas de sequeiro, culturas agrícolas de regadio, pomares e pastagens. É considerada agricultura extensiva ou de sequeiro aquela que é praticada sem recurso a regadio e com baixa aplicação de fertilizantes químicos, sementeira ou sistemas de rega (COS, 2018). A agricultura intensiva é aquela que é praticada para obter o máximo de rentabilidade comercial onde são frequentemente melhoradas por adubações, sementeiras e utilizam um sistema de rega, ou seja, para uma maior produtividade e maior rentabilidade do uso do solo. O uso de tecnologia é significativo, bem como a aplicação de fertilizantes químicos, herbicidas, fungicidas e pesticidas. No caso dos pomares, um dos aspetos que diferencia claramente o regime de exploração intensiva, além do recurso ao regadio, é o espaçamento entre árvores, que apresentam densidade muito mais elevada (COS. 2018).

As recolhas das amostras de solo utilizadas na elaboração da presente dissertação foram recolhidas nos concelhos de Belmonte, Castelo Branco, Covilhã, Fundão, Idanha-a-Nova e Penamacor, inseridos administrativamente no distrito de Castelo Branco.

As amostras de solo utilizadas foram retiradas em áreas com altitudes que variam entre 230 metros e 480 metros acima do nível do mar. Para avaliar os efeitos do regime de uso do solo no carbono orgânico dos solos, foram recolhidas amostras em diferentes tipos de sistemas de usos do solo, entre eles, pastagens de sequeiro (Figura 6), pastagens de regadio (Figura 7), pomares em regime de sequeiro (Figura 8) e pomares de regadio (Figura9).

Através de um método sistemático, as amostras de solo foram recolhidas longitudinalmente em perfil de solo com diferentes profundidades, nomeadamente 10cm, 20cm e 30 cm (figuras 6, 7, 8 e 9) utilizando um cincho de 15 cm de comprimento e 5,5 cm de

diâmetro. Foram seguidas as recomendações do IPCC (IPCC, 2005) na seleção das profundidades na recolha das amostras do solo, por se verificar a maior concentração de matéria orgânica.



Figura 6: Recolha de amostras de solo aos 10, 20 e 30 centímetros de profundidade em pastagens intensivas.



Figura 7: Recolha de amostras de solo aos 10, 20 e 30 centímetros de profundidade em pastagens extensivas



Figura 8: Recolha de amostras de solo aos 10, 20 e 30 centímetros de profundidade em pomares intensivos



Figura 9: Recolha de amostras de solo aos 10, 20 e 30 centímetros de profundidade em pomares extensivos

As amostras foram secas em estufa por um período de 24 horas a uma temperatura constante de 105° C (Abella & Zimmer, 2007; Jensen *et al.*, 2018; Konare *et al.*, 2010; Penman *et al.*, 2003; X. Wang *et al.*, 2012). A determinação da percentagem de matéria orgânica no solo foi estimada através do método da combustão em mufla a uma temperatura de 590°, por este ser considerado um método simples, rápido e fiável (Jensen *et al.*, 2018; Konare *et al.*, 2010; J.-P. Wang *et al.*, 2013). Foram, também, eliminados os restos vegetais (contaminações) de maior dimensão, e separados os materiais mais grosseiros utilizando um crivo de 2 mm (enquanto os agregados de solos foram destruídos por ação mecânica).

Em cada amostra foi testada a presença de carbonatos com recurso à solução de ácido Clorídrico a 10% (Abella & Zimmer, 2007; De Vos *et al.*, 2005; Konare *et al.*, 2010; X. Wang *et al.*, 2012), não se tendo observado qualquer tipo de reação relevante. Este teste torna-se necessário para verificar a existência de carbonatos nos solos que na combustão iriam ser destruídos pela alta temperatura, e assim alterar o valor da matéria orgânica destruída.

A conversão da percentagem de matéria orgânica existente em carbono orgânico seguiu a regra de conversão amplamente conhecida, através do fator de multiplicação de 0,58 (Jensen *et al.*, 2018; Périé & Ouimet, 2008; Schumacher, 2002), apesar de estudos recentes indicarem que a aplicação do fator de 0,58 para a obtenção da percentagem de carbono orgânico no solo resulta em valores sobrestimados (Jensen *et al.*, 2018). Considerando os resultados obtidos, que indicam valores muito reduzidos de matéria orgânica nos solos, a possibilidade de sobrestimação da percentagem de carbono orgânico pela aplicação do fator 0,58 torna-se bastante reduzida, além de se verificar também que a percentagem de materiais finos nas amostras é também ela bastante reduzida.

Para o cálculo de matéria orgânica e, conseqüentemente de carbono orgânico, não foram tidos conta os materiais finos (De Vos *et al.*, 2005; Jensen *et al.*, 2018; Konare *et al.*, 2010; Rumpel & Kögel-Knabner, 2011; Salehi *et al.*, 2011; X. Wang *et al.*, 2012).

Para a determinação da acidez do solo foi utilizada a norma ISO 10390:2005 que especifica o método para a determinação de pH usando um eletrodo de vidro numa suspensão 1: 5 (fração de volume) de solo em água (pH em H₂O), em solução de cloreto de potássio 1 mol / l (pH em KCl) ou em solução de cloreto de cálcio 0,01 mol / l (pH em CaCl₂).

Para a determinação do teor de fósforo no solo foi utilizado o método de Égner-Riehm através da Espectrofotometria de Absorção Atômica consiste na adição de uma solução de lactato de amônio e ácido acético tamponizada a pH 3,5 aplicada a uma porção de solo na proporção solo: solução de 1:20, durante duas horas (L. A. V. Almeida & Balbino, 1959; Egner *et al.*, 1960).

Para a determinação do teor Potássio no solo foi utilizado o método de Égner-Riehm através da Espectrofotometria de Absorção Molecular (L. A. V. Almeida & Balbino, 1959; Egner *et al.*, 1960).

A análise granulométrica foi realizada através do método da crivagem, sedimentação e pipetagem (método da pipeta de Robinson) baseado na Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSS). Deste modo partículas com diâmetros inferiores a 2 µm são consideradas argila; entre 20–2 µm silte; entre 200 e 20 µm areia fina, e entre 200 e 2000 µm estamos perante areia grossa.

Para verificar a existência de diferenças significativas ao nível de diferentes parâmetros físicos e químicos nas amostras recolhidas foi realizado o teste ANOVA utilizando o programa estatístico SPSS (IBM versão 27).

6. Apresentação e discussão dos resultados

A apresentação e discussão de resultados está dividida em duas partes: na primeira parte abordam-se as propriedades físicas do solo, nomeadamente a textura e densidade aparente, enquanto na segunda parte são tratadas as características químicas do solo, com destaque para pH, P, K, matéria orgânica e carbono orgânico. É importante salientar que foi elaborada uma adaptação nas terminologias e classes estabelecidas para os usos do solo e sistemas agrícolas abordados neste trabalho (ver descrição no item 3).

6.1 Propriedades Físicas do Solo

6.1.1 Areia Grossa

No sistema de classificação adotado por Gomes & Silva (1962), define como areia grossa todas as partículas com um diâmetro entre 200 e 2000 μm .

Na análise dos resultados de laboratório das amostras recolhidas para os usos do solo considerados (figura 11), verifica-se que as culturas de regadio (pastagens de regadio e pomares de regadio) apresentam os valores de mediana mais baixos em termos de percentagem de areia grossa nos 10 centímetros de profundidade, comparativamente às culturas de sequeiro (pomares de sequeiro e pastagens de sequeiro) (Figura 11). É nos primeiros 10 cm de profundidade que se registam os valores mais baixos de percentagem de areia grossa em todos os usos do solo, com exceção dos pomares de sequeiro, que não apresentam grande variação com a profundidade. Este facto pode estar relacionado com a possibilidade de poder haver nas parcelas com este uso o revolvimento de solo para semear cereais de inverno, o que favorece a harmonização das condições do solo no horizonte arável. Neste parâmetro, destacam-se as pastagens de sequeiro com valores de mediana mais elevados em todas as profundidades, indicando maiores percentagens de areia grossa, com valores próximos aos 50% nos 20-30

centímetros de profundidade (figura 11B e 11C) e valores inferiores nos 10 centímetros de profundidade (35%) (figura 11A).

Já aos 20-30 centímetros, os valores de mediana para a percentagem de areia grossa são obtidos nos pomares de sequeiro, comparativamente aos outros usos, ainda que sejam valores idênticos aos obtidos à superfície nas parcelas com este uso, remetendo para a homogeneidade de condições de perfil já mencionadas.

Em suma, os resultados apresentam uma elevada percentagem de areia grossa, o que pode indicar a existência de solos com baixa aptidão para atividades agrícolas, sobretudo tendo em vista que solos arenosos são pobres em teor de nutrientes, com baixa quantidade de matéria orgânica e reduzida capacidade de retenção de água. (Donagemma *et al.*, 2016). Considerando as diferenças apresentadas para os diferentes usos do solo, foi aplicado o teste estatístico ANOVA para verificar se existem diferenças estatisticamente significativas. Apesar das diferenças referidas anteriormente, os resultados da aplicação do teste não identificam diferenças significativas entre os diferentes usos nas três profundidades amostradas (sig. > 0,05) (Tabela 4).

Tabela 4: Resultados Teste Anova para diferentes usos do solo.

Dados	Sig. 10 cm	Sig. 20 cm	Sig. 30cm
Areia Grossa	0,15	0,32	0,33
Areia Fina	0,14	0,82	0,49
Limo	0,91	0,86	0,71
Argila	0,08	0,09	0,05
Densidade Aparente	0,31	0,68	0,75
Acidez do Solo	0,05	0,09	0,34
Fósforo	0,05	0,49	0,86
Potássio	0,01	0,21	0,45
Matéria Orgânica	0,51	0,72	0,29
Carbono Orgânico	0,3	0,42	0,17

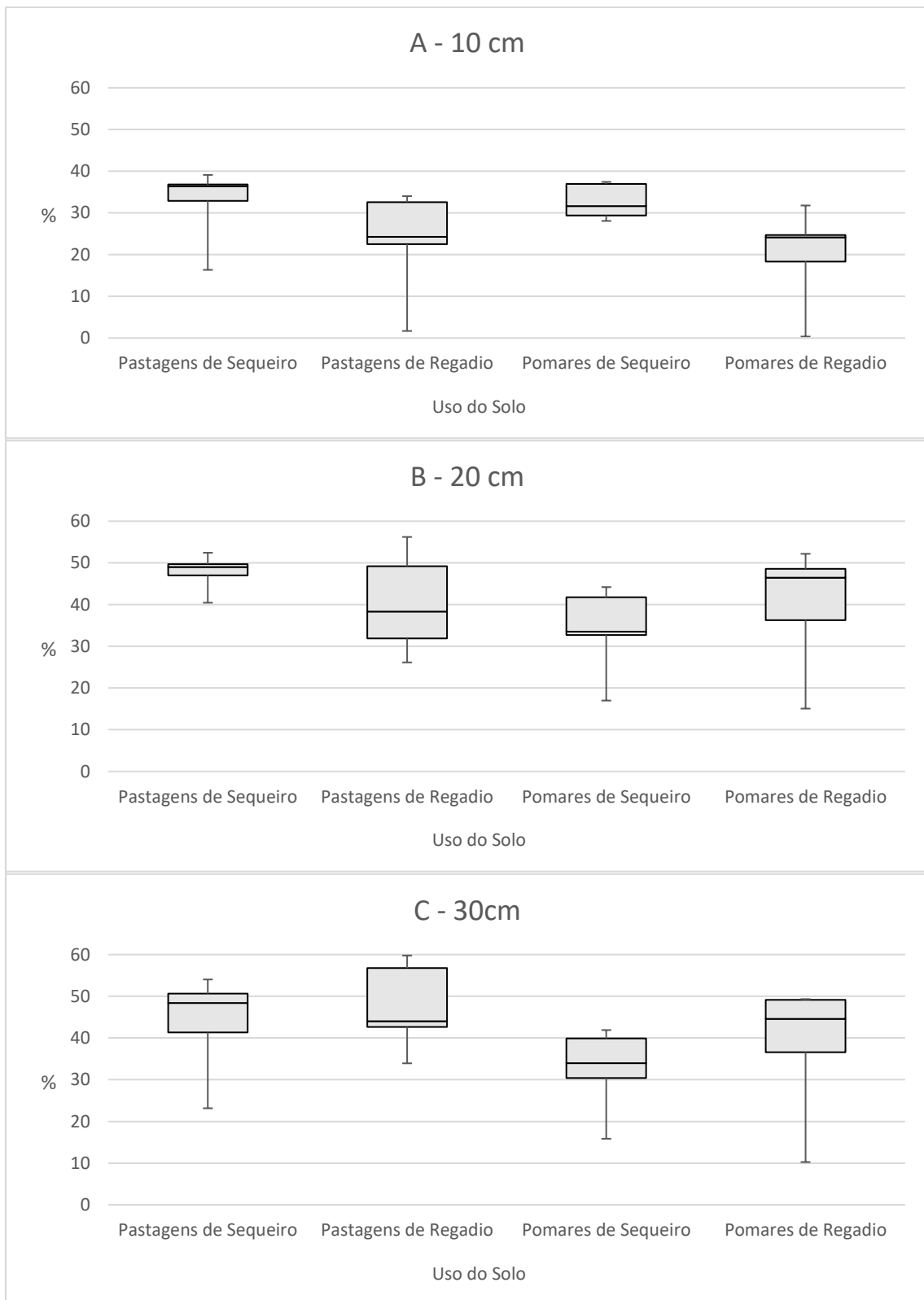


Figura 11: Percentagem de areia grossa para diferentes profundidades e usos do solo

6.1.2 Areia Fina

No sistema de classificação adotado por este trabalho Gomes e Silva, (1962), define como areia fina todas as partículas com um diâmetro entre 200 e 20 μm .

Nas amostras de uso de solo analisadas em laboratório os valores mais elevados de areia fina foram registados nos pomares de regadio nas três diferentes profundidades em análise. Verificou-se que esta fração granulométrica apresenta um total de aproximadamente 30%, à semelhança do encontrado para as diferentes profundidades (figura 12). A uniformidade aqui verificada (30%) não está baseada na tendência verificada no âmbito dos resultados obtidos para a areia grossa, na relação 'profundidade' *versus* 'percentagem de areia grossa' (Figura 11).

Analisados os teores de partículas grosseiras e a areias finas do solo, verificou-se que estes apresentam valores entre 65% a 75% do total granulométrico, corroborando com o defendido por Donagemma (2016), que afirma que estes tipos de solos apresentam em média 70% de teores de areia na sua composição, o que os tornam estes altamente permeáveis, com baixa capacidade de retenção de água, baixos teores de matéria orgânica e baixa aptidão para a prática agrícola.

Assim como na avaliação das partículas grosseiras do solo, foi realizado um teste estatístico ANOVA com as amostras de areias finas (areia fina) para verificar as diferenças e similaridades entre as amostras analisadas, tendo sido verificado uma significância estatística nula para as amostras nas profundidades analisadas (Tabela 4).

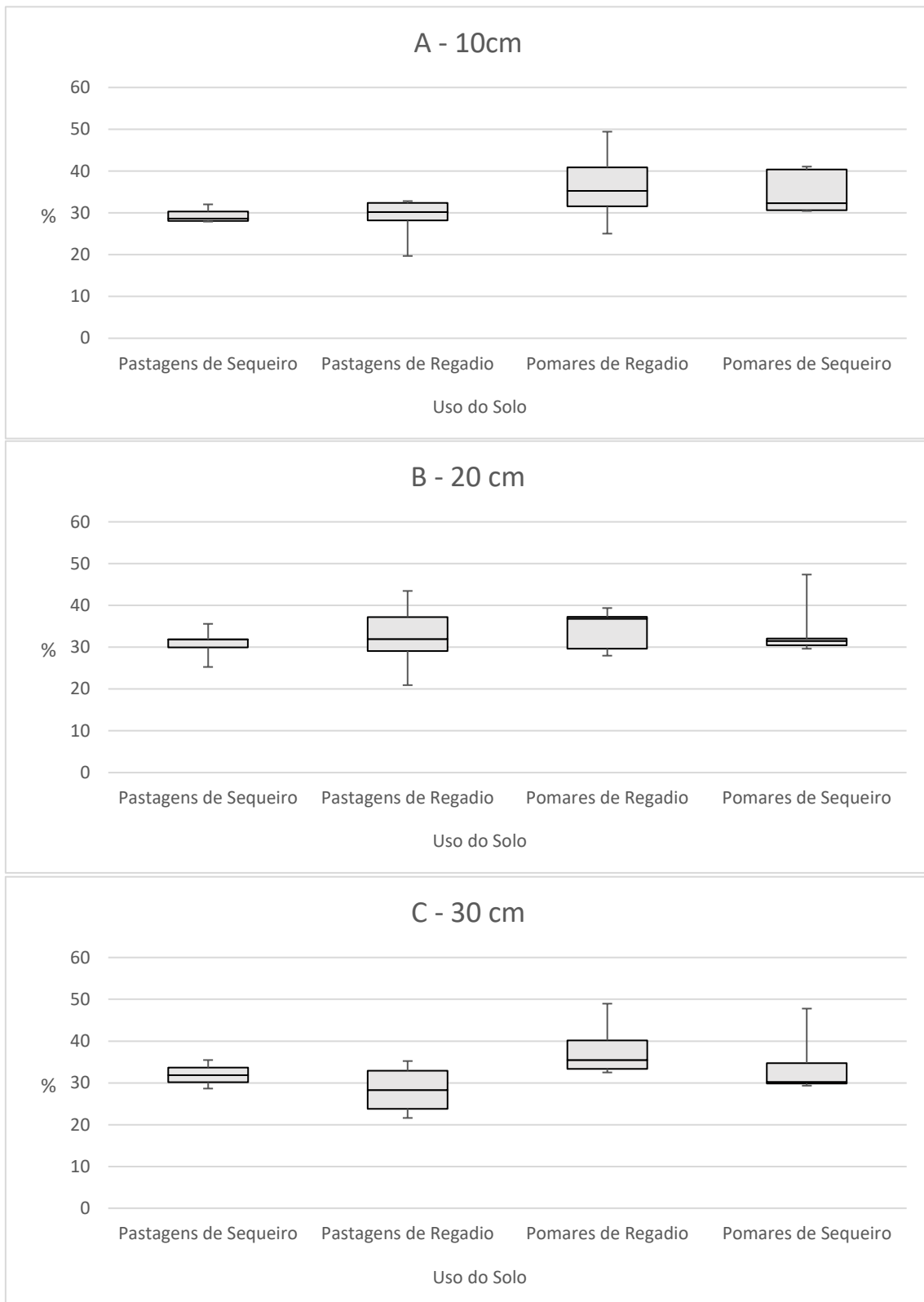


Figura 12: Percentagem de areia fina para diferentes profundidades e usos do solo.

6.1.3 Limo

No sistema de classificação adotado por este trabalho Gomes e Silva, (1962), define Limo como todas as partículas com um diâmetro entre 20–2 μm .

Considerados os resultados das amostras, o limo apresenta valores uniformes, (à semelhanças dos resultados obtidos nas partículas finas (areias finas), onde não se verificam variações significativas em função da profundidade (Figura 13).

Nas diferentes profundidades as pastagens de sequeiro apresentam valores que estão em torno dos 10%, enquanto as pastagens de regadio apresentam valores de Limo que variam entre 12% e 13%. Os pomares de regadio, por sua vez, assim como o contexto observado para os pomares de sequeiro, apresentam valores em torno dos 15% nas diferentes profundidades.

À semelhança dos resultados observados nas areias finas, o Limo apresenta um comportamento onde a relação 'profundidade' *versus* 'percentagem de Limo' não se verifica.

Assim como na avaliação das areias finas do solo, foi realizado um teste estatístico ANOVA com as amostras de Limo para verificar as diferenças e similaridades entre as amostras analisadas, tendo sido verificado uma significância estatística nula para as amostras nas profundidades analisadas (Tabela 4).

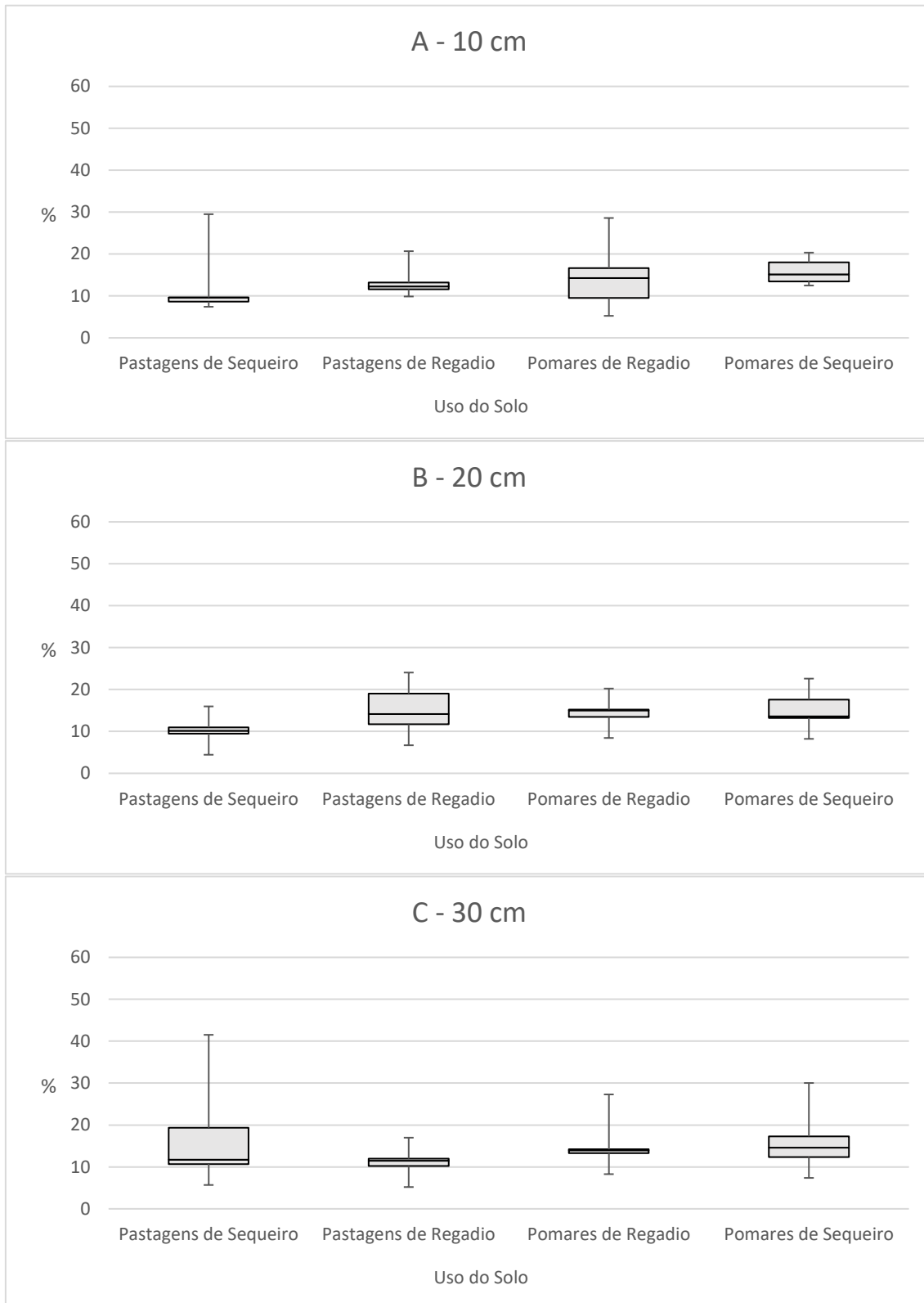


Figura 13: Percentagem de limo para diferentes profundidades e usos do solo

6.1.4 Argila

No sistema de classificação adotado por este trabalho Gomes e Silva, (1962), define argila como todas as partículas com um diâmetro inferior a 2 μm .

Nos resultados obtidos no âmbito das concentrações de argila (Figura 14) as pastagens de sequeiro apresentam os valores mais baixos (em torno de 7%) para as diferentes profundidades (10-20-30cm), enquanto nas pastagens de regadio os valores de argila no solo variam entre os 13% e os 14%.

No caso dos pomares de sequeiro, os resultados apresentaram uma variação entre 8% e 12% segundo as diferentes profundidades aqui analisadas (10-20-30cm); para o caso dos pomares de regadio, estes apresentaram percentagens de aproximadamente 16% (Figura 14).

Desse modo, os resultados apresentados demonstram uma diferença na percentagem de argila em sistemas de regadio e de sequeiro, onde os valores mais elevados são encontrados, sobretudo, nos sistemas de regadio.

Como se encontra bem descrito na literatura, os solos com maiores concentrações de argila são tendencialmente os mais produtivos, o que permitem usos mais exigentes. Os solos agrícolas nas áreas de culturas de sequeiro apresentam valores menores de argila comparativamente aos solos com as maiores concentrações desta propriedade, o que se traduz em solos menos produtivos. Solos argiloso possuem uma capacidade maior em reter mais água, são solos coesos pela reduzida quantidade de poros o que torna o solo muito pouco oxigenado e compactos (Safi & Singh, 2022).

A argila quando acrescentada nos solos agrícolas mais pobres, com menos aptidão de produção, possui o potencial para aumentar a sua produtividade, é considerada um estabilizador do solo sustentável por ser uma forma natural de melhorar a qualidade e produtividade dos solos, considerado assim uma medida verde (Latifi *et al.*, 2015; Manjaiah *et al.*, 2019).

Foi ainda realizado o teste ANOVA para a argila tendo os resultados demonstrado a existência de diferenças significativas nas três profundidades (Tabela 4).

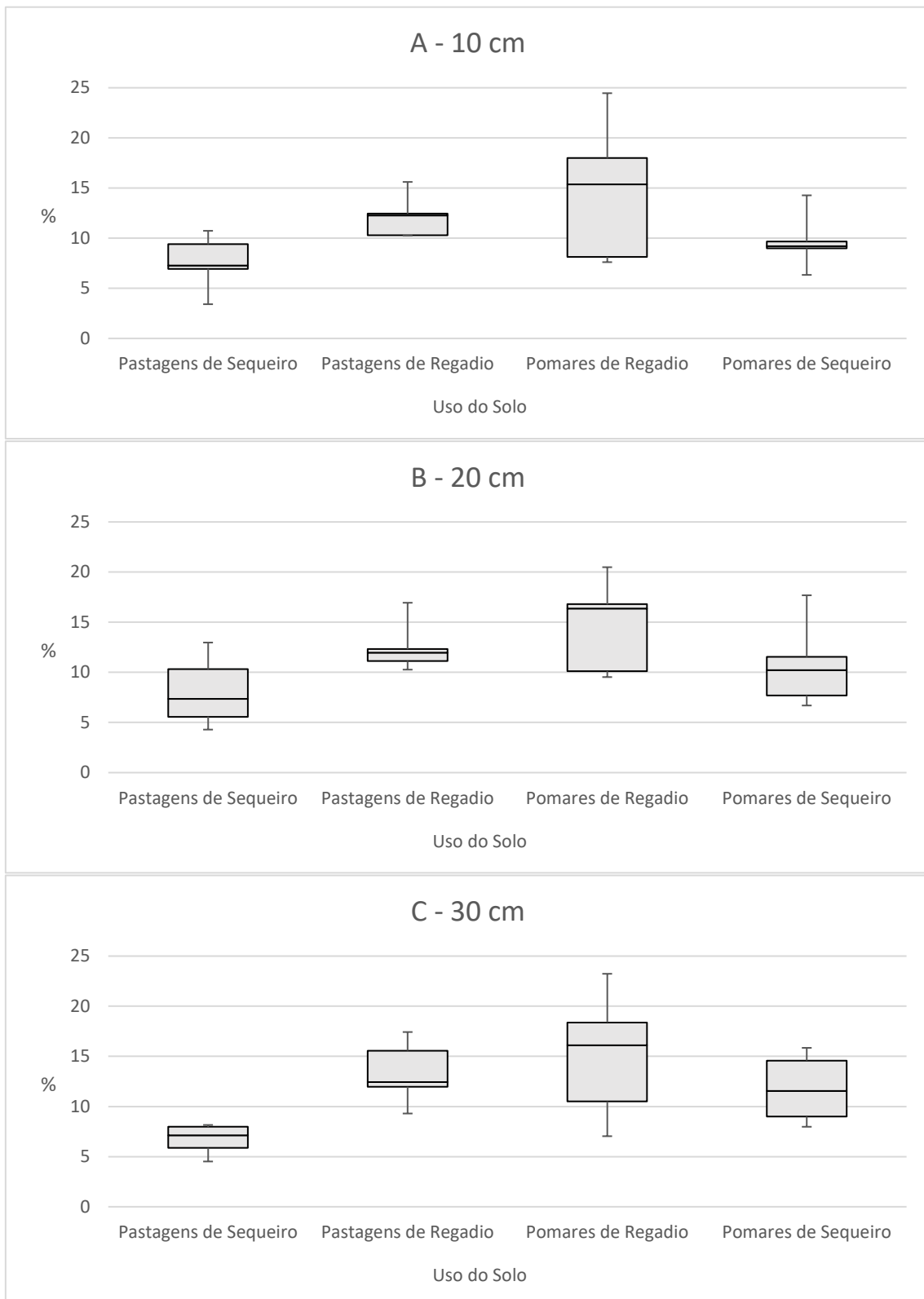


Figura 14: Percentagem de argila para diferentes profundidades e usos do solo

6.1.5 Densidade Aparente (DA)

A densidade aparente é um indicador do solo que revela o quanto um solo é compacto ou denso, característica que depende das condições do solo, mas que pode ainda estar dependente do uso a que está associado (Carneiro *et al.*, 2009).

Os resultados obtidos na área de estudo no âmbito da densidade aparente indicam que não há diferenças significativas entre os diferentes usos do solo, bem como nas diferentes profundidades (10-20-30cm), tendo-se obtido valores que variam entre 1,5g cm³ e 1,8g cm³ (Figura 15). Destacam-se as áreas de pomares de sequeiro que apresentam os valores de densidade mais baixos.

Os valores de densidade entre os diferentes usos do solo podem estar estruturalmente determinados por diferentes fatores que promovem a sua compactação, nomeadamente o pisoteio do gado no caso das pastagens, e a presença de maquinaria no caso dos pomares. Contribui também entre os fatores determinantes o facto dos solos apresentarem condições de textura muito semelhantes (Carneiro *et al.*, 2009).

Os solos com maior densidade apresentam uma reduzida porosidade e reduzida permeabilidade com baixa capacidade de infiltração de água pelos diferentes horizontes condicionando a facilidade com que os sistemas radiculares das plantas podem ganhar profundidade (B. G. d. Almeida *et al.*, 2017; Carneiro *et al.*, 2009; Freitas *et al.*, 2017).

Assim como na avaliação da Argila no solo, foi realizado um teste estatístico ANOVA com as amostras da densidade aparente para verificar as diferenças e similaridades entre as amostras analisadas, tendo sido verificado uma significância estatística nula para as amostras nas profundidades analisadas (Tabela 4).

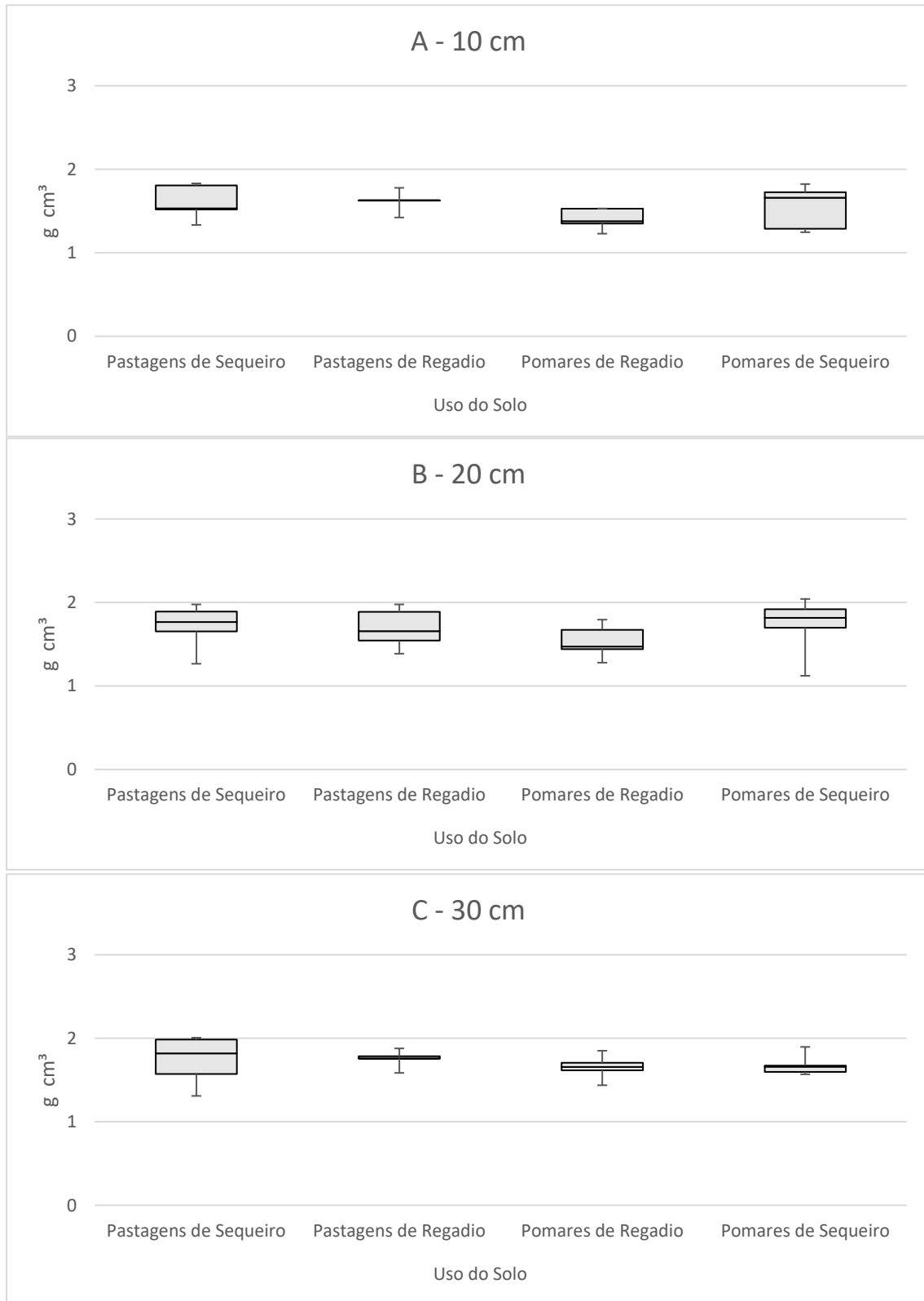


Figura 15: Densidade aparente do solo para as diferentes profundidades e usos do solo.

6.2 Propriedades Químicas do solo

6.2.1 pH do solo

O pH do solo é medido numa escala numérica e define o quanto um solo é ácido ou alcalino (Läuchli & Grattan, 2012; Oshunsanya, 2018), apresentando escalas que variam entre os valores: até 6,5 (solos ácidos), 6,6 e 7,5 (solos neutros) e valores superiores a 7,6 (alcalinos) (Tabela 8).

De uma forma genérica, Lopes, (1995) defende que a maioria dos solos apresentam um pH que variam entre os valores de 4 e 9, enquanto, Lauhli & Grattan (2012), afirma que a maioria dos solos agrícolas possuem um pH que pode variar entre os valores de 6 e 8.

O estudo do pH nos solos é importante para a agricultura, uma vez que esta propriedade regula a disponibilidade dos nutrientes para as plantas, controlando as reações químicas que ocorrem no solo e regulando a atividade de microrganismos (Läuchli & Grattan, 2012; Miller & Kissel, 2010; Oshunsanya, 2018). Esta propriedade influencia a produtividade dos solos e pode ser afetada por vários fatores, entre eles: o tipo de substrato rochoso dominante, a quantidade de precipitação, a quantidade de matéria orgânica disponível e a sua velocidade de decomposição, entre outras variáveis (Oshunsanya, 2018).

Em climas onde se verifica grandes quantidades de precipitação os solos tendem a ser mais ácidos em comparação com os solos em climas áridos, onde a precipitação é bastante reduzida. Entre os fatores determinantes, o aumento de acidez verifica-se porque a água da chuva é ligeiramente ácida (cerca de 5,7) devido a uma reação com o dióxido de carbono presente na atmosfera que forma ácido carbónico. Em sentido contrário, a alcalinidade do solo aumenta em climas mais secos/áridos onde a precipitação é moderada ou reduzida (Lopes, 1995; Oshunsanya, 2018).

Nos resultados de pH obtidos dos solos da área de estudo, os valores variam entre 5 e 6 (índice de acidez) (Figura 16), o que segundo a escala apresentada são definidos como solos ácidos (Tabela 5). As pastagens de sequeiro apresentam os valores mais baixos, verificando-se uma ligeira redução nos valores de pH em profundidade, em comparação com os valores superficiais (10 cm) ligeiramente superiores aos valores obtidos para maiores profundidades (20cm-30cm).

Os resultados apresentados nas pastagens de regadio identificam este tipo de usos do solo como os mais ácidos de toda a amostragem analisada (Figura 16). Analisando comparativamente os sistemas de regadio e de sequeiro, os sistemas de regadio apresentam solos com valores de pH menos ácidos, o que pode ser justificado pelo uso de químicos para controlar a pH do solo, e manter os níveis desejáveis para extrair o máximo rendimento das plantações.

Tabela 5: Escala de Acidez dos solos.

pH	Grau de acidez
<6,5	Ácido
6,6 - 7,5	Neutro
>7,6	Alcalino

* Norma ISO 10390:2005

Fonte: Laboratório ESAC

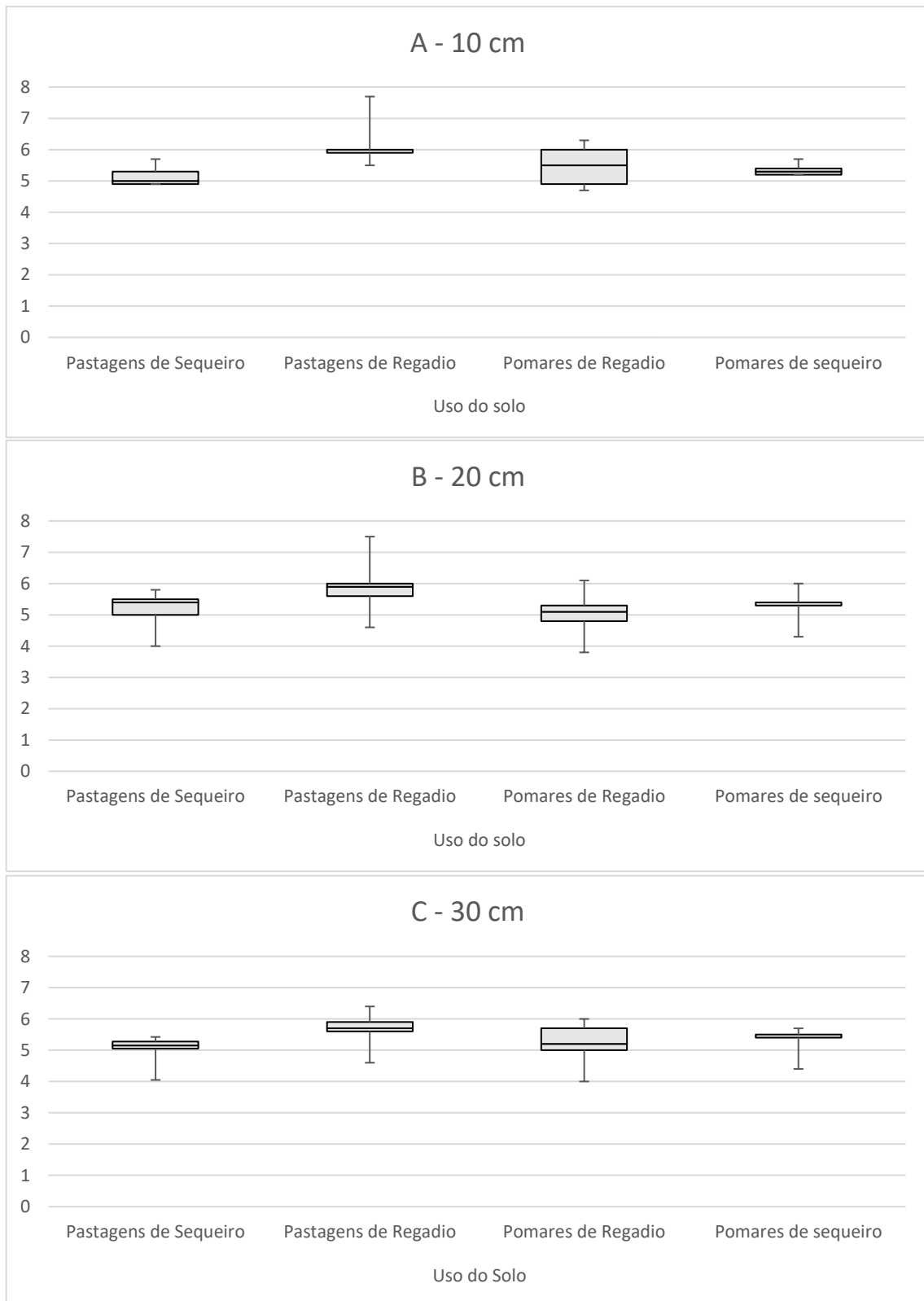


Figura 16: Variação do pH do solo para as diferentes profundidades e uso do solo.

6.2.2 Fósforo (P)

O Fósforo é um nutriente essencial para na relação solo/planta, sendo responsável por diversas funções, tais como: auxílio no sucesso da fotossíntese, no crescimento das células vegetais, na formação do sistema radicular, no aumento da qualidade dos frutos, entre outros fatores (Klein & Antonini, 2013; Lopes, 1995).

Na sua forma elementar o fósforo não é encontrado na natureza, surge através de reações químicas. A quantidade de fósforo disponível no solo pode ser acrescentada de diversas formas, nomeadamente através da aplicação de fertilizantes, ou naturalmente pelo desgaste das rochas e minerais, bem como por meio do contato com água, gases atmosféricos e organismos biológicos.

Ainda, é possível aumentar a quantidade de fósforo no solo de forma artificial através da sua extração das rochas, o que contribui para o aumento da agricultura verde e sustentável. Entretanto, este procedimento pode aumentar a dependência do fósforo não renovável, recurso este efêmero, sendo também origem de muitos problemas ambientais nas últimas décadas (Elser & Bennett, 2011; Lopes, 1995; Shen *et al.*, 2011).

O fósforo pode ser acrescentado através de formas orgânicas, por sobrantes agrícolas ou de estrume da produção animal (George *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2011). O mau uso deste micronutriente na agricultura tem impactos significativos no ambiente e na sua sustentabilidade. Esses impactos, especialmente nos ciclos hídricos, passam pela poluição dos cursos de água, especialmente as águas superficiais. O excesso de fósforo origina a eutrofização dos cursos de água através do crescimento excessivo de algas e plantas, o que provoca a perda da biodiversidade em zonas aquáticas (George *et al.*, 2016; Klein & Antonini, 2013).

Os resultados obtidos e apresentados na figura 17, indicam que nos 10 centímetros iniciais de profundidade os pomares de regadio, apresentam o valor da mediana mais elevada, superior a 200 mg/kg⁻¹, enquanto o valor mais baixo de P verifica-se nas pastagens de sequeiro

onde se regista aproximadamente 20 mg/kg^{-1} (Figura 17). As culturas de regadio apresentam valores de P superiores em todas as profundidades e são classificados como altos e muito altos, facto que pode ser justificado por um controlo artificial da agricultura na quantidade deste macronutriente no solo com o intuito de maximizar as colheitas.

As pastagens de sequeiro podem ser classificadas como solos com baixo teor de P (Tabela 6), verificando-se uma ligeira redução deste nutriente com o aumento da profundidade. Já os pomares de sequeiro podem ser classificados como solos com baixos e médios valores de P, apresentando também uma diminuição da quantidade deste nutriente com o aumento da profundidade (Tabela 6).

Os valores de P mais reduzidos no uso extensivos (sequeiro) podem ser entendidos pelo facto deste nutriente não ser adicionado de forma artificial (ou com fraca regularidade) no solo. No entanto, a adição artificial no uso extensivo pode ser utilizada para promover a conservação dos frutos (no caso deste estudo, nas áreas de pomares) e realizada esporadicamente, em quantidades menores em comparação com as culturas de regadio.

Nas amostras recolhidas e após a realização do teste ANOVA verificou-se diferenças significativas nos valores de P aos 10 centímetros de profundidade. Nas profundidades de 20-30 centímetros não se verificam diferenças significativas no teste estatístico ANOVA (tabela 7).

Tabela 6: Classes de fertilidade do Fósforo no solo.

Fósforo (mg kg⁻¹)	Classe de Fertilidade
≤ 25	Muito baixa
26-50	Baixa
51-100	Média
101-200	Alta
> 200	Muito alta

*Método de Égner-Riehm/ EAM.
Fonte: Laboratório ESAC.

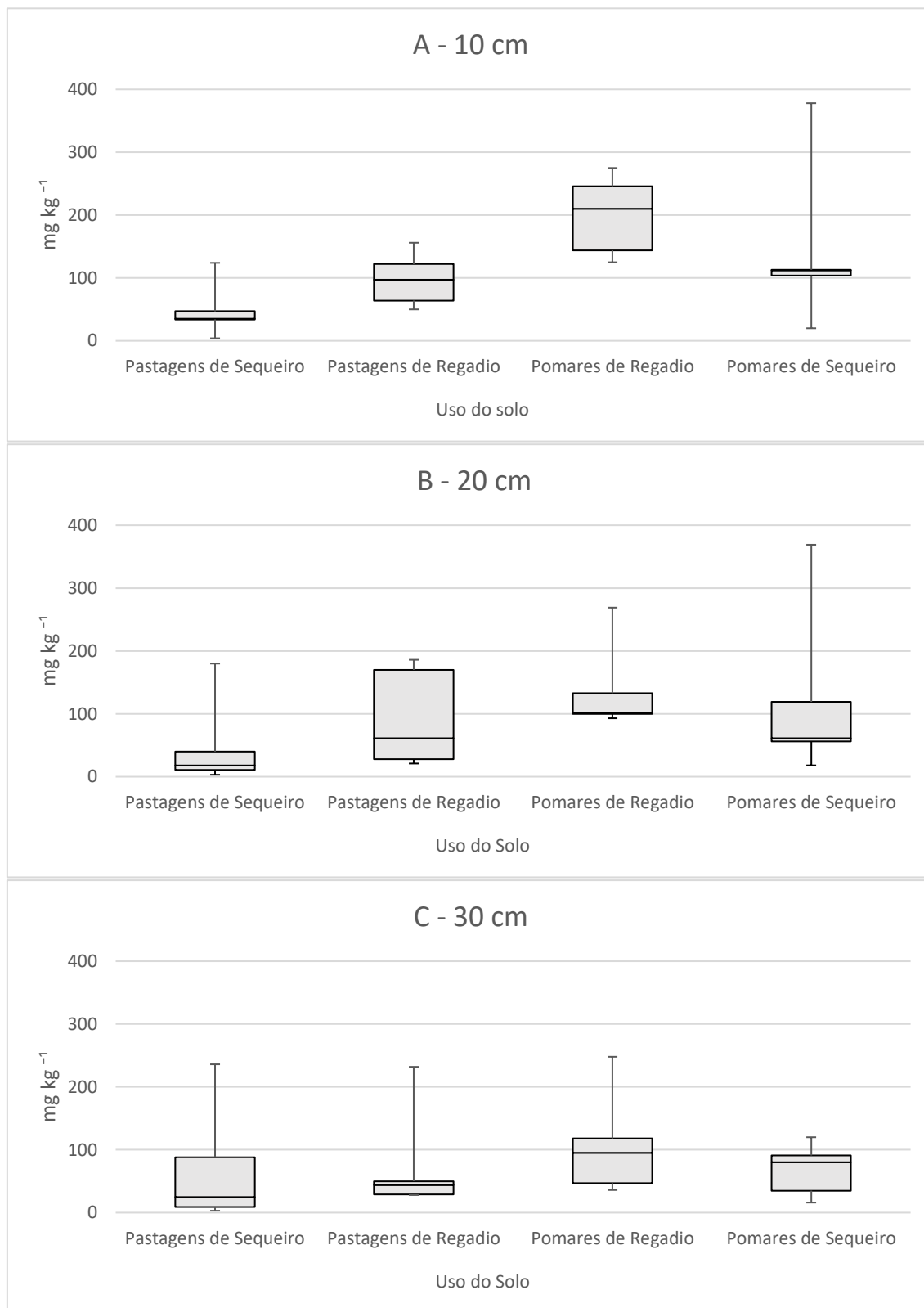


Figura 17: Variação dos valores de Fósforo extraível para diferentes profundidades e usos do solo

6.2.3 Potássio (K)

O potássio é um nutriente importante para todos os organismos vivos, sendo vital no processo de fotossíntese das plantas onde uma quantidade de potássio deficiente poderá comprometer este processo (Abreu, 2018; Lopes, 1995; Rosolem *et al.*, 2006).

Este nutriente desempenha um papel importante no aumento da qualidade e quantidade das pastagens, onde valores elevados de potássio aumentam o potencial reprodutivo, de sobrevivência e saúde das plantas, uma vez que contribuem diretamente em funções vegetais como: ativação enzimática, atividade estomática, fotossíntese, transporte de açúcares, síntese de amido, síntese de proteínas, bem como no transporte de água e de outros nutrientes. Entre os efeitos da deficiência de potássio no solo, e por consequência nas plantas, destaca-se redução de rendimento e da qualidade das pastagens agrícolas (Adhikari & Hartemink, 2016).

Nos resultados obtidos neste estudo verifica-se uma acentuada diferença na quantidade de K no uso do solo, nomeadamente entre pastagens e pomares, com valores na ordem dos 200 mg/kg⁻¹ para os pomares, enquanto as pastagens ficam em torno dos 100 mg/kg⁻¹ (Figura 24). Estes valores podem ser justificados pela fertilização antrópica dos pomares, tanto em sistemas de sequeiro como de regadio para obtenção de melhores colheitas (qualidade e quantidade) e também evitar doenças nas culturas.

Considerando os valores obtidos para este nutriente, tanto as pastagens de sequeiro, bem como as pastagens de regadio à superfície (10 cm), apresentam valores de fertilidade média. Já os pomares apresentam classes de fertilidade do solo do tipo “alto e muito alto” de K em sistemas intensivos e extensivos nas diferentes profundidades.

Tal como nos resultados obtidos para o P, a aplicação do teste estatístico ANOVA permitiu identificar diferenças significativas nos valores de K nos 10 centímetros de profundidade, situação que também não se verifica a maiores profundidades (20 e 30 cm). (tabela 4).

Tabela 7: Classes de fertilidade do Potássio no solo

Potássio (mg kg⁻¹)	Classe de Fertilidade
≤ 25	Muito baixa
26-50	Baixa
51-100	Média
101-200	Alta
> 200	Muito alta

* Método de Égner-Riehm/ EAA.
Fonte: Laboratório ESAC

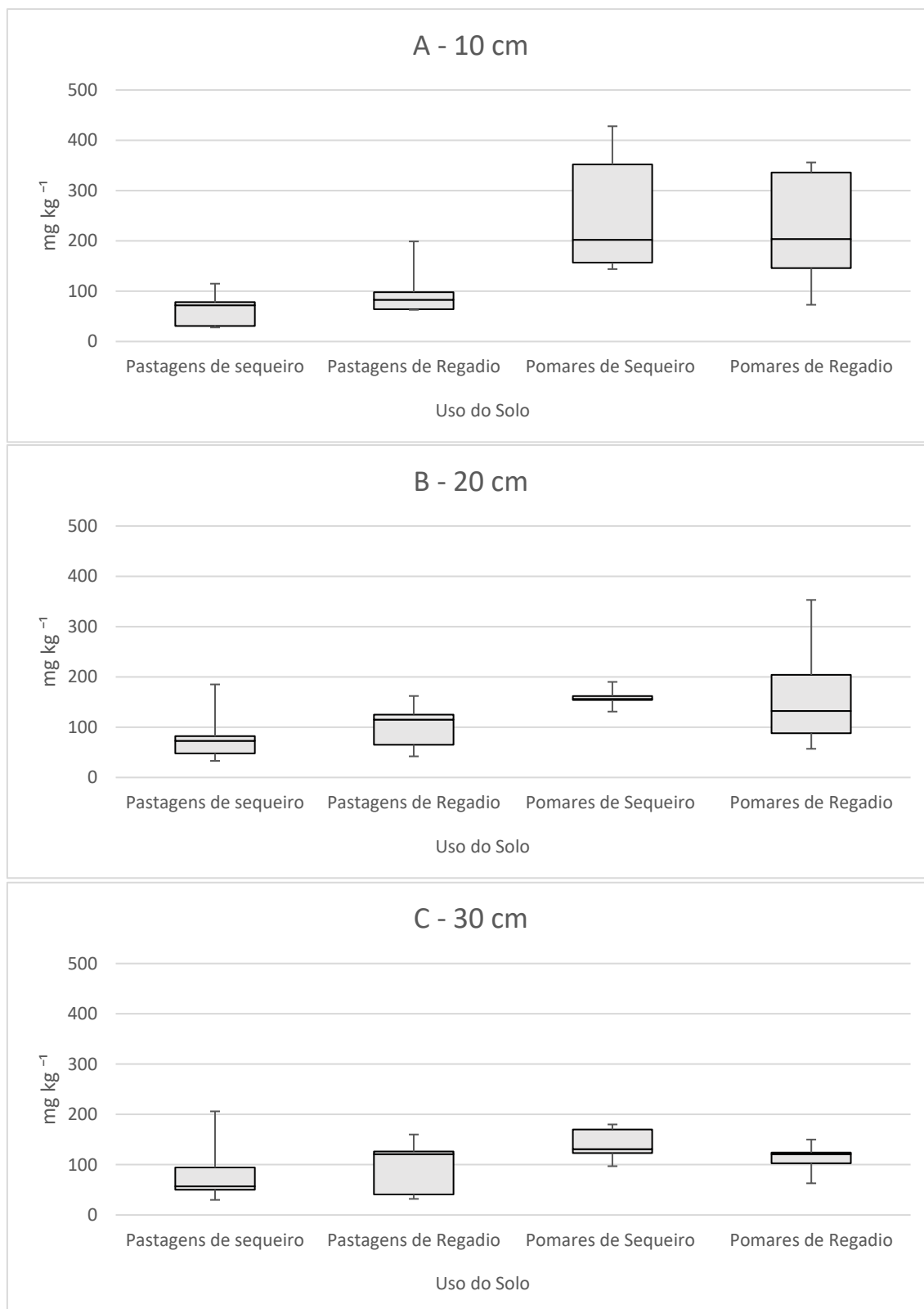


Figura 18: Variação dos valores de Potássio para diferentes profundidades e usos do solo

6.2.3 Matéria orgânica (MO)

A matéria orgânica é um composto essencial nos solos e qualquer alteração na sua disponibilidade e composição produz efeito em muitos processos dos ecossistemas (Batjes, 1996; Costa *et al.*, 2013). A matéria orgânica é considerada por Lal (2004) o principal indicador para determinar a qualidade do solo, enquanto que a perda deste nutriente (através da erosão, por exemplo) é considerado um dos principais fatores de degradação dos solos (Lal, 2004a).

As quantidades de matéria orgânica no solo são reguladas essencialmente pela produção de resíduos de plantas que caem sobre o solo e forma a manta morta, bem como as próprias raízes que são gradualmente alteradas através da fragmentação física, faunística e interações microflorais, mineralização e formação de húmus (Batjes, 1996; Costa *et al.*, 2013). No entanto, outros fatores como a textura do solo e o balanço hídrico também influenciam a quantidade de matéria orgânica presente no solo (Batjes, 1996; Costa *et al.*, 2013).

Os efeitos benéficos da matéria orgânica no solo são vários, entre eles destacam-se: aumento da quantidade de microrganismos (fungos, bactérias), aumento da capacidade de retenção de humidade no solo, aumento da quantidade de nutrientes disponíveis, melhoria das condições físicas dos ecossistemas, aumento da capacidade de infiltração de água com formação de aquíferos, diminuição da velocidade da erosão, aumento da quantidade do carbono sequestrado no solo, entre outros (Costa *et al.*, 2013; Lopes, 1995).

Em ambientes naturais, onde não existe intervenção antrópica, não se verificam grandes variações na quantidade de matéria orgânica no solo, pois há uma situação de equilíbrio. No entanto, nos sistemas agrícolas a quantidade de matéria orgânica presente nos solos é determinada pelas práticas agrícolas (Costa *et al.*, 2013; Lal, 2004a).

Nos resultados obtidos neste estudo (Figura 19), observa-se uma percentagem reduzida de matéria orgânica em todas as profundidades nos diferentes usos do solo. Estes resultados apresentam valores máximos de matéria orgânica inferiores a 2% nos 10 centímetros de

profundidade dos solos, e uma percentagem quase nula nos 30 centímetros de profundidade do solo. Ainda, verifica-se que é nos usos dos solos com maior disponibilidade hídrica as percentagens de matéria orgânica no solo são mais elevadas.

Considerando os resultados apresentados (onde foi constatada uma quantidade significativamente reduzida de matéria orgânica), onde este nutriente é um dos principais indicadores da qualidade dos solos e das pastagens, verifica-se os solos das áreas analisadas possuem baixa capacidade natural produtiva. Nos 10 centímetros superficiais, segundo a escala apresentada na tabela 8 todos os usos de solos apresentam uma baixa fertilidade. Nos 30 centímetros de profundidade a classe de fertilidade é menor considera muito Baixa.

Nas amostras recolhidas e após a realização do teste ANOVA não se verificou a existência de diferenças significativas nos valores de matéria orgânica nas diferentes profundidades (10-20-30cm) no teste estatístico ANOVA (tabela 4).

Tabela 8: Classe de fertilidade dos solos de matéria orgânica.

Classe de fertilidade	Matéria Orgânica (%)	
	Solos com textura	
	Ligeira	Média ou Pesada
Muito baixa	≤ 0,5	≤ 1,0
Baixa	0,6 – 1,5	1,1 – 2,0
Média	1,6 – 3,0	2,1 – 4,0
Alta	3,1 – 4,5	4,1 – 6,0
Muito alta	> 4,5	> 6,0

Fonte: ESAC

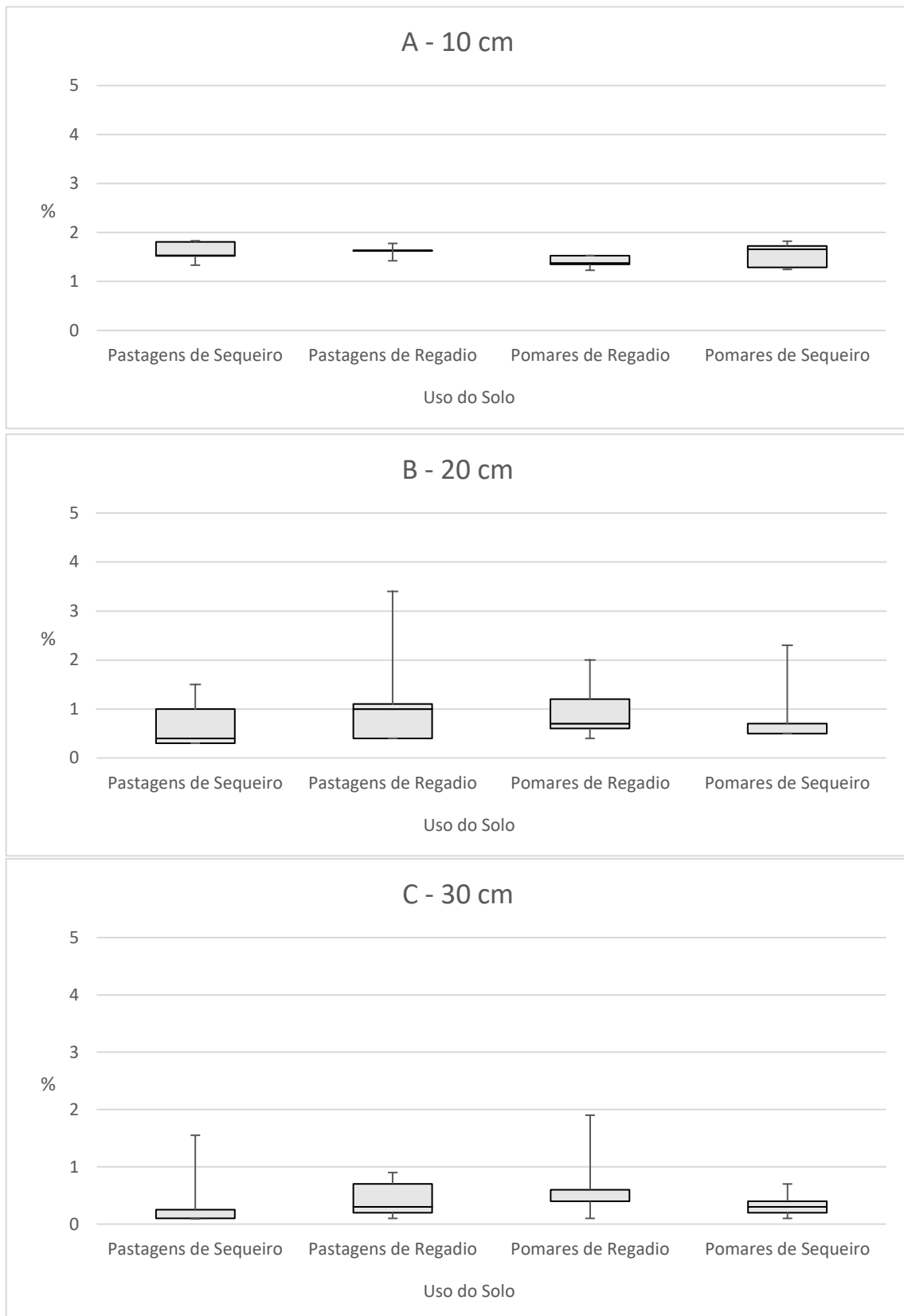


Figura 19: Percentagem de matéria orgânica para diferentes profundidades e usos do solo

6.2.4 Carbono Orgânico (CO)

O carbono orgânico dos solos apresenta-se como um dos grandes reservatórios de carbono, e está associado à matéria orgânica dos solos, resultante da decomposição de organismos nomeadamente plantas e animais (Balesdent & Arrouays, 1999; Madeira *et al.*, 2004). Nos solos subsistem uma grande variedade de formas de carbono orgânico, e variam desde folhas, troncos, restos animais e formas altamente decompostas, como húmus. Além das fontes naturais de carbono orgânico, nos solos agrícolas é realizada a adição suplementar de matéria orgânica, sobretudo fertilizantes naturais, como forma de aumentar a produtividade dos solos (Schumacher, 2002).

A percentagem de carbono orgânico no solo possui uma relação direta com a quantidade de matéria orgânica. O carbono orgânico representa cerca de 58% de total de matéria orgânica presente no solo, pelo que, quanto menor for a quantidade de matéria orgânica no solo, menor é a quantidade de carbono orgânico. A percentagem de carbono orgânico no solo possui uma relação direta com a sua profundidade, ou seja, há uma diminuição com o aumento da profundidade.

No caso da área em estudo, os resultados obtidos indicam que os solos analisados são pobres em termos de teor de carbono orgânico, na medida em que a mediana para todos os usos do solo e profundidades encontra-se abaixo de 1%. Valores claramente determinados pela reduzida quantidade de matéria orgânica dos solos.

Nos valores apresentados de carbono orgânico nos 10 centímetros de profundidade são superiores em relação às restantes (20-30 centímetros de profundidade) (Figura 20).

As culturas de regadio apresentam valores ligeiramente superiores de carbono orgânico a todas as profundidades, com a exceção dos pomares aos 10 centímetros.

Os resultados da aplicação do teste ANOVA não identificam diferenças significativas nos valores de carbono orgânico nas diferentes profundidades (10-20-30cm) e para os diferentes usos do solo (tabela 4).

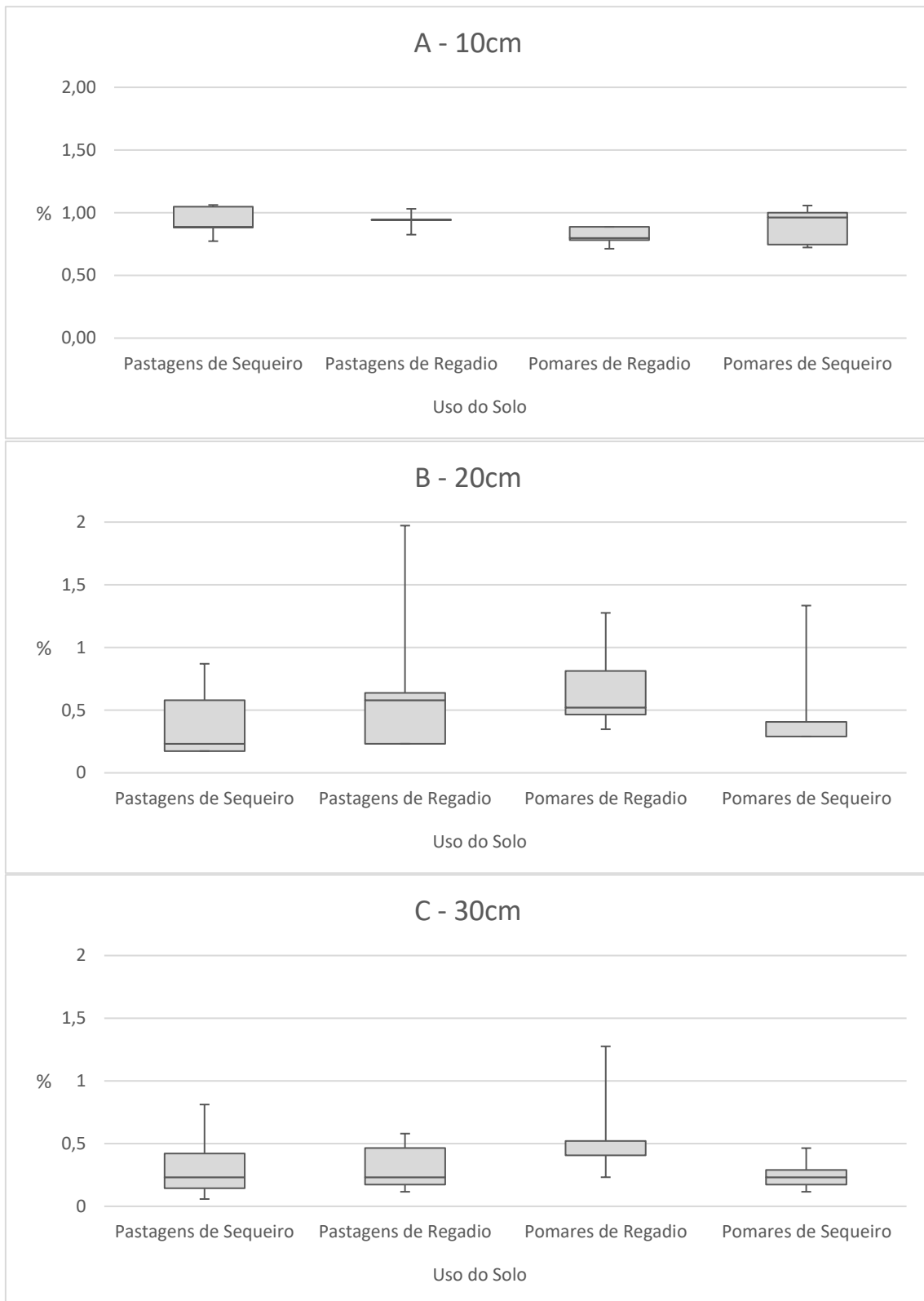


Figura 20: Percentagem de carbono orgânico para diferentes profundidades e usos do solo

7. Conclusão

A mitigação das alterações climáticas tem sido referida como um objetivo à escala planetária, que pode ser implementado também à escala local. A atividade agrícola, considerada uma das principais atividades responsáveis pela libertação de dióxido de carbono, com uma gestão e adaptação sustentável, é possível aumentar a retenção de carbono neste tipo de uso do solo, uma medida que beneficia a própria atividade. Com imenso potencial, o aumento de carbono orgânico no solo é uma medida natural, que favorece o aumento da produtividade, ao mesmo tempo que se apresenta como um mecanismo de mitigação das alterações climáticas.

Neste contexto, este trabalho pretende avaliar existência de diferenças significativas na capacidade de sequestro de carbono orgânico em solos associados a diferentes sistemas agropastoris, nomeadamente em usos mais intensivos, associados a regadio, e usos mais extensivos associados a culturas de sequeiro. Os resultados indicam claramente que as condições associadas ao tipo de solos são determinantes para a quantidade de carbono orgânico do solo, ainda que o uso possa ter influência. Os solos presentes na área de estudo, de textura franco-arenosa, que se caracterizam por serem solos muito pobres em matéria orgânica, evidenciando baixa aptidão agrícola.

No que diz respeito aos resultados obtidos nos valores de carbono orgânico, foi aplicado o fator 0,58 (valor padrão) e a possibilidade de sobrestimação da percentagem deste nutriente é muito reduzida de se verificar por efeito dos valores de matéria orgânica serem também eles muito reduzidos em todas as amostras (valores inferiores a 2%).

As concentrações dos nutrientes no solo são essenciais nos sistemas agrícolas, que em solos com pouca aptidão agrícola são escassos, que são corrigidos através de acréscimo dos nutrientes em falta para tornar os solos mais aptos para as práticas agrícolas.

Na área de estudo da presente dissertação os fertilizantes químicos que substituem os nutrientes como P e K são adicionados antropicamente aos solos agrícolas, pelo que apresentam nos resultados os valores mais elevados, a fim de uma maior produtividade (sistemas intensivos).

Os resultados apresentados e analisados, não nos permitem afirmar com um elevado grau de certeza que tipo de sistema (de sequeiro ou de regadio) que se torna mais benéfico no sequestro de carbono orgânico nos solos, não se não se observando nos resultados obtidos diferenças significativas.

A disponibilidade hídrica apesar de ser um facto relevante na definição da quantidade de carbono orgânico no solo, não se verificaram diferenças significativas entre os dois sistemas de uso do solo (intensivo e extensivo). A recuperação e o melhoramento destes tipos de solos é possível e viável no âmbito agrícola desde que aplicadas técnicas agrícolas modernas, técnicas melhoradas com o atenção para o sequestro do carbono orgânico no solo, por este nutriente melhora a produtividade, aumenta a fertilidade, diminui a suscetibilidade à erosão, e contribui para a mitigação das alterações climáticas.

Os resultados obtidos de carbono orgânico no solo (Figura 20) são indicadores de solos muito pobres, possuindo reduzidas quantidades de matéria orgânica no solo o que torna estes solos com baixa produtividade, existindo uma grande margem para tornar estes solos mais produtivos aumentando a quantidade de matéria orgânica. A quantidade de matéria orgânica e de carbono orgânico fazem parte do processo na melhoria de qualidade dos solos.

As florestas apresentam-se como uma ferramenta natural de sequestro de carbono no solo e de aumento da quantidade de matéria orgânica que consequentemente aumenta a qualidade e produtividade do solo e reduzindo ainda o solo da exposição à erosão. Este florestal é caracterizado pelas diversas sinergias entre o solo, a mitigação das alterações climáticas e a diversidade dos ecossistemas.

8. Bibliografia

- Abella, S. R., & Zimmer, B. W. (2007). Estimating Organic Carbon from Loss-on-Ignition in Northern Arizona Forest Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 545-550. doi:<https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0136>
- Abreu, M. M. (2018). Fixação Do Potássio Nos Solos Portugueses. *Revista de Ciências Agrárias*, 41.
- Adams, E. E., & Caldeira, K. (2008). Ocean Storage of Co2. *Elements*, 4(5), 319-324. doi:10.2113/gselements.4.5.319 %J Elements
- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking Soils to Ecosystem Services — a Global Review. *Geoderma*, 262, 101-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Adiaha, M. S., Buba, A. H., Tangban, E. E., Nkweamaowo, A., & Okpoho. (2019). Mitigating Global Greenhouse Gas Emission: The Role of Trees as a Clean Mechanism for Co2 Sequestration. *The Journal of Agricultural Sciences - Sri Lanka*, Vol. 15, No. 1, 101-115. doi:<http://doi.org/10.4038/jas.v15i1.8675>
- Ahirwal, J., Kumari, S., Singh, A. K., Kumar, A., & Maiti, S. K. (2021). Changes in Soil Properties and Carbon Fluxes Following Afforestation and Agriculture in Tropical Forest. *Ecological Indicators*, 123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107354>
- Almeida, B. G. d., Viana, J. H. M., Teixeira, W. G., & Donagemma, G. K. (2017). Densidade Do Solo. In Embrapa (Ed.), *Manual De Métodos De Análise De Solo*.
- Almeida, L. A. V., & Balbino, L. R. (1959). Determinação Do Fósforo E Do Potássio Assimiláveis Em Alguns Solos Do País. *ANAI DO INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA*.
- Araújo, E. A. d., Ker, J. C., Neves, J. C. L., & Lani, J. L. (2012). Qualidade Do Solo: Conceitos, Indicadores E Avaliação. 2012, 5(1), 20. doi:10.5777/paet.v5i1.1658
- Aryal, D. R., Morales Ruiz, D. E., Tondopó Marroquín, C. N., Pinto Ruiz, R., Guevara Hernández, F., Venegas Venegas, J. A., . . . Euán Chi, I. (2018). Soil Organic Carbon Depletion from Forests to Grasslands Conversion in Mexico: A Review. *Agriculture*, 8(11). doi:10.3390/agriculture8110181
- Baer, S. G., & Birgé, H. E. (2018). Soil Ecosystem Services: An Overview. In S. S. E. a. U. o. M. Dr Don Reicosky, USA (Ed.), *Managing Soil Health for Sustainable Agriculture* (Vol. Volume 1: Fundamentals): Burleigh Dodds Science Publishing.
- Balesdent, J., & Arrouays, D. (1999). An Estimate of the Net Annual Carbon Storage in French Soils Induced by Land Use Change from 1900-1999. *Comptes Rendus L'Academie D'Agriculture*, 85, 265-277.
- Barbosa, R. R. d. N., Silva, A. d. A., Neves, M. G., Galvão, A. R. d. A., & Neto, C. F. d. O. (2013). Produção E Sequestro De Carbono Na Atmosfera. *Enciclopédia biosfera*, 9.
- Batjes, N. H. (1996). Total Carbon and Nitrogen in the Soils of the World. *European Journal of Soil Science*, 47(2), 151-163. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Beerling, D. J., & Royer, D. L. (2002). Reading a Co2 Signal from Fossil Stomata. *New Phytologist*, 153(3), 387-397.
- Bell, S. M., Barriocanal, C., Terrer, C., & Rosell-Melé, A. (2020). Management Opportunities for Soil Carbon Sequestration Following Agricultural Land Abandonment. *Environmental Science & Policy*, 108, 104-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.03.018>
- Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K. L., . . . Zhou, G. (2019). Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems. In I. P. o. C. Change (Ed.), *Global Warming of 1.5°C*.

- Campos, R., Pires, G. F., & Costa, M. H. (2020). Soil Carbon Sequestration in Rainfed and Irrigated Production Systems in a New Brazilian Agricultural Frontier. *Agriculture*, 10(5), 156.
- Carneiro, M. A. C., Souza, E. D. d., Reis, E. F. d., Pereira, H. S., & Azevedo, W. R. d. (2009). Atributos Físicos, Químicos E Biológicos De Solo De Cerrado Sob Diferentes Sistemas De Uso E Manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100016>
- Carvalho, M., Goss, M. J., & Teixeira, D. (2019). Manganese Toxicity in Portuguese Cambisols Derived from Granitic Rocks: Causes, Limitations of Soil Analyses and Possible Solutions. *Revista de Ciências Agrárias*, 38. doi:<https://doi.org/10.19084/RCA15137>
- Clamote, V. (2011). *O Desnívelamento Entre a Superfície Da Meseta E as Superfícies Abatidas Da Beira Baixa. Compreensão Geomorfológica Da Sua Evolução*. (Master Degree), Universidade de Coimbra,
- Coelho, M. R., Cristina, E., Fidalgo, Santos, H. G. d., Brefin, M. d. L. M. S., & Pérez, D. V. (2013). Solos: Tipos, Suas Funções No Ambiente, Como Se Formam E Sua Relação Com O Crescimento Das Plantas In F. M. S. Moreira, J. E. Cares, R. Zanetti, & S. L. Stürmer (Eds.), *O Ecossistema Solo. Componentes, Relações Ecológicas E Efeitos Na Produção Vegetal* (pp. 352).
- Comissão Europeia, D.-G. d. R. d. C., Conteúdos e Tecnologias. (2020). *Comunicação Da Comissão Ao Parlamento Europeu, Ao Conselho, Ao Comité Económico E Social Europeu E Ao Comité Das Regiões*.
- Uma Estratégia Europeia Para Os Dados*. Retrieved from
- Costa, E. M. d., Silva, H. F., & Ribeiro, P. R. d. A. (2013). Matéria Orgânica Do Solo E O Seu Papel Na Manutenção E Produtividade Dos Sistemas Agrícolas. *Enciclopédia biosfera*, 9(17).
- De Vos, B., Vandecasteele, B., Deckers, J., & Muys, B. (2005). Capability of Loss-on-Ignition as a Predictor of Total Organic Carbon in Non-Calcareous Forest Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(19-20), 2899-2921. doi:10.1080/00103620500306080
- Dentener, F., Derwent, R., Dlugokencky, E., Holland, E., Isaksen, I., Katima, J., . . . Wang, M. (2001). Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis*: PUBLISHED BY THE PRESS SYNDICATE OF THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE.
- Dick, R. P. (1994). Soil Enzyme Activities as Indicators of Soil Quality. In *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*.
- Dominati, E. (2013). Natural Capital and Ecosystem Services of Soils In J. R. Dymond (Ed.), *Ecosystem Services in New Zealand : Conditions and Trend*. Landcare Research New Zealand Ltd.
- Donagemma, G. K., Freitas, P. L. d., Balieiro, F. d. C., Spera, A. F. T., Lumbreras, J. F., Viana, J. H. M., . . . Bortolon, L. (2016). Characterization, Agricultural Potential, and Perspectives for the Management of Light Soils in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51. doi:<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001>
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., & Grêt-Regamey, A. (2018). Soil Quality Indicators – from Soil Functions to Ecosystem Services. *Ecological Indicators*, 94, 151-169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>
- Dunn, R. J. H., Stanitski, D. M., Gobron, N., Willett, K. M., Ades, M., Adler, R., . . . Ziese, M. (2020). State of the Climate in 2019

Global Climate

- In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 101, pp. S9-S128). American Meteorological Society.
- Egner, H., Riehm, H., & Domingo, W. R. (1960). Investigations on the Chemical Soil Analysis as a Basis for Assessing the Soil Nutrient Status II: Chemical Extraction Methods for Phosphorus and Potassium Determination. *Kunliga Lantbrukshögskolans Annaler*, 26, 199–215.
- Elser, J., & Bennett, E. (2011). A Broken Biogeochemical Cycle. *Nature*, 478(7367), 29-31. doi:10.1038/478029a
- Emde, D., Hannam, K. D., Most, I., Nelson, L. M., & Jones, M. D. (2021). Soil Organic Carbon in Irrigated Agricultural Systems: A Meta-Analysis. *Global Change Biology*, 27(16), 3898-3910. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.15680>
- Evrendilek, F., Celik, I., & Kilic, S. (2004). Changes in Soil Organic Carbon and Other Physical Soil Properties Along Adjacent Mediterranean Forest, Grassland, and Cropland Ecosystems in Turkey. *Journal of Arid Environments*, 59(4), 743-752. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.03.002>
- FAO, F. a. a. o. o. t. u. n. (1981). *Fao -Unesco Soil Map of the World* (Vol. V - Europe): Unesco.
- Farquhar, G. D., Fasham, M. J. R., Goulden, M. L., Heimann, M., Jaramillo, V. J., Kheshgi, H. S., . . . Wallace, D. W. R. (2001). The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis*.
- Figueiredo, T. d. A. F. R. d. (2005). *Pedregosidade Dos Solos Em Três-Os-Montes: Importância Relativa E Distribuição Espacial* (I. P. d. Bragança Ed.).
- Franks, J. R., & Hadingham, B. (2012). Reducing Greenhouse Gas Emissions from Agriculture: Avoiding Trivial Solutions to a Global Problem. *Land Use Policy*, 29(4), 727-736. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.11.009>
- Freitas, L. d., Oliveira, I. A. d., Silva, L. S., Frare, J. C. V., Filla, V. A., & Gomes, R. P. (2017). Indicadores Da Qualidade Química E Física Do Solo Sob Diferentes Sistemas De Manejo. *Revista Unimar Ciências*, 26.
- George, T. S., Hinsinger, P., & Turner, B. L. (2016). Phosphorus in Soils and Plants – Facing Phosphorus Scarcity. *Plant and Soil*, 401(1), 1-6. doi:10.1007/s11104-016-2846-9
- Giubergia, J. P., Martellotto, E., & Lavado, R. S. (2013). Complementary Irrigation and Direct Drilling Have Little Effect on Soil Organic Carbon Content in Semiarid Argentina. *Soil and Tillage Research*, 134, 147-152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2013.08.003>
- Hackbart, V. C. S., de Lima, G. T. N. P., & dos Santos, R. F. (2017). Theory and Practice of Water Ecosystem Services Valuation: Where Are We Going? *Ecosystem Services*, 23, 218-227. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.12.010>
- Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Kätterer, T., Lugato, E., Thomsen, I. K., . . . Söderström, B. (2015). What Are the Effects of Agricultural Management on Soil Organic Carbon in Boreo-Temperate Systems? *Environmental Evidence*, 4(1), 23. doi:10.1186/s13750-015-0049-0
- Haines-Young, R., & Potschin-Young, M. B. (2018). Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (Cices V5.1): A Policy Brief. *One Ecosystem*, 3, e27108.
- Hartemink, A. E. (2016). Chapter Two - the Definition of Soil since the Early 1800s. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 137, pp. 73-126): Academic Press.
- Hellevang, H., & Aagaard, P. (2015). Constraints on Natural Global Atmospheric Co2 Fluxes from 1860 to 2010 Using a Simplified Explicit Forward Model. *Scientific Reports*, 5(1), 17352. doi:10.1038/srep17352
- House, J., Prentice, I., & Quere, C. L. (2002). Maximum Impacts of Future Reforestation or Deforestation on Atmospheric Co2. *Global Change Biology*, 8.

- Huang, P.-M., Wang, M.-K., & Chiu, C.-Y. (2005). Soil Mineral–Organic Matter–Microbe Interactions: Impacts on Biogeochemical Processes and Biodiversity in Soils. *Pedobiologia*, 49(6), 609-635. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.006>
- IPCC. (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Retrieved from
- IPMA. (2016). *Boletim Climatológico Anual – 2015 Portugal Continental*. Retrieved from
- Jensen, J. L., Christensen, B. T., Schjønning, P., Watts, C. W., & Munkholm, L. J. (2018). Converting Loss-on-Ignition to Organic Carbon Content in Arable Topsoil: Pitfalls and Proposed Procedure. *European Journal of Soil Science*, 69(4), 604-612. doi:<https://doi.org/10.1111/ejss.12558>
- Jiao, Y., Xu, Z., & Zhao, J. (2009). Effects of Grassland Conversion to Cropland and Forest on Soil Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon in the Farming-Pastoral Ecotone of Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 29(3), 150-154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2009.07.001>
- Jónsson, J. Ö. G., & Davíðsdóttir, B. (2016). Classification and Valuation of Soil Ecosystem Services. *Agricultural Systems*, 145, 24-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.02.010>
- Jónsson, J. Ö. G., Davíðsdóttir, B., & Nikolaidis, N. P. (2017). Valuation of Soil Ecosystem Services. In S. A. Banwart & D. L. Sparks (Eds.), *Advances in Agronomy* (Vol. 142, pp. 353-384): Academic Press.
- Klein, C. A., & Antonini, S. A. (2013). Phosphorus: From the Nutrient to Pollutant. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental; REGET*, V. 8, N. 8, SEPT.-DEC., 2012. doi:10.5902/223611706430
- Koga, N., Shimoda, S., Shirato, Y., Kusaba, T., Shima, T., Niimi, H., . . . Atsumi, K. (2020). Assessing Changes in Soil Carbon Stocks after Land Use Conversion from Forest Land to Agricultural Land in Japan. *Geoderma*, 377, 114487. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114487>
- Konare, H., Yost, R., Doumbia, M., McCarty, G., Jarju, A., & Kablan, R. (2010). Loss on Ignition: Measuring Soil Organic Carbon in Soils of the Sahel, West Africa. *African journal of agricultural research*, 5, 3088-3095.
- Lal, R. (2004a). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304, 1623-1627.
- Lal, R. (2004b). Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change. *Geoderma*, 123(1), 1-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Latifi, N., Rashid, A. S. A., Siddiqua, S., & Horpibulsuk, S. (2015). Micro-Structural Analysis of Strength Development in Low- and High Swelling Clays Stabilized with Magnesium Chloride Solution — a Green Soil Stabilizer. *Applied Clay Science*, 118, 195-206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.10.001>
- Läuchli, A., & Grattan, S. R. (2012). Plant Stress Physiology. In S. Shabala (Ed.), *Plant Stress Physiology* (pp. 194 - 209).
- Lopes, A. S. (1995). *International Soil Fertility Manual*. Potash and phosphate institute
- Madeira, M., Ricardo, R. P., Correia, A., Garcez, A., Monteiro, F., Raposo, J. A., . . . Duarte, J. M. (2004). Quantidade De Carbono Orgânico Nos Solos De Portugal Continental E Particularidades Dos Solos Do Noroeste E Dos Montados Do Sul. *Centro de Estudos de Pedologia do IICT*, 11.
- Manjaihah, K. M., Mukhopadhyay, R., Paul, R., Datta, S. C., Kumararaja, P., & Sarkar, B. (2019). Chapter 13 - Clay Minerals and Zeolites for Environmentally Sustainable Agriculture. In M. Mercurio, B. Sarkar, & A. Langella (Eds.), *Modified Clay and Zeolite Nanocomposite Materials* (pp. 309-329): Elsevier.

- Matthes, K., Wit, T. D. d., Lilensten, J., & Collectif. (2021). Earth's Climate Response to a Changing Sun. In *1.1 the Earth's Atmosphere: An Introduction* (pp. 3-12): EDP Sciences.
- Miller, R. O., & Kissel, D. E. (2010). Comparison of Soil Ph Methods on Soils of North America. *Soil Science Society of America Journal*, 74(1), 310-316. doi:<https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0047>
- Mohajan, H. (2011). Greenhouse Gas Emissions Increase Global Warming. *International Journal of Economic and Political Integration*, 1 n°2, 21-34.
- Muhammed, S. E., Coleman, K., Wu, L., Bell, V. A., Davies, J. A. C., Quinton, J. N., . . . Whitmore, A. P. (2018). Impact of Two Centuries of Intensive Agriculture on Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Cycling in the Uk. *Science of The Total Environment*, 634, 1486-1504. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.378>
- Muñoz-Rojas, M. (2018). Soil Quality Indicators: Critical Tools in Ecosystem Restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 47-52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>
- Nachtergaele, F. (2010). *The Classification of Leptosols in the World Reference Base for Soil Resources*. Paper presented at the 19th World Congress of Soil Science, Australia.
- Nadal-Romero, E., Rubio, P., Kremyda, V., Absalah, S., Cammeraat, E., Jansen, B., & Lasanta, T. (2021). Effects of Agricultural Land Abandonment on Soil Organic Carbon Stocks and Composition of Soil Organic Matter in the Central Spanish Pyrenees. *CATENA*, 205, 105441. doi:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105441>
- Nakazawa, T. (2020). Current Understanding of the Global Cycling of Carbon Dioxide, Methane, and Nitrous Oxide. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 96(9), 394-419. doi:10.2183/pjab.96.030
- Nortcliff, S., Hulpke, H., Bannick, C. G., Terytze, K., Knoop, G., Bredemeier, M., & Schulte-Bisping, H. (2011). Definition, Function, and Utilization of Soil. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 33. doi:doi:10.1002/14356007.b07_613.pub3
- Nunes, A. N., Figueiredo, A., & Almeida, A. C. (2012). The Effects of Farmland Abandonment and Plant Succession on Soil Properties and Erosion Processes: A Study Case in Centre of Portugal. *Geografia e Ordenamento do Território, Revista Eletrónica Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território*.
- Oshunsanya, S. O. (2018). Introductory Chapter: Relevance of Soil Ph to Agriculture. In Pareja-Sánchez, E., Cantero-Martínez, C., Álvaro-Fuentes, J., & Plaza-Bonilla, D. (2020). Soil Organic Carbon Sequestration When Converting a Rainfed Cropping System to Irrigated Corn under Different Tillage Systems and N Fertilizer Rates. *Soil Science Society of America Journal*, 84(4), 1219-1232. doi:<https://doi.org/10.1002/saj2.20116>
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., . . . Wagner, F. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Retrieved from
- Pereira, Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., & Brevik, E. (2018). *Soil Ecosystem Services, Sustainability, Valuation and Management. A Review*. Paper presented at the EGU General Assembly Conference Abstracts. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..20.4979P>
- Pereira, H. M., Domingos, T., Pedroso, C. M., Proença, V., Rodrigues, P., Ferreira, M., . . . Nogueira, A. (2009). Avaliação Dos Serviços Dos Ecossistemas Em Portugal In *Ecossistemas E Bem-Estar Humano: Avaliação Para Portugal Do Millennium Ecosystem Assessment* (pp. 687-714). Lisboa: Escolar Editora.
- Pereira, V., & FitzPatrick, E. A. (1995). Cambisols and Related Soils in North-Central Portugal: Their Genesis and Classification. *Geoderma*, 66(3), 185-212. doi:[https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00076-M](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00076-M)

- Périé, C., & Ouimet, R. (2008). Organic Carbon, Organic Matter and Bulk Density Relationships in Boreal Forest Soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 88, 315-325.
- Pinheiro, E. C. (2014). A Beira Interior: De Mosaico De Paisagens a Região Identitária. *Revista Online do Museu de Lanifícios da Universidade da Beira Interior*.
- Ploepplau, C., & Don, A. (2013). Sensitivity of Soil Organic Carbon Stocks and Fractions to Different Land-Use Changes across Europe. *Geoderma*, 192, 189-201. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003>
- Potschin, R. H.-Y. a. M. (2018). *Common International Classification of Ecosystem Services Guidance on the Application of the Revised Structure*. Retrieved from
- Rosolem, C. A., Santos, F. P. d., Foloni, J. S. S., & Calonego, J. C. (2006). Potássio No Solo Em Conseqüência Da Adubação Sobre a Palha De Milheto E Chuva Simulada. *Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas*, 41, 1033-1040.
- Rumpel, C., & Chabbi, A. (2021). Managing Soil Organic Carbon for Mitigating Climate Change and Increasing Food Security. *11*(8), 1553.
- Rumpel, C., & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep Soil Organic Matter—a Key but Poorly Understood Component of Terrestrial C Cycle. *Plant and Soil*, 338(1), 143-158. doi:10.1007/s11104-010-0391-5
- Safi, W., & Singh, S. (2022). Efficient & Effective Improvement and Stabilization of Clay Soil with Waste Materials. *Materials Today: Proceedings*, 51, 947-955. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.333>
- Salehi, M. H., Beni, O. H., Harchegani, H. B., Borujeni, I. E., & Motaghian, H. R. (2011). Refining Soil Organic Matter Determination by Loss-on-Ignition. *Pedosphere*, 21(4), 473-482. doi:[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60149-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60149-5)
- Schumacher, B. A. (2002). Methods for the Determination of Total Organic Carbon (Toc) in Soils and Sediments. *Ecological Risk Assessment Support Center Office of Research and Development US. Environmental Protection Agency*.
- Schwendenmann, L., & Pendall, E. (2006). Effects of Forest Conversion into Grassland on Soil Aggregate Structure and Carbon Storage in Panama: Evidence from Soil Carbon Fractionation and Stable Isotopes. *Plant and Soil*, 288(1), 217-232. doi:10.1007/s11104-006-9109-0
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., . . . Zhang, F. (2011). Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology*, 156(3), 997-1005. doi:10.1104/pp.111.175232
- Sil, Â., Fonseca, F., Gonçalves, J., Honrado, J., Marta-Pedroso, C., Alonso, J., . . . 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(2), 82-104. doi:10.1080/21513732.2017.1297331
- Silva, V. R. F. d. (2018). *Gênese De Luvisolos Ao Longe De Uma Climosequência Sobre Anfibolito No Semiárido De Pernambuco*. (Master), Universidade Federal Rural de Pernambuco,
- Tang, S., Guo, J., Li, S., Li, J., Xie, S., Zhai, X., . . . Wang, K. (2019). Synthesis of Soil Carbon Losses in Response to Conversion of Grassland to Agriculture Land. *Soil and Tillage Research*, 185, 29-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.011>
- Tau Strand, L., Fjellstad, W., Jackson-Blake, L., & De Wit, H. A. (2021). Afforestation of a Pasture in Norway Did Not Result in Higher Soil Carbon, 50 years after Planting. *Landscape and Urban Planning*, 207, 104007. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.104007>

- Toniolo, J. C., & Carneiro, C. D. R. (2015). Processos Geológicos De Fixação De Carbono Na Terra E Aquecimento Global. *Terrae Didatica*, 6(1), 31-56. doi:10.20396/td.v6i1.8637485
- Vasu, D., Tiwary, P., Chandran, P., & Singh, S. K. (2020). Soil Quality for Sustainable Agriculture. In R. S. Meena (Ed.), *Nutrient Dynamics for Sustainable Crop Production*. Singapore: Springer Singapore.
- Vezzani, F. M., & Mielniczuk, J. (2009). Uma Visão Sobre Qualidade Do Solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 743-755.
- Wang, J.-P., Wang, X.-J., & Zhang, J. (2013). Evaluating Loss-on-Ignition Method for Determinations of Soil Organic and Inorganic Carbon in Arid Soils of Northwestern China. *Pedosphere*, 23(5), 593-599. doi:[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60052-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60052-1)
- Wang, X., Wang, J., & Zhang, J. (2012). Comparisons of Three Methods for Organic and Inorganic Carbon in Calcareous Soils of Northwestern China. *PLOS ONE*, 7(8), e44334. doi:10.1371/journal.pone.0044334
- Yellajosula, G., Cihacek, L., Faller, T., & Schauer, C. (2020). Soil Carbon Change Due to Land Conversion to Grassland in a Semi-Arid Environment. *Soil Systems*, 4(3), 43.
- Zhang, Y., Liao, X., Wang, Z., Wei, X., Jia, X., & Shao, M. (2020). Synchronous Sequestration of Organic Carbon and Nitrogen in Mineral Soils after Conversion Agricultural Land to Forest. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106866. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106866>