



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Uso de Tecnosolos como medida corretiva do solo em zonas queimadas — estudo de caso

Hanna Catarina Barbosa de Moraes



isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

P. PORTO

2023

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Uso de Tecnosolos como medida corretiva do solo em zonas queimadas — estudo de caso

Use of Technosoil in the recovery of burned forest soils — case study

Hanna Catarina Barbosa de Moraes

1200468

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação da Doutora Maria Manuela Martins de Carvalho, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto Doutora

Doutora Maria Cristina da Costa Vila

Professora Associada, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Doutora Maria Manuela Martins de Carvalho

Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **Hanna Catarina Barbosa de Moraes**, em 24 de Julho de 2023 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **15 (quinze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.

Dedico esta dissertação aos meus Pais e minhas Irmãs, que sempre me apoiaram incondicionalmente em todos os meus sonhos...

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

À minha orientadora, Doutora Manuela Carvalho (DEG|ISEP) e à minha co-orientadora Engenheira Maria João Fernandes (REQUIMTE|LAQV) por todo o apoio e disponibilidade ao longo da realização da dissertação, que me proporcionou novos aprendizados e me fez explorar minhas capacidades dentro e fora do laboratório.

Ao REQUIMTE|LAQV, na pessoa da Professora Doutora Cristina Delerue-Matos pela oportunidade de realizar parte do trabalho experimental no seu laboratório.

Ao LGMC do ISEP, na pessoa do Professor Doutor José Augusto Fernandes pela oportunidade de realizar parte do trabalho experimental nos seus laboratórios.

Ao ICT|UM, na pessoa da Professora Doutora Teresa Valente pela realização das granulometrias dos solos estudados.

Aos colaboradores do REQUIMTE|LAQV, principalmente à Patrícia Santos, pelo auxílio na realização dos ensaios laboratoriais.

À minha colega e amiga Beatriz Araújo que partilhou comigo esta jornada e foi o meu par durante todo o trabalho de laboratório.

À minha família e amigos por todas as palavras de motivação e encorajamento, que me acompanharam neste percurso académico.

Ao projeto TERRAMATER: medidas inovadoras de recuperação preventiva em áreas queimadas (0701_TERRAMATER_1_E) cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do INTERREG V-A Espanha-Portugal (POCTEP) 2014-2020.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Tecnossolos, Solos, Fogos Florestais, Geoambiente, Remediação de Solos

Resumo

Áreas florestais por todo o mundo são atingidas pela frequente ocorrência de incêndios, que sucedem de forma anual. Portugal não é exceção, sendo esta uma problemática grave e preocupante que, entre outros, tem como consequência desregulamentação dos processos biogeoquímicos presentes nos solos, visto que, ocorre alteração das suas características físico-químicas e biológicas. Na generalidade dos casos, não há aplicação de medidas preventivas ou de recuperação, sendo demorado o processo natural de restabelecimento das funções ambientais, ecológicas e produtivas das áreas afetadas pelo fogo. Tendo em conta a situação apresentada, é importante desenvolver investigação que permita avaliar o impacto do fogo nos solos e a aplicação de medidas de correção e mitigação; no presente trabalho recorreu-se à aplicação de um Tecnossolo como medida inovadora, com características corretivas que permitem aperfeiçoar e agilizar o restabelecimento das funções do solo. A presente investigação, tem como principal foco avaliar o impacto da sua utilização, quando aplicado em um solo previamente sujeito a um fogo prescrito, através da monitorização temporal das características físicas e químicas dos solos. O Tecnossolo foi então aplicado três meses depois do fogo prescrito tendo como objetivos principais favorecer o aumento de água útil e do carbono recalcitrante no solo e, ainda, melhorar a fertilidade e a resistência à erosão. O estudo incidiu numa área piloto localizada no Parque Natural de Montesinho, no distrito de Bragança, onde foram recolhidas amostras de solo previamente e após o fogo prescrito, para posterior caracterização laboratorial. As amostras foram recolhidas na zona tratada com Tecnossolo e, para controlo, fora desta, em diferentes parcelas, profundidades e datas. Foram analisadas em laboratório as seguintes propriedades: concentração dos elementos constituintes, textura, pH em H₂O e em KCl, condutividade elétrica, teor em matéria orgânica, teor em azoto, teor em água e teor de carbono orgânico total. Os ensaios realizados permitiram concluir que a textura é a propriedade menos afetada, tanto pelo fogo controlado aplicado quanto pela utilização do Tecnossolo, enquanto a condutividade elétrica apresenta a maior variação.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Technosoils, Soils, Forest Fires, Geoenvironment, Soil Remediation

Abstract

Forest areas around the world are affected by frequent fires, which occur annually. Portugal is no exception, and this is a serious and worrisome problem that, among others, results in the deregulation of biogeochemical processes present in soils, since there is a change in their physical, chemical, and biological characteristics. In most cases, there is no application of preventive or recovery measures, and the natural process of re-establishing the environmental, ecological, and productive functions of the areas affected by the fire is slow. Considering this situation, it is important to develop research to evaluate the impact of fire on soils and the application of corrective and mitigation measures; in this study, an engineered Technosoil was applied as an innovative remediation measure, with corrective characteristics that enable to improve and facilitate the re-establishment of soil functions. The main focus of the present research is to evaluate the impact of its use, when applied to soil previously subjected to prescribed fire, through the temporal monitoring of physical and chemical soil characteristics. The application of Technosoil was then carried out three months after the prescribed fire, having as its main objectives to promote the increase of usable water and recalcitrant carbon in the soil and also to improve fertility and resistance to erosion. The study focused on a pilot area located in the Montesinho Natural Park, Bragança district, where soil samples were collected before and after prescribed fire, for further laboratory characterization. The samples were collected in the area treated with Technosoil and, for control, outside of it, in different plots, depths, and dates. The following properties were analyzed: elemental composition, texture, pH in H₂O and in KCl, electrical conductivity, and the levels of organic matter, nitrogen, water, and total organic carbon. The tests performed allowed us to conclude that the texture is the property less affected, either by the controlled fire applied or by the use of Technosoil. On the other hand, the electrical conductivity exhibited the highest variation.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. Introdução.....	3
1.1. Contextualização do Projeto TERRAMATER e Objetivos.....	5
1.2. Importância da temática	6
1.3. Enquadramento da área em estudo	7
1.3.1. Geomorfologia	7
1.3.2. Geologia	8
1.3.3. Clima.....	10
2. Solos.....	17
2.1. Classificação dos Solos	18
2.1.1. Solos Naturais.....	19
2.1.2. Tecossolos	24
2.2. Propriedades dos solos	25
2.2.1. Porosidade.....	25
2.2.2. Estrutura.....	26
2.2.3. Textura	27
2.2.4. Condutividade Elétrica	28
2.2.5. pH	29
2.2.6. Matéria Orgânica.....	29
2.2.7. Teor em Azoto	30
2.2.8. Teor em Carbono Orgânico Total	30
2.2.9. Teor em Água	30
3. Fogos Florestais.....	33
3.1. Fogos Florestais na Europa.....	33
3.2. Fogos Florestais em Portugal	34
3.3. Fogos Prescritos	36
3.4. Legislação Nacional em vigor	36
3.5. Efeitos do Fogo nas Propriedades do Solo	37
3.5.1. Porosidade.....	38
3.5.2. Estrutura.....	39
3.5.3. Textura	39
3.5.4. Condutividade Elétrica	39
3.5.5. pH	40
3.5.6. Matéria Orgânica.....	40
3.5.7. Teor em Azoto	41
3.5.8. Teor em Carbono Orgânico Total	41
3.5.9. Teor em Água	42
4. Materiais e Métodos.....	45
4.1. Localização da Área Piloto de Aveleda e Amostragem	45
4.2. Tecossolo.....	47
4.3. Análise Química Elementar Simplificada.....	48
4.4. Análise Granulométrica	49
4.5. Condutividade Elétrica	50
4.6. pH em H ₂ O e em KCl.....	51
4.7. Matéria Orgânica.....	52
4.8. Teor em Carbono Orgânico Total	54
4.9. Teor em Azoto	55
4.10. Teor em Água	56
5. Análise dos resultados nas propriedades.....	59

5.1.	Análise Química Elementar Simplificada.....	59
5.2.	Textura.....	63
5.2.1.	Tecnossolo aplicado	63
5.2.2.	Solo natural	64
5.3.	Condutividade Elétrica	69
5.4.	pH	71
5.5.	Matéria Orgânica.....	75
5.6.	Teor em Carbono Orgânico Total	78
5.7.	Teor em Azoto	80
5.8.	Teor em Água	83
5.9.	Relações entre as propriedades	86
5.9.1.	pH com teor de argila (valores médios por profundidade).....	86
5.9.2.	pH com teor em azoto (valores médios por profundidade).....	87
5.9.3.	Evolução temporal (valores médios por campanha).....	87
	Considerações Finais	91
	Referências Bibliográficas	95

Índice de figuras

Figura 1. Distribuição das áreas (>10 ha) ardidadas em Portugal continental em 2022 (versão provisória). Fonte: ICNF, reportado a 15 de outubro (ICNF, 2022).....	7
Figura 2. Zonas Geoestruturais do Nordeste Transmontano segundo Ribeiro, A. (1974). Adaptado da folha 2, 1:200.000, Instituto Geológico Mineiro.	9
Figura 3. Excerto da Carta Geológica de Portugal, Folha 3D - Espinhosela. Escala 1: 50 000. Marcador vermelho – localização da área piloto.	10
Figura 4. Temperatura média do ar (média anual) e temperatura máxima do ar (média anual) em Bragança. Fontes de Dados: IPMA/MAA-MEM-MCTES-MAAC. Adaptado de: PORDATA (2022)..	11
Figura 5. Concentração de gases com efeito de estufa em Portugal - Ilha Terceira. IPMA (2022)..	12
Figura 6. Desvios da temperatura e precipitação média anual em Portugal continental (período 1931-2020). Fonte: IPMA (2021).....	13
Figura 7. Distribuição espacial do índice de seca meteorológica a 31 de dezembro 2021, a 31 janeiro e a 28 de fevereiro de 2022. Fonte: IPMA (2022).....	13
Figura 8. Principais horizontes dos solos (Porta Casanellas et al. 2003).....	18
Figura 9. Carta de Solos de Portugal. Fonte: Atlas Digital do Ambiente, segundo a classificação FAO/IUSS (https://florestas.pt/conhecer/o-estudo-do-solo-a-pedologia-e-as-cartas-de-solo-em-portugal/).	20
Figura 10. Triângulo textural utilizado na classificação textural dos solos. Adaptado de SSDS, 2017.	28
Figura 11. Áreas ardidadas em Portugal em 2020. Fonte: ICNF, 2020.	35
Figura 12. Localização geográfica da rede de amostragem definida na parcela piloto de Aveleda. Fonte: Relatório técnico-científico do projeto TERRAMATER (TERRAMATER, 2022).	45
Figura 13. Processo de recolha de amostras. Bragança, 2022.....	46
Figura 14. Processo de peneiração do solo e separação das duas frações granulométricas.	46
Figura 15. Colocação do Tecnosolo numa faixa de terreno na área piloto de Aveleda (Fonte: Projeto TERRAMATER).	48
Figura 16. Preparação dos provetes para análise química elementar simplificada.....	49
Figura 17. Determinação da Condutividade Elétrica.....	50
Figura 18. Determinação do pH em H ₂ O.	51
Figura 19. Determinação do pH em KCl.	52
Figura 20. Determinação da Matéria Orgânica.....	53
Figura 21. Determinação do Carbono Orgânico Total.	55
Figura 22. Valores médios das frações granulométricas ao longo do tempo nos solos das parcelas fora da faixa com Tecnosolo.....	66
Figura 23. Valores médios das frações granulométricas ao longo do tempo nos solos das parcelas na faixa com Tecnosolo.	67
Figura 24. Classificação textural dos solos naturais tendo em conta os valores médios das parcelas fora da faixa com Tecnosolo (P1, P7, P8, P9 e P11).....	68
Figura 25. Classificação textural dos solos naturais tendo em conta os valores médios das parcelas na faixa com Tecnosolo (roxo), do Tecnosolo inicial (rosa) e do Tecnosolo em B3a e B4a (rosa).	68

(página propositadamente em branco)

Índice de tabelas

Tabela 1. Esquema de classificação do tamanho dos poros desenvolvido por Brewer, 1964.....	26
Tabela 2. Classes de textura consoante o tamanho das partículas, USDA	27
Tabela 3. NiltonTM XL3t XRF Analyser - Elementos analisáveis em Modo Minério Cu/Zn.....	49
Tabela 4. Valores médios, máximos e mínimos de alguns elementos detetados nos solos naturais das parcelas sem Tecnosolo (%)	59
Tabela 5. Valores médios por profundidade de alguns elementos detetados nos solos naturais das parcelas sem Tecnosolo (%)	60
Tabela 6. Valores médios, máximos e mínimos de alguns elementos detetados nos solos naturais das parcelas com Tecnosolo (%).....	61
Tabela 7. Valores médios por profundidade de alguns elementos detetados nos solos naturais das parcelas com Tecnosolo (%)	62
Tabela 8. Concentração de elementos maiores presentes no Tecnosolo (%).....	62
Tabela 9. Valores médios das frações granulométricas no Tecnosolo em B3a.....	63
Tabela 10. Valores médios das frações granulométricas no Tecnosolo em B4a.....	64
Tabela 11. Valores médios globais das frações granulométricas do solo natural	64
Tabela 12. Valores médios das frações granulométricas dos solos das parcelas fora da faixa com Tecnosolo.....	65
Tabela 13. Valores médios das frações granulométricas dos solos das parcelas na faixa com Tecnosolo.....	67
Tabela 14. Evolução temporal dos valores médios da CE por parcela.....	70
Tabela 15. Valores médios da CE por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo.....	70
Tabela 16. Valores médios da CE por profundidade nas parcelas com Tecnosolo	71
Tabela 17. Evolução temporal dos valores médios de pH em H ₂ O por parcela.....	72
Tabela 18. Evolução temporal dos valores médios de pH em KCl por parcela	72
Tabela 19. Valores médios do pH H ₂ O por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo	73
Tabela 20. Valores médios do pH KCl por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo.....	73
Tabela 21. Valores médios do pH H ₂ O por profundidade nas parcelas com Tecnosolo	74
Tabela 22. Valores médios do pH KCl por profundidade nas parcelas com Tecnosolo.....	74
Tabela 23. Valores médios de MO por parcela (%).....	75
Tabela 24. Valores médios de MO por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo	76
Tabela 25. Valores médios de MO por profundidade nas parcelas com Tecnosolo	77
Tabela 26. Valores médios do COT por parcela (%)	78
Tabela 27. Valores médios do COT por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo.....	79
Tabela 28. Valores médios de COT por profundidade nas parcelas com Tecnosolo.....	80
Tabela 29. Valores médios de teor em azoto por parcela (%)	81
Tabela 30. Valores médios de teor em azoto por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo.....	81
Tabela 31. Valores médios de N por profundidade nas parcelas com Tecnosolo.....	82
Tabela 32. Valores médios de teor em água por parcela (%)	84
Tabela 33. Valores médios de teor em água por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo	84
Tabela 34. Valores médios de teor em água por profundidade nas parcelas com Tecnosolo.....	85
Tabela 35. Média por Profundidade (Parcelas sem Tecnosolo)	86
Tabela 36. Média por Profundidade (Parcelas com Tecnosolo)	86
Tabela 37. Média por profundidade (Parcelas sem Tecnosolo)	87
Tabela 38. Média por profundidade (Parcelas com Tecnosolo).....	87
Tabela 39. Valores médios por campanha das propriedades	88

(página propositadamente em branco)

Índice de equações

Equação 1	25
Equação 2	53
Equação 3	54
Equação 4	56

(página propositadamente em branco)

Acrónimos e abreviaturas

AGIF - Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

COT – Carbono Orgânico Total

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

GEE – Gases de Efeito Estufa

ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas

ISRM – International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering

PNGIFR - Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais

PNM – Parque Natural de Montesinho

SGIFR - Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais

TERRAMATER – Medidas inovadoras de recuperação preventivas em áreas queimadas; Projeto cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do INTERREG V-A Espanha-Portugal (POPCTEP) 2014-2020

USDA – United States Department of Agriculture

WRB – World Reference Base for Soil Resources

(página propositadamente em branco)

Capítulo I

Introdução

(página propositadamente em branco)

1. Introdução

A presente dissertação foi realizada no âmbito do curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), inserindo-se na sua vertente geoambiental. Todo o trabalho de campo e laboratorial foi desenvolvido no âmbito do projeto TERRAMATER - Medidas inovadoras de recuperação preventiva em áreas de queimadas, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do programa Interreg A-V Espanha-Portugal (POCTEP) 2014-2020, com apoio do Grupo de Reação e Análises Químicas (GRAQ), unidade de investigação do ISEP integrada na Rede de Química e Tecnologia REQUIMTE/LAQV e, ainda, com apoio do LGMC – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP.

No projeto TERRAMATER, vocacionado para a prevenção e recuperação de áreas rurais e florestais queimadas, foram definidas áreas piloto na Galiza e no Norte de Portugal onde tem sido realizada, ao longo do tempo, a monitorização das propriedades dos solos afetados e dos processos de erosão, avaliado o impacto dos incêndios florestais e implementadas medidas de prevenção e recuperação, sempre com foco na melhoria do processo de recuperação das funções ambientais, ecológicas e produtivas dessas áreas.

O fogo é um dos principais responsáveis pela alteração da paisagem mediterrânica que conhecemos e influencia toda a dinâmica regional. Os incêndios florestais impactam os solos de diferentes maneiras, consoante a sua intensidade, temperatura (amplitude térmica), tempo de ação e presença de aceleradores, entre outros (Andreu et al., 2001).

É de conhecimento comum, o facto de Portugal, tal como outros países do mundo, ser afetado anualmente por um grande número de incêndios florestais (San-Miguel-Ayanz et al., 2022). Como consequência, é notória uma alteração nas características físico-químicas e biológicas dos solos, o que conduz à desregulação dos processos biogeoquímicos. Grande parte destas alterações ocorrem devido à inexistência de medidas específicas de recuperação preventiva aplicadas, tornando todo o processo de recuperação das áreas queimadas, bastante demorado. Deste modo, apresenta-se com grande premência a necessidade de efetuar estudos científicos aplicados que permitam melhor conhecer os processos e avaliar o impacto da implementação de medidas de restauro e prevenção (Moraes et al., 2022).

No presente trabalho, em linha com os objetivos supracitados, optou-se pela monitorização dos fenómenos numa área piloto localizada em Bragança, no Parque de Montesinho, e pela aplicação de um Tecnosolo “à medida”, como método de restauro e prevenção. Os Tecnosolos “à medida” são solos artificiais, fabricados tendo em consideração as características do solo natural onde serão

aplicados e os objetivos a atingir com o seu uso; neste caso deverão comportar-se como uma medida corretiva para melhorar e acelerar o restabelecimento das funções naturais dos solos, reduzir as perdas por erosão e aumentar a sua capacidade de adaptação a fogos futuros.

Ao longo da dissertação serão aprofundadas temáticas relacionadas com os incêndios florestais no país, as suas consequências no solo e as alterações verificadas ao longo do tempo, antes e após aplicação do Tecnosolo. Deste modo, o capítulo I além da presente Introdução, contém uma breve contextualização do Projeto Terramater, bem como a importância da temática e enquadramento da área em estudo, seguido do capítulo referente aos Solos (capítulo II). Este segundo capítulo inicia com uma breve introdução aos solos e contempla temas como a classificação e propriedades dos mesmos, bem como uma explicação do tipo de Tecnosolo utilizado neste projeto. O terceiro capítulo (capítulo III) é dedicado aos Fogos Florestais, no qual, além de uma introdução ao tema, se inclui uma abordagem ao cenário nacional e europeu, aos fogos prescritos, à legislação existente e por fim, aos efeitos do mesmo nas propriedades do solo. O capítulo IV, relativo aos Materiais e Métodos aplicados neste trabalho, contém informação relevante a respeito dos instrumentos utilizados e procedimentos realizados nos ensaios laboratoriais desenvolvidos. Os resultados obtidos para cada propriedade física ou química dos solos e Tecnosolos bem como a análise, discussão e comparação dos mesmos, são apresentados no capítulo V. Por fim, no sexto e último capítulo encontram-se as considerações finais, no qual é realizada uma síntese das alterações notórias sofridas pelas propriedades ao longo do estudo bem como efetuadas as principais considerações associadas aos resultados obtidos.

1.1. Contextualização do Projeto TERRAMATER e Objetivos

Na Península Ibérica, o ano de 2017 ficou marcado pela devastação massiva ocorrida na serra galega e em vastas áreas do território português. Destaca-se em Portugal, no mesmo ano, o mês de junho em que ocorreram os incêndios em Várzea dos Cavaleiros, Pedrógão Grande e Alvares, onde arderam 29758 ha, 27364 ha e 17521 ha, respetivamente, e também o mês de outubro, nomeadamente as ocorrências florestais em Sandomil, Vilarinho, Figueiredo e Quiaios, correspondentes a áreas ardidas de 43191 ha, 35806 ha, 30142 ha e 16610 ha, respetivamente (ICNF, 2022). Tais acontecimentos, destacaram a necessidade de um esforço conjunto entre os dois países para gerir de forma sustentável as áreas afetadas pelos desastres e a necessidade de maior troca de experiências entre ambos os lados da fronteira. Infelizmente, o ano de 2022 contou, de novo, com episódios similares de fogos em grande escala, espalhados pela Península Ibérica, reafirmando a urgência e importância do projeto TERRAMATER.

A cooperação ibérica eficaz em todas as vertentes desta problemática ajudará no combate aos incêndios e permitirá intensificar esforços para resolver problemas recorrentes e muito graves em ambos os países, especialmente na região europeia transfronteiriça “Galiza – Norte de Portugal”. O projeto TERRAMATER, no âmbito do qual foi desenvolvido este trabalho académico, surgiu de uma parceria luso-galega e foi cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do programa Interreg VA Espanha-Portugal (POCTEP) 2014-2020, com um orçamento global de 1,3 milhões de euros por 3 anos. Neste projeto participam as seguintes entidades:

- Universidade de Santiago de Compostela (USC), Espanha (Entidade Coordenadora)
- Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
- Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Portugal
- Universidade do Minho (UM), Portugal
- Recursos y Valorización Ambiental, S.L.N.E (RVA), España

Neste projeto, no qual são propostas medidas inovadoras de recuperação preventiva em áreas queimadas, foram definidos como principais objetivos restaurar as funções ambientais e produtivas do local afetado, reduzir a perda de solo por erosão e aumentar sua resiliência a novos eventos de incêndio. Melhorar as condições ecológicas das áreas em recuperação e reduzir as ameaças por pragas em grupos florestais adjacentes são, também, objetivos a alcançar. A aplicação de emendas corretivas preparadas "à medida" para remediar solos em áreas queimadas, desenvolvidas tendo em conta o estudo aprofundado das condições ecológicas pós-fogo e dos processos biogeoquímicos

associados à remediação e melhoria da qualidade do solo, deverá permitir alcançar os objetivos propostos. Das medidas corretivas formuladas e testadas deverá resultar o aumento da matéria orgânica, contribuindo para a conservação e melhoria da qualidade do solo e para a criação de oportunidades de restauro ecológico das áreas queimadas, reduzindo a emissão de gases com efeito estufa (TERRAMATER, 2019).

1.2. Importância da temática

Segundo a base de dados nacional de incêndios publicada pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) foram registados um total de 10449 incêndios rurais no período compreendido entre 1 de janeiro e 15 de outubro de 2022. Estima-se que os incêndios resultaram em 110007 hectares de área ardida, 54801 ha associados a povoamentos, 44114 ha a matos e 11092 ha a zona agrícola, sendo os incêndios em povoamentos e matos denominados como incêndios florestais (ICNF, 2022).

Apesar de o ano de 2022 apresentar, até ao dia 15 de outubro, o 4.º menor valor em número de incêndios, concluiu-se que detém o 5.º valor mais elevado de área ardida desde 2012. Assim, houve uma redução no número de fogos, porém a área ardida é bastante superior quando comparada com os restantes anos. Na

Figura 1 ilustra-se a distribuição das áreas (>10 ha) ardidas em Portugal continental em 2022. Os alarmantes dados recolhidos anualmente mostram a necessidade da implementação de novas medidas, que visem prevenir a repetição destes acontecimentos num futuro próximo (ICNF, 2022).

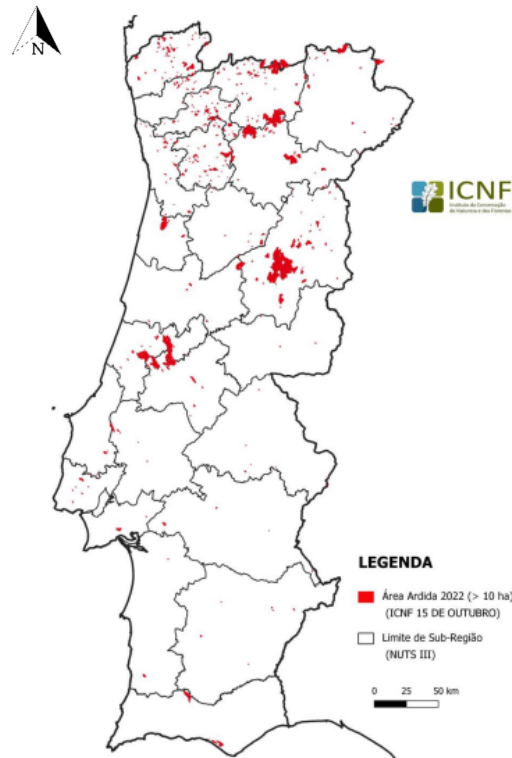


Figura 1. Distribuição das áreas (>10 ha) áridas em Portugal continental em 2022 (versão provisória). Fonte: ICNF, reportado a 15 de outubro (ICNF, 2022)

1.3. Enquadramento da área em estudo

Sendo o Projeto TERRAMATER uma colaboração Luso-Galega, foram definidas áreas pilotos para estudo em ambos os países. No entanto, a presente dissertação está limitada a uma das áreas piloto implementadas em Portugal, na zona de Bragança.

1.3.1. Geomorfologia

A área piloto considerada na presente dissertação localiza-se no Parque Natural de Montesinho (PNM). O Parque Natural de Montesinho situa-se na parte norte dos concelhos de Vinhais e Bragança, incluindo as serras de Montesinho e da Corôa, que perfazem uma área de 750 Km² e fazem fronteira com Espanha numa extensão de aproximadamente 90 Km. Sendo uma zona do nordeste de Portugal, é comumente associada a vastas áreas planálticas, consideradas prolongamento natural do Planalto de Castela-a-Velha (Pereira et al. 2002; Meireles et al. 2002).

A paisagem geomorfológica que hoje se conhece, começou a tomar forma no início do Cenozóico, sendo consequência de uma grande variação climática combinada com tectónica compressiva

(Ferreira, 1991). A mudança gradativa levou ao aparecimento de morfoestruturas em blocos e encaixes fluviais, além de superfícies herdadas e relevos residuais (Martin-Serrano, 1999).

A localização do Parque Natural é propícia à observação de dois tipos de paisagem distintas, sendo um misto entre domínios geomorfológicos de planalto e de montanha. Isto deve-se a deformação e ao levantamento orogénico Alpino, que ocorreu durante o Paleocénico-Eocénico (e.g., Martin-Serrano, 1994; Santanach Prat, 1994; Andeweg, 2002; Yepes, 2002). Tal facto é comprovado pela ocorrência de relevos de grandes dimensões (cerca de 2000 metros de altitude), que se consideram como sendo a terminação meridional das montanhas Galaico – Leonesas, bem como a existência de cotas acima de 800 metros que apresentam setores que preservam restos do aplanamento (Martin-Serrano, 1994).

A área piloto em estudo localiza-se em Aveleda, que, por sua vez, pertence ao planalto da Alta Lombada, sendo uma zona condicionada por um conjunto de falhas, na sua maioria ocultas e com rumo N10°W (Meireles, 2000).

1.3.2. Geologia

Devido à sua integração no centro da Península Ibérica e na região Galiza-Trás-os-Montes, a geologia local apresenta elevada diversidade, caracterizada por um dos quadros geológicos mais complexos da Península Ibérica, dando origem a um importante e diversificado património geológico (Meireles et al., 1999). Destaca-se a presença de intrusões graníticas e de sedimentos aluviais Cenozóicos, tal como a existência do maciço alóctone de Bragança, que gerou um complexo manto de transporte associado à sua instalação no período da orogenia Varisca. Deste modo, é notório que o maciço de Bragança, que combina as rochas da crosta e do manto, como granulitos e metaperidotitos, é um dos cinco complexos com esta peculiaridade em toda a Península Ibérica. A geologia local encontra-se ilustrada na Figura 2. De acordo com os dados disponíveis, a instalação do maciço ocorreu há aproximadamente 410 milhões de anos como resultado da colisão de placas tectónicas (Ribeiro, 1974; Iglésias et al., 1983).

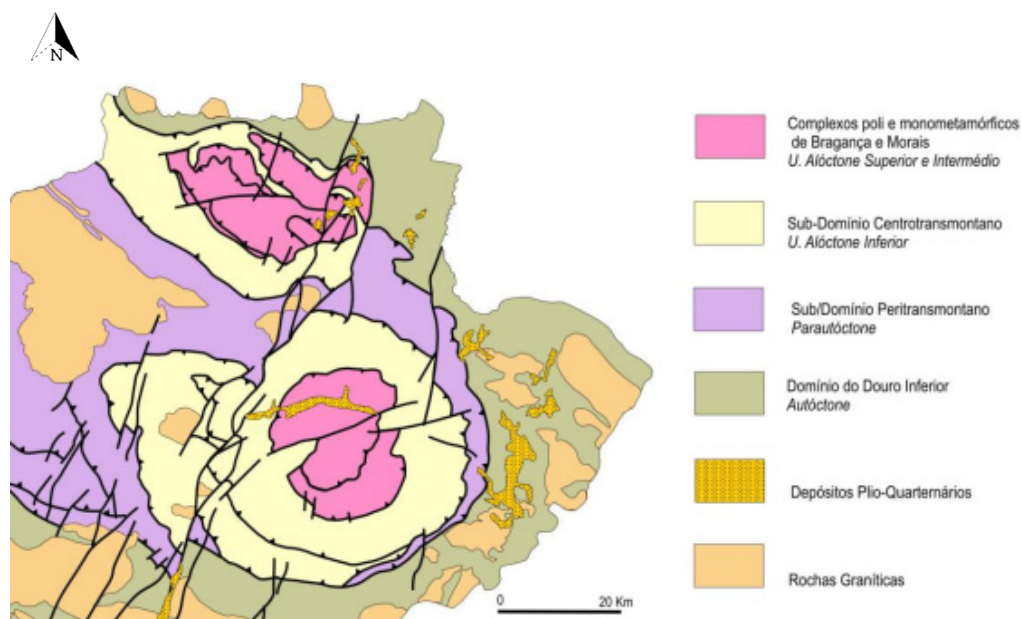


Figura 2. Zonas Geoestruturais do Nordeste Transmontano segundo Ribeiro, A. (1974). Adaptado da folha 2, 1:200.000, Instituto Geológico Mineiro.

No PNM também é visível a presença de areia e cascalho do Terciário, com idade entre 2 e 5 milhões de anos, observados perto de Aveleda, Baçal e Atalaia, que são vestígios do sistema de paleodrenagem local, que já faz parte da Bacia do Douro, mas desagua no interior da Península Ibérica, na região de Castela-a-Velha. A Serra de Montesinho é composta principalmente por granito de grão médio-grosseiro, instalado há cerca de 300 milhões de anos. O maciço granítico em questão estende-se até Espanha, onde na Serra da Gamoneda a elevação aumenta para cerca de 1700 m (Meireles, et al., 1999).

A área piloto encontra-se assinalada na Figura 3, podendo-se verificar que o local faz parte do complexo Sub-Autóctone (S_{is}), caracterizado pela presença de uma formação infraquartzítica, composta por filitos cinzentos, carbonosos e grauvaques no topo, seguidos por intercalações de: liditos, quartzitos, conglomerados, calcários dolomíticos, tufos ácidos e tufos intermédio-básicos. Do ponto de vista cronológico, a formação pertence ao Silúrico (Landoveriano), (Meireles et al., 1999).

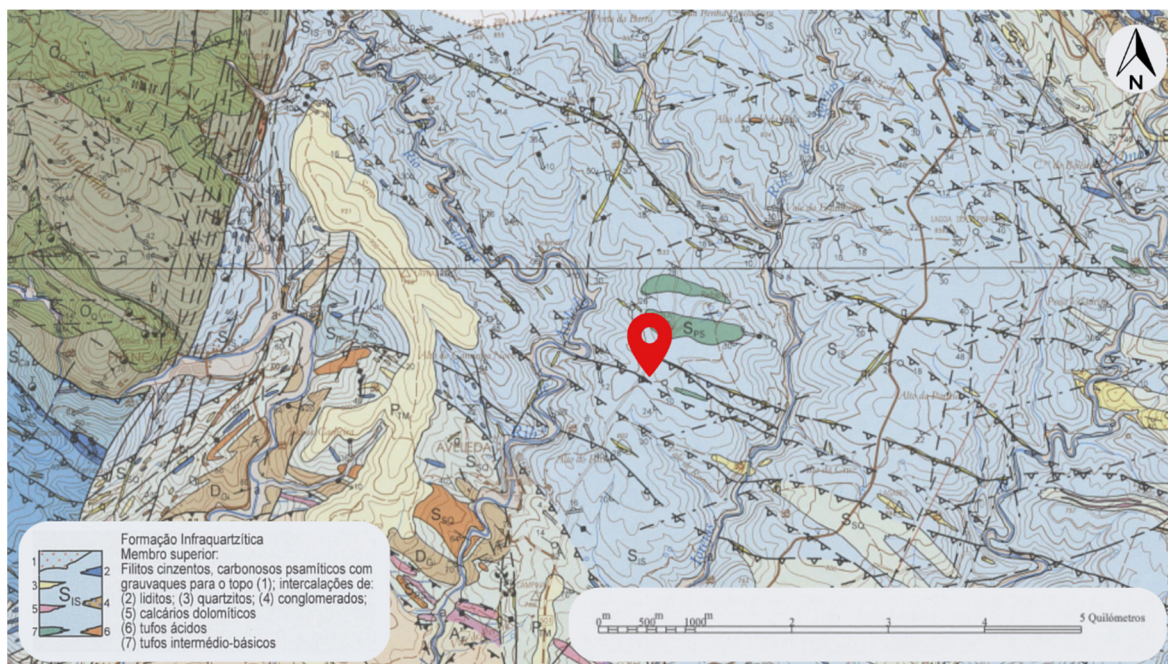


Figura 3. Excerto da Carta Geológica de Portugal, Folha 3D - Espinhosela. Escala 1: 50 000. Marcador vermelho – localização da área piloto.

1.3.3. Clima

O clima de Trás-os-Montes é fortemente influenciado pelas serras do Alto Minho (1545 m) ao Alvão-Marão (1415 m). O cordão montanhoso formado é cercado por duas outras serras de menor dimensão, em que a primeira se inicia em Maiores e estende-se até Padrela-Falperra, Alto de Justes e Serra de S. Domingos e a segunda inclui as zonas de Montesinho, Coroa e Relevo de Nogueira, que atravessam desde a Serra de Bornes ao Planalto de Carrazeda, sendo este o ponto mais meridional de Trás-os-Montes (Meireles et al., 1999).

Comparativamente ao resto do país, considera-se a região como tendo um macroclima que se caracteriza por prolongados meses de baixas temperaturas seguidas de três meses em que as mesmas são extremamente altas. Na zona do Parque Natural de Montesinho, a temperatura média anual, normalmente, varia entre 8,5 °C e 12,8 °C, enquanto a média das temperaturas mínima e máxima variam entre os 5-7 °C e os 14-17 °C, respetivamente. Nos meses de inverno e primavera é comum a ocorrência de fenómenos de inversão térmica, que têm como consequência uma diminuição da temperatura nas zonas de vale, quando comparadas com as regiões que apresentam maior altitude. Os vales mais profundos, durante o verão, apresentam os valores mais altos de temperaturas máximas, ou seja, no geral, são estes os locais onde se observa uma maior amplitude térmica, tanto diária como anual (Pereira et al., 1999).

Recentemente, em Portugal, o inverno do ano de 2021 foi considerado o 4º inverno mais quente desde 1931. O valor da temperatura média foi muito superior ao valor esperado, tendo apresentado um desvio positivo de 1,35 °C. O valor médio da temperatura máxima, foi dos mais altos dos últimos 90 anos, 19,5 °C, com uma anomalia positiva de 2,38 °C (IPMA, 2022). Relativamente à região de Bragança, o valor mais alto da temperatura média do ar registado entre 2018 e 2021, foi o do ano de 2020, tal como o da temperatura máxima do ar (Figura 4).

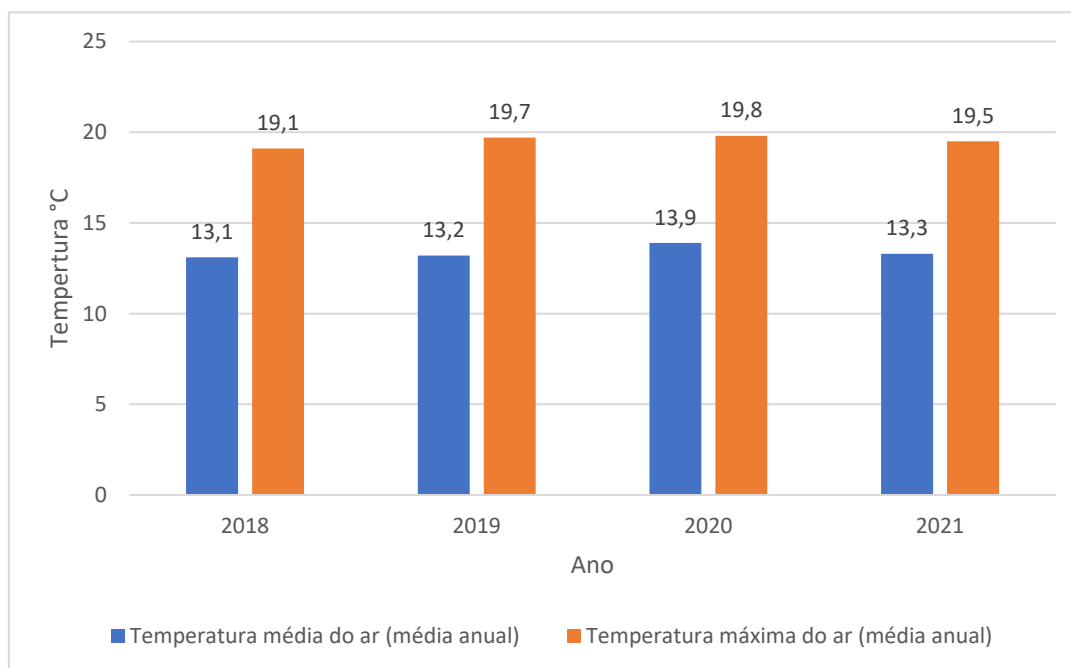


Figura 4. Temperatura média do ar (média anual) e temperatura máxima do ar (média anual) em Bragança. Fontes de Dados: IPMA/MAA-MEM-MCTES-MAAC. Adaptado de: PORDATA (2022).

O aumento crescente da média das temperaturas ao longo dos anos, é uma das consequências do aumento da concentração dos gases com efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente dióxido de carbono e metano. Em Portugal, no ano de 2019, estimou-se que o total das emissões de GEE, excluindo o setor florestal e alteração de uso do solo, sofreu um aumento de 8,1 % face a 1990 e um decréscimo de 5,4 % face a 2018, como ilustra a Figura 5. A recolha das amostras de ar para este tipo de estudo é, desde 1979, feita pela estrutura do IPMA na Ilha Terceira, sendo a única estação presente no país (APA, 2021).

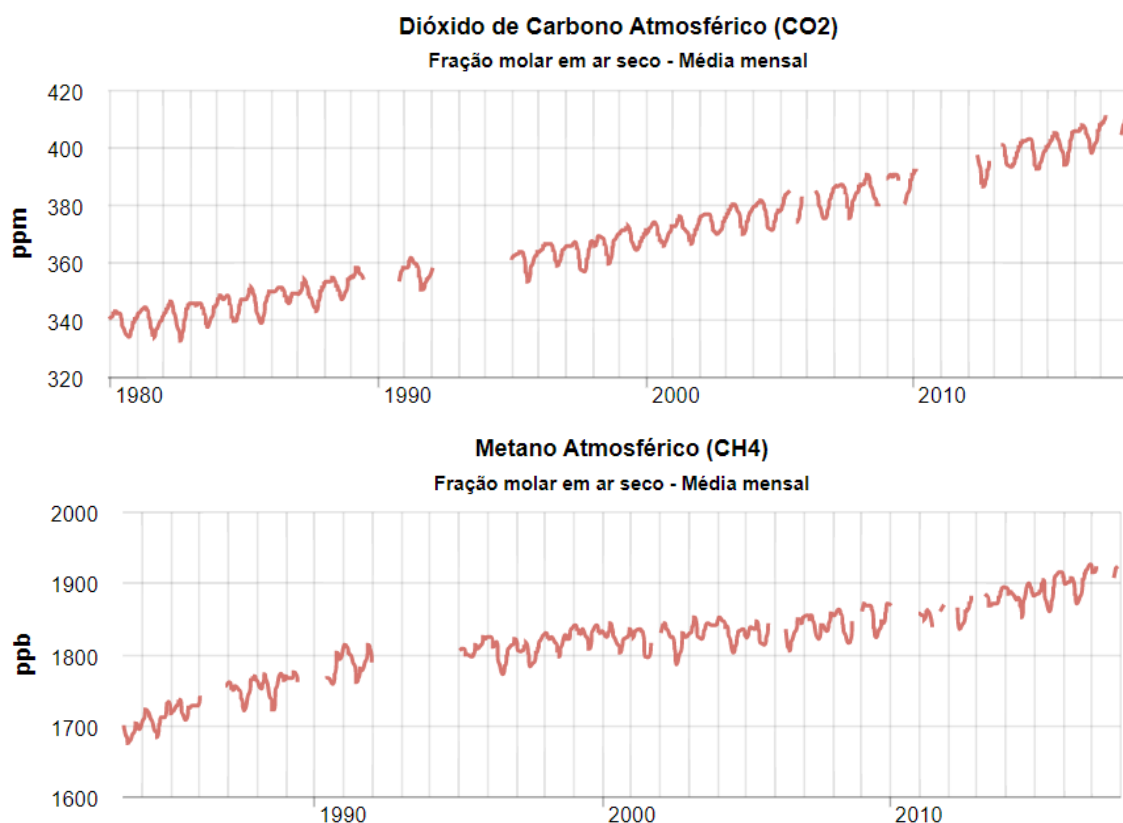


Figura 5. Concentração de gases com efeito de estufa em Portugal - Ilha Terceira. IPMA (2022).

Relativamente à precipitação no distrito de Bragança, é recorrente a observação de elevada quantidade de chuva nos meses de menores temperaturas, bem como uma precipitação quase inexistente nas estações mais quentes. Assim, entre outubro e março verifica-se a ocorrência de 72% da precipitação anual, sendo este período denominado de semestre húmido. Tendo em conta as características do Parque Natural de Montesinho, observa-se que nas zonas de maior altitude (Montesinho e Moimenta) os valores de precipitação média anual são os mais elevados, bem como nas áreas da parte ocidental (Vinhais). Pelo contrário, quanto mais a este (Deilão) menores serão estes valores (Meireles et al., 1999).

O ano de 2020 foi considerado como sendo muito quente e seco (Figura 6), já que apresentou um desvio da temperatura média em relação à normal de +1°C e uma percentagem de precipitação em relação à normal de cerca de 80% (IPMA, 2021). No entanto, os anos de 2021 e 2022, apresentam um cenário totalmente diferente do que seria esperado, em que o clima mais quente proporcionou uma seca meteorológica generalizada (Figura 7), sendo que a região de Montesinho evoluiu de “Seca Moderada” para “Seca Extrema” (IPMA, 2022). As Zonas Orientais apresentam as temperaturas mais elevadas e a pluviosidade mais baixa, enquanto os maciços de Montesinho e

Coroa, e zonas envolventes correspondem às temperaturas e pluviosidade médias mais baixas. Como resultado, a diferença de humidade do solo resulta num período de deficiência de 4 meses (junho a setembro) nas regiões leste e de 3 meses (julho a setembro), nos locais do centro e oeste (Meireles et al., 1999).

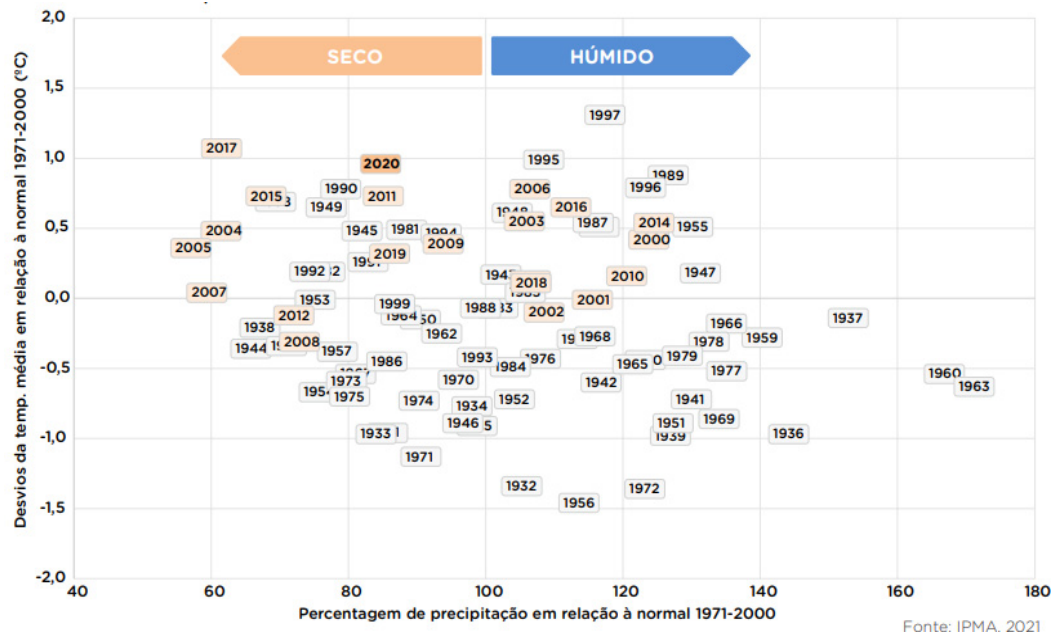


Figura 6. Desvios da temperatura e precipitação média anual em Portugal continental (período 1931-2020). Fonte: IPMA (2021).

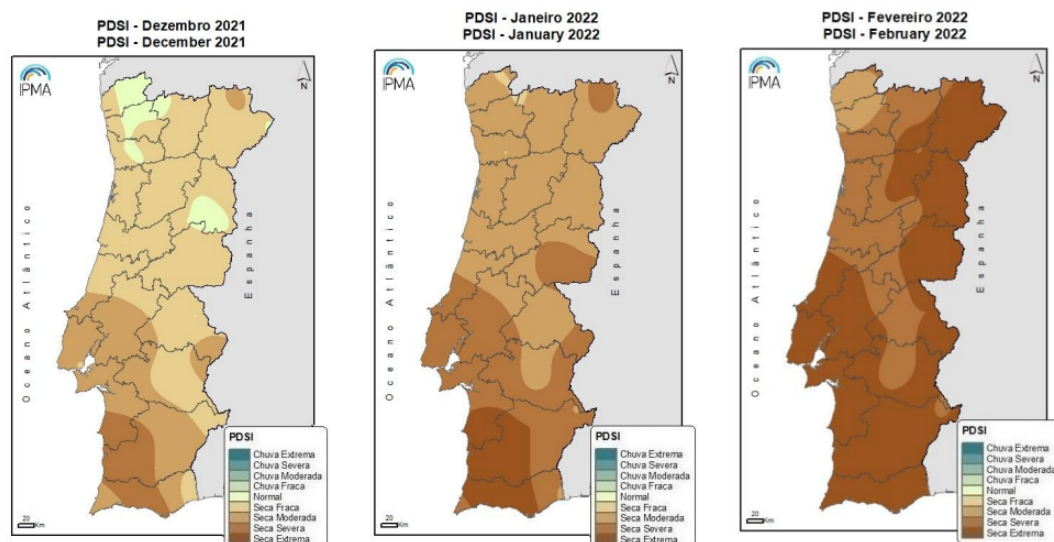


Figura 7. Distribuição espacial do índice de seca meteorológica a 31 de dezembro 2021, a 31 janeiro e a 28 de fevereiro de 2022. Fonte: IPMA (2022).

No Parque Natural de Montesinho, a direção dos ventos predominantes é de Oeste em todos os meses do ano. As maiores velocidades médias mensais do vento são observadas de fevereiro a maio. Os baixos valores observados nos meses de inverno confirmam a presença de condições mais estáveis nesta época do ano do que, por exemplo, no período de verão (Meireles et al., 1999).

Capítulo II

Solos

(página propositadamente em branco)

2. Solos

O conceito “solo” não possui uma definição única, pelo contrário, diferentes áreas da ciência e da engenharia apresentam diferentes definições. O solo carece de uma definição universalmente aceita, devido a inúmeros motivos, mas principalmente à sua multifuncionalidade e versatilidade. Como consequência, o tipo de utilização condiciona a forma como é visto, percebido e analisado, por exemplo, um agricultor e um engenheiro têm visões distintas sobre o que caracterizam como solo (Certini et Ugolini, 2013). No caso da geologia o solo era definido como uma mistura de matéria orgânica com rochas desintegradas (Hartemink, 2016).

A World Reference Base (WRB), em 1998, apresenta uma descrição para o conceito de solo baseada na sua composição, disposição e alterações relacionadas com o fator tempo: o solo é tido como “um corpo natural, contínuo, possuindo dimensões espaciais e temporais”. Contudo, em 2006, a WRB apresentou uma atualização na qual enumera quais os constituintes que são considerados parte do solo. Esta mudança foi de extrema importância, tendo em conta a existência de frequentes problemas de cariz ambiental associados aos solos, levando a uma definição aceita globalmente que permite uma cooperação e compreensão sem fronteiras (WRB-IUSS, 2014). Deste modo, o solo é descrito como sendo qualquer material que se encontre localizado numa profundidade inferior a dois metros (WRB, 2006) e que esteja em contacto com a atmosfera, à exceção de seres vivos, de áreas com gelo contínuo que não são cobertas por outro tipo de materiais e corpos de água que possuem mais de dois metros de profundidade.

No ano de 2011, a Food and Agriculture of the United Nations (FAO) criou um programa de carácter internacional denominado "Global Soil Partnership" (GSP), que visa promover uma gestão sustentável do solo e, também, medidas protetoras para o mesmo. Posteriormente, no ano de 2015, a 68ª Assembleia Geral da ONU declarou esse ano como “Ano Internacional dos Solos”, procurando assim promover a sensibilização e compreensão da importância do solo a nível global. Numa tentativa de fomentar uma maior contribuição por parte da sociedade civil, a União Internacional das Ciências do Solo (IUSS) proclamou, no final do mesmo ano, a Década Internacional dos Solos, compreendida entre o ano de 2015 e 2024 (Dazzi & Lo Papa, 2022).

Os solos são muitas vezes considerados recursos naturais não renováveis, tendo em conta que a sua taxa de formação ao longo do tempo é extremamente baixa, principalmente quando comparada com o tempo médio de uma vida humana (Stockman et al., 2014). Os solos são cruciais à vida na Terra e desempenham um papel central em muitos desafios ambientais presentes na atualidade (Weil & Brady, 2017).

2.1. Classificação dos Solos

Os solos são analisados tendo em conta o seu perfil, no qual se podem identificar camadas distintas, também denominadas como horizontes. Os horizontes apresentam características próprias, sendo que um mesmo solo pode ter componentes muito distintos em cada camada. O posicionamento dos horizontes é normalmente horizontal, podendo por vezes ser subhorizontal, consoante alguma alteração na morfologia local. A delimitação dos horizontes tem como base critérios como: diferenças de cor, diferenças nas propriedades físicas tais como textura, estrutura e elementos presentes e diferenças nas propriedades associadas, como compactidade, plasticidade, friabilidade, viscosidade e dureza. Os horizontes constituintes do solo estão representados na Figura 8 e podem ser sumariamente definidos como (Porta Casanellas et al., 2003):

- Horizonte O – Predominância de matéria orgânica;
- Horizonte A – Escurecido pela interferência da matéria orgânica presente na camada superior;
- Horizonte E – Camada mineral empobrecida pela eluviação;
- Horizonte B – Camada mineral formada no interior do solo;
- Horizonte C – Camada mineral que, em comparação com as restantes, é pouco afetada por processos pedogénicos, à exceção da meteorização e hidromorfismo;
- Horizonte R – Camada mineral de material consolidado, que constitui o substrato rochoso.

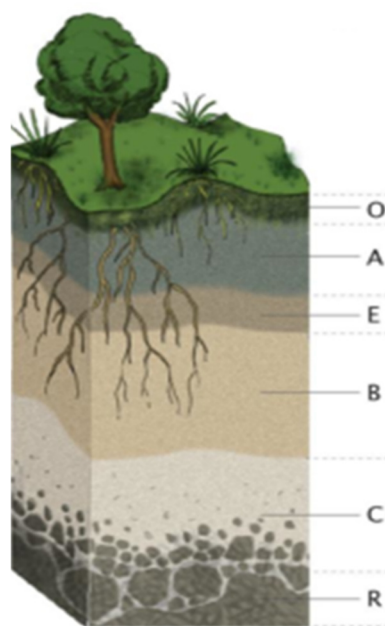


Figura 8. Principais horizontes dos solos (Porta Casanellas et al. 2003).

2.1.1. Solos Naturais

Segundo a World Reference Base (WRB), a classificação de um solo depende diretamente das suas propriedades. Para a classificação são selecionadas características, frequentemente observáveis em campo, que tenham influência na sua formação, enquadradas em parâmetros como: profundidade, propriedades gerais e materiais presentes. O clima envolvente ao solo em estudo é descartado na classificação, sendo apenas considerado como fator interpretativo, que auxilia na compreensão das propriedades presentes (WRB-IUSS, 2014).

A WRB propõe, adicionalmente, a classificação e categorização dos solos em dois níveis distintos. O primeiro nível, no qual é definido em que Reference Soils Group (RSG) o solo se enquadra. Neste nível os solos são classificados tendo em conta características que são consequência do processo pedogénico primário, mas, caso se considere que os materiais presentes têm uma importância maior, são as características desses materiais que se tornam o fator classificativo. No segundo nível, o RSG definido para o solo faz-se acompanhar de qualificadores principais e suplementares, sendo que neste nível o fator classificativo incide sobre as características primárias que foram modificadas por processos secundários, recorrentemente ligados à forma como os solos são utilizados (WRB-IUSS, 2014). Deste modo, foram identificados oito tipos de solo predominantes no território português, pertencentes à categoria RSG, solos de 1º nível, e encontram-se representados de uma forma simplificada na

Figura 9 (Atlas Digital do Ambiente, 2002):

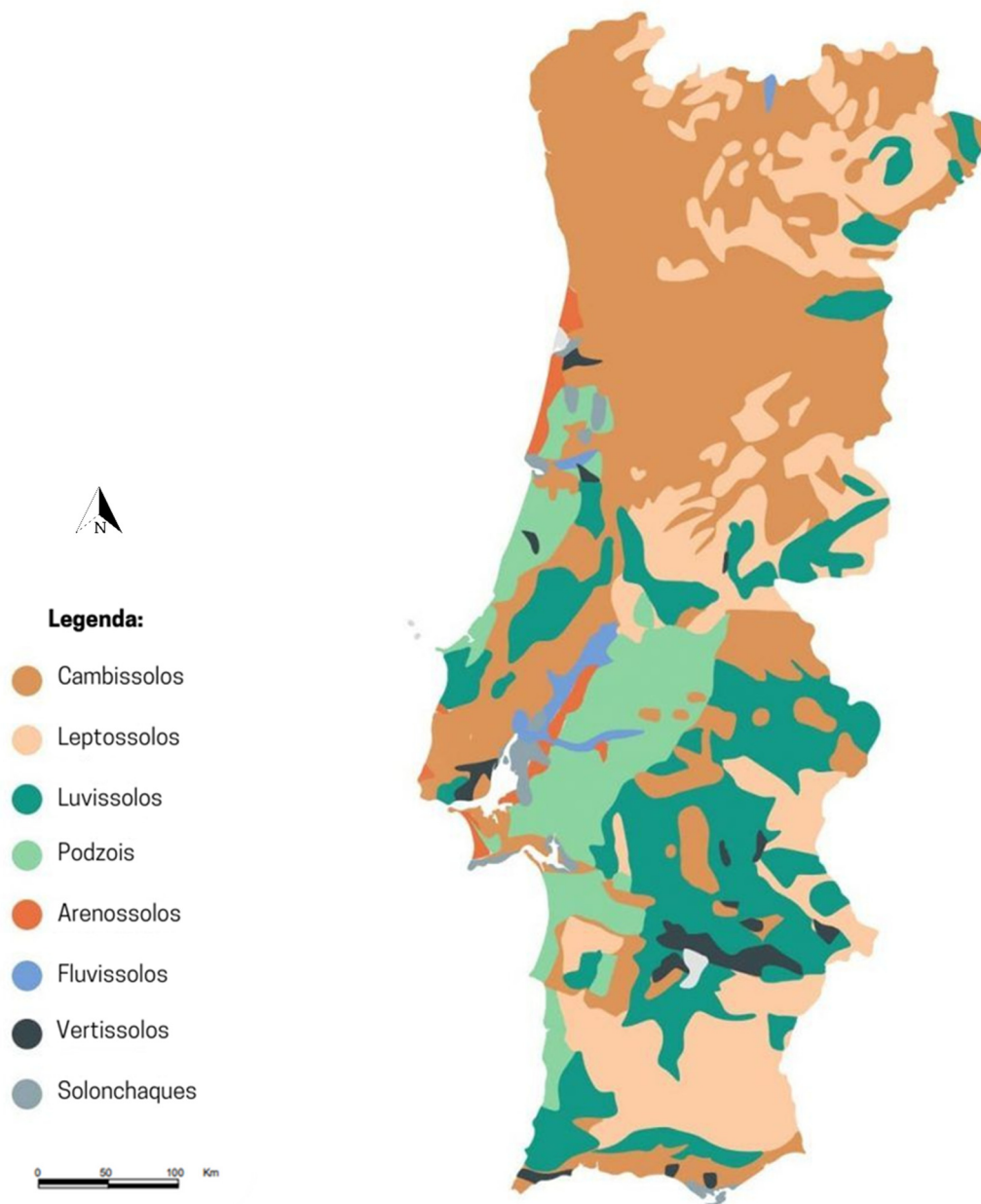


Figura 9. Carta de Solos de Portugal. Fonte: Atlas Digital do Ambiente, segundo a classificação FAO/IUSS (<https://florestas.pt/conhecer/o-estudo-do-solo-a-pedologia-e-as-cartas-de-solo-em-portugal/>).

As definições das classes de solos supracitadas encontram-se inseridas na WRB, criada pela FAO e, genericamente, descrevem-se da seguinte forma:

- **Arenossolos:** solos arenosos, desenvolvidos na presença de quartzo, mas podendo por vezes ser associados a areias calcárias. Podem ter diversas origens, tais como: solos residuais resultantes da alteração profunda de rochas ácidas, depósitos eólicos, ou até sedimentos fluviais, incluindo os pós-depósitos glaciares (FAO, 2014). Possuem uma textura

de areia argilosa ou de areia mais grosseira. Menos de 35% do seu volume total é formado por fragmentos de rocha ou algum outro tipo de fragmentos grosseiros (Fang et al., 2001).

Em Portugal, são predominantes na zona do Vale do Tejo e do Sado, em Colares (perto de Sintra) e nas faixas costeiras entre a Figueira da Foz e Espinho (Atlas Digital do Ambiente, 2002).

- **Cambissolos:** solos em fase precoce de formação, contendo pequenas quantidades de argila, matéria orgânica e compostos de ferro ou alumínio. A rocha sob a qual se desenvolve, normalmente, não apresenta grandes sinais de meteorização. Há, geralmente, uma descoloração acastanhada abaixo do horizonte de superfície, associada ao início do processo de pedogénese (FAO, 2014). Pode surgir entre um horizonte A e um horizonte C que esteja relativamente inalterado. A sua diferenciação entre os seus horizontes é proporcionada pela sua cor, que é distinta do meio circundante (Zech et al., 2008).

Esse é o tipo de solo mais recorrente em Portugal (Ferreira, 2000), sendo a sua presença mais frequente na região do Alto Douro, Beira Alta e em alguns locais da Estremadura e Alto Alentejo (Atlas Digital do Ambiente, 2002).

- **Fluvisolos:** solos pouco desenvolvidos, formados predominantemente sobre sedimentos associados aos rios das planícies aluviais, e às margens dos lagos e mares, com estratificação sedimentar normalmente presente (FAO, 2014). Estes solos são considerados jovens e a sua formação ocorre em ambientes propensos à adição de sedimentos durante os eventos das cheias. Tendo em conta suas características, em Portugal são encontrados próximos à margem de rios como o Tejo e o Mondego (Ferreira, 2000).

Em condições em que a sua textura evolua para argila arenosa ou mais fina, poderá transformar-se num cambissolo, caso o solo não esteja saturado em água. Se houver saturação, as reações redox irão convertê-lo em um gleissolo (Zech et al., 2008).

- **Leptosolos:** solos que apresentam pouca profundidade e que se consolidam sobre rochas duras ou materiais calcários. Podem também incluir solos mais profundos em que predomina o cascalho e/ou materiais de grão grosseiro que não possuam areias de grão fino (FAO 2014). Na sua origem estão os mais variados tipos de rochas duras ou calcárias não consolidadas, como também outros materiais que contenham um teor inferior a 10%

de areias. Por serem um grupo com características muito diversas, podem ser encontrados desde os pólos até ao equador em ambientes propícios a solos pouco desenvolvidos, tais como: encostas erodíveis dos cinturões de montanha e planícies com inundações fluviais recorrentes (Zech et al., 2008). Em Portugal, são comumente encontrados em locais que apresentem um baixo teor de precipitação e temperaturas médias elevadas e ainda associados a xistos, como é o caso de Trás-os-Montes, Beira Interior e Alentejo (Ferreira, 2000).

A utilidade destes solos é limitada, visto que apresentam uma baixa capacidade de retenção de água e conseqüentemente, uma drenagem excessiva que leva a seca. No entanto, as estações chuvosas melhoram o seu potencial de utilização para cenários de pastagem e silvicultura. Nas regiões temperadas, estão geralmente associados a florestas de pinheiros (Zech et al., 2008).

- **Luvisolos:** solos em que houve uma migração da argila presente na parte acinzentada superior do perfil para ser depositada num horizonte B, geralmente com tonalidade mais acastanhada. Têm como principais características, uma estrutura bastante porosa e granular nos horizontes de superfície, sendo que o horizonte argiloso é estável, permitindo uma maior capacidade de armazenamento da água (FAO, 2014).

Normalmente, formam-se a partir de uma grande variedade de materiais não consolidados de origem glacial, aluvionar e provenientes de depósitos coluvionares, sendo estes muitas vezes ricos em calcite e/ou dolomite. É comum serem encontrados em terrenos planos ou com inclinações suaves em regiões temperadas frias e em zonas que apresentem um contraste entre o clima seco e estações húmidas, como é o caso da região mediterrânica (Zech et al., 2008). Em Portugal estão maioritariamente associados a rochas graníticas e estão presentes no Alentejo e na secção entre Beja e Portalegre (Ferreira, 2000).

- **Podzóis:** solos que se formam tanto em ambientes tropicais como em ambientes mais frios. Na primeira hipótese, o processo ocorre sobre materiais de origem arenosa, quase sempre quartzíticos e, no segundo caso, a sua origem é bastante variável (FAO, 2014). Ou seja, geralmente são formados por materiais siliciosos não consolidados, tais como as areias e arenitos com grande concentração de quartzo e/ou por detritos sedimentares que derivam de rochas granitóides e gnaisses, provenientes de processos glaciários e pós-glaciários. Nas situações em que deriva de materiais granitóides, a presença de feldspato alcalino é

bastante comum. Quando há uma elevada precipitação, a sua formação pode ocorrer em quase todo o tipo de materiais, como é o caso das florestas tropicais com clima temperado. Nos trópicos, a sua formação ocorre a partir de materiais com baixo teor em ferro (Zech et al., 2008).

Os podzóis possuem um horizonte superior com uma cor acinzentada, característica que é consequência do processo de lixiviação do ferro e do alumínio, causado por ácidos orgânicos, que levam a matéria a ser depositada no horizonte imediatamente abaixo, transformando o mesmo num horizonte bem mais escuro (FAO, 2014). Apresentam grandes limitações para a agricultura arvenses, visto que a sua fertilidade é baixa em virtude do elevado grau de lixiviação (Chesworth, 2008).

Em Portugal, pertencem às formações detríticas arenosas que se situam na bacia plana do Baixo Tejo e Sado (Ferreira, 2000).

- **Solonchaks:** solos com alta concentração de sais solúveis em determinadas alturas do ano. A sua formação tem origem em quase todo material não consolidado. Esse tipo de solo, tem na sua génese a precipitação de alguns sais, nomeadamente sais de cálcio, magnésio, sódio, que ocorre devido à evaporação da água do solo. Este processo ocorre quando a água infiltrada devido a reduzida precipitação local é inferior à quantidade de água perdida na evapotranspiração. Os solonchaks estão em grande parte confinados em zonas climáticas áridas e semi-áridas, embora possam também ocorrer nas regiões costeiras (FAO, 2014). No território português a sua presença ocorre em locais muito específicos como nas proximidades do estuário do Tejo e do Sado, na foz do rio Mondego, na “ria de Aveiro” e junto a Vila Real de Santo António (Ferreira, 2000).

A principal limitação da utilização destes solos está associada à sua elevada salinidade, normalmente prejudicial ao crescimento das plantas uma vez que pode interferir na absorção de água pelas raízes, na disponibilidade dos nutrientes e até ser tóxica para as mesmas, interferindo no seu metabolismo (Zech et al., 2008).

- **Vertissolos:** solos argilosos com uma elevada proporção de argilas expansivas. À medida que secam formam fissuras muito profundas e largas, partindo da superfície. O solo presente na superfície, cai nas fendas formadas, sendo depois empurrado novamente para cima, num processo de agitação que provoca a mistura dos materiais de superfície e de subsuperfície (FAO, 2014). Quando húmidos, possuem um comportamento plástico e

aparência viscosa (Ferreira, 2000). A sua origem tem início nos sedimentos que contêm uma elevada presença de argila esmectita, ou de derivados da mesma, ou ainda derivados de rocha com características semelhantes às da argila esmectita (Chesworth, 2006).

Os vertissolos são comumente encontrados nos patamares mais baixos da paisagem, tais como fundos secos de lagos, bacias hidrográficas, terraços baixos de rios e outras terras baixas que são periodicamente molhadas no seu estado natural (Zech et al., 2008). Em Portugal aparecem associados ao complexo ofiolítico de Beja e ao complexo vulcânico de Lisboa (Ferreira, 2000).

A zona em estudo nesta dissertação é composta maioritariamente por cambissolos, segundo a Carta de Solos de Portugal (Ferreira, 2000).

2.1.2. Tecnosolos

O termo Tecnosolo define um solo cuja formação e propriedades são influenciadas pela atividade humana, e inclui os solos derivados de resíduos antropogénicos. Os Tecnosolos contêm uma quantidade mínima de 20% de "artefactos", maioritariamente materiais criados pelo homem. Geralmente a sua composição contém uma elevada quantidade de resíduos, tais como resíduos de minas, aterros sanitários, cinzas, lamas, entre outros, apresentando distintas propriedades tendo em conta o local onde se formam. Desta forma, os Tecnosolos são fortemente afetados pela natureza dos materiais ou atividade humana que lhes deu origem (IUSS Working Group WRB, 2015). Dado o vasto leque de possíveis constituintes deste tipo de solos e respetivas propriedades, os Tecnosolos podem ser produzidos "à medida" e utilizados para diversos fins através da seleção de matérias-primas que lhes confirmam as características desejadas. A sua constituição e propriedades vão depender do tipo de utilização pretendida e do local de aplicação. Assim, o Tecnosolo "à medida" é considerado um solo artificial que combina diferentes elementos na sua composição, que promove a reutilização de resíduos e que tem como finalidade proporcionar condições adequadas às áreas onde será aplicado, visando um efeito progressivo na recuperação do solo natural (Lehmann, 2006).

De entre as mais variadas aplicações destacam-se a sua utilidade na recuperação das propriedades dos solos em zonas degradadas e/ou contaminadas (Novo et al., 2013; Santos et al., 2014, 2016; Rodríguez-Vila et al., 2016).

No entanto, o processo de restauro com recurso a Tecnosolos "à medida" pode envolver processos dispendiosos e consiste, frequentemente, na remoção e substituição do material contaminado.

Pode também usar-se como camada sobrejacente ao solo contaminado, formando uma camada superficial livre de contaminantes, o que permitirá a regeneração do ecossistema local (Chesworth, 2006).

2.2. Propriedades dos solos

Segundo Reinert & Reichert (2006), um solo é uma combinação de diferentes partículas sólidas, que podem ter natureza mineral ou orgânica, juntamente com ar e/ou água. Considera-se o solo um sistema trifásico, visto que podem coexistir elementos em fase líquida, fase sólida e fase gasosa. Este sistema trifásico é caracterizado por algumas grandezas físicas e propriedades químicas essenciais, das quais se destacam, pelo interesse no presente trabalho, as seguintes: porosidade, estrutura, textura, teor em água, pH, condutividade elétrica, conteúdo em matéria orgânica, teor em carbono orgânicos e teor em azoto.

2.2.1. Porosidade

A porosidade designa o volume do solo que não se encontra ocupado por sólidos, nesse volume podem encontrar-se água e/ou ar. Assim, a razão entre o volume de vazios (V_v) e o volume total de solo (V_t) (Equação 1), expressa em percentagem, corresponde ao valor da porosidade (n) no solo (Fernandes, 2017).

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Equação 1}$$

A porosidade total distribui-se numa vasta gama de tamanhos e formas de poros, que vão desde os vazios microscópicos entre plaquetas de argila até grandes dimensões como tocas resultantes da atividade da fauna presente, tais como térmitas (Chesworth, 2008).

A classificação dos poros tendo em conta suas dimensões foi proposta por Brewer em 1964, e a mesma continua a ser utilizada na atualidade, com uma pequena alteração feita por Bouma em 1981: a palavra “vazio” foi substituída por “poro”. Essa classificação visa evitar o uso ambíguo dos termos, bem como eliminar terminologias redundantes. No entanto, não permite uma correspondência entre o tamanho dos poros e a sua função. O quadro-síntese da classificação encontra-se representado na Tabela 1 (Chesworth, 2008).

Tabela 1. Esquema de classificação do tamanho dos poros desenvolvido por Brewer, 1964

Classe	Subclasse	Tamanho (μm)
Macroporos	Grossoiro	> 5 000
	Médio	2 000 – 5 000
	Fino	1 000 – 2 000
	Muito fino	75 – 1 000
Mesoporos		30 – 75
Microporos		5 – 30
Ultramicroporos		0.1 – 5
Criptoporos		<0.1

A existência, o número, o tamanho e a estabilidade dos agregados do solo determinam uma série de propriedades e são responsáveis pela realização da maioria de suas funções. A existência de poros entre os agregados controla principalmente a infiltração da água da chuva no solo (Patra et al., 2019), afetando assim a sua resistência à erosão hídrica (Canton et al., 2009). Deste modo, a porosidade dos solos tem um papel importante nos processos que envolvem o transporte de fluidos e sua interação com o exterior, bem como sua capacidade de infiltração e retenção de água. Os poros permitem, então, a ocorrência das trocas químicas entre o solo e o meio em que se insere (Reinert & Reichert, 2006).

2.2.2. Estrutura

A estrutura é uma das características físicas do solo e se expressa numa combinação entre a forma, dimensão e arranjo espacial das partículas que o compõem, bem como poros associados. Esta combinação origina os agregados ou pedos, que consistem em unidades estruturais diferenciadas pela sua superfície de fraqueza (Santos, 2018).

A estabilidade da estrutura do solo é um dos indicadores mais importantes de degradação do mesmo. É definida como sendo a sua resistência contra influências destrutivas, como é o caso das chuvas, ventos e escoamento (Saygin et al., 2012). Os poros presentes nos agregados são o fator determinante para o volume de água retida a longo prazo no solo (Brady & Weil, 2008), tendo

consequências diretas nas suas funções hidrológicas, natureza e condições de vida presentes (Coleman et al., 2018).

2.2.3. Textura

A textura de um solo é um dos seus principais indicadores de qualidade e de produtividade (Wang et al., 2005), devido à sua influência na dinâmica de adesão e coesão entre os elementos do solo, o que afeta diretamente a sua capacidade de resistência à tração, bem como a sua interação com a água, quando presente (Bünemann et al., 2018). Além destes processos, a textura intervém em alguns ciclos biogeoquímicos, como a transferência de nutrientes e a troca de iões (Centeno et al., 2017).

A definição da textura de um solo tem como base a proporção relativa entre as classes de tamanho das partículas presentes no mesmo. A classificação das partículas com base na sua dimensão equivalente encontra-se sintetizada na Tabela 2 (Reinert & Reichert, 2006).

Tabela 2. Classes de textura consoante o tamanho das partículas, USDA

Classe		Tamanho (mm)
Areia	Grossa	0,2 – 2
	Fina	0,05 – 0,2
Silte		0,002 – 0,05
Argila		<0,002

A classificação da textura dos solos teve origem na necessidade de, no passado, se conseguir quantificar a sua produtividade para posteriormente lhe ser atribuída uma função concordante com as suas limitações. Foram, assim, desenvolvidas classificações texturais baseadas na proporção relativa das três frações granulométricas, representadas na Figura 10. Através das quantidades de areia, argila e silte presentes no solo, o sistema de classificação triangular permite obter a textura do solo analisado. A textura arenosa é caracterizada por uma alta suscetibilidade à erosão e contaminação, promovendo deficiência hídrica e sendo também propícia a maior teor de contaminação das águas subterrâneas, quando existente (Centeno et al., 2017).

2.2.5. pH

O índice de pH de um solo é um parâmetro ecológico extremamente importante que indica o grau de acidez ou alcalinidade do solo determinado pela concentração de íons de hidrogênio (H^+) presentes em solução (Veloso et al., 1992; Hatten & Liles, 2019).

A determinação do pH do solo fornece informações úteis como a disponibilidade de nutrientes essenciais, a toxicidade dos elementos presentes e a atividade dos microrganismos. É comum o pH do solo variar dentro do intervalo 5,5 a 8, sendo que valores fora desta gama são muitas vezes considerados anomalias, que podem originar efeitos negativos como a degradação da estrutura do solo, alteração dos seus níveis de micronutrientes e cessação da atividade dos microrganismos do solo (Patil et al., 2019).

Os solos ácidos podem ser formados pela utilização abusiva de fertilizantes formadores de ácidos, que podem levar a problemas de toxicidade, através do aumento das concentrações de alumínio e manganês. Como consequência, pode ainda haver uma maior lixiviação de elementos básicos, como os macronutrientes N, P, K e S, tal como uma redução da atividade dos microrganismos devido à decomposição do material orgânico (Schirrmann et al., 2011). Por outro lado, um solo de caráter alcalino está associado a um baixo teor de fósforo e de alguns micronutrientes (Patil et al., 2019).

2.2.6. Matéria Orgânica

A matéria orgânica é um constituinte básico do solo. Inclui biomassa de origem microbiana, bem como matérias vegetais em diferentes fases de decomposição (Birkeland & Richter 1973; Fernandes et al., 2009). A decomposição da matéria orgânica é um dos fenômenos naturais mais importantes, uma vez que após este processo, os nutrientes integrados em diferentes organismos são novamente assimilados (Rheinheimer et al., 2003).

Além de ser um repositório de nutrientes que podem ser libertados pela mineralização de compostos orgânicos, a matéria orgânica também afeta as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos dado que possui uma alta capacidade tampão, o que evita grandes variações do pH no solo. É ainda responsável pela retenção de água e pela capacidade de troca catiônica, promovendo a agregação do solo, através da formação de macroporos, que facilitam a circulação de ar e água e reduzem a perda de solo e nutrientes por erosão (Fernandes et al., 2009; Hatten & Liles, 2019).

2.2.7. *Teor em Azoto*

No solo, o azoto pode existir em formas orgânicas e minerais, sendo que quando se encontra nas formas nítrica e amoniacal, é utilizado pelas plantas nos seus processos de fotossíntese. Considerando que o azoto é um macronutriente primário no solo, seja por efeitos indireto ou direto, possui um grau de solubilidade elevado e a sua quantidade no solo está diretamente ligada com a sua fertilidade. O azoto é encontrado em maiores quantidades em solos que apresentem valores de pH próximos da neutralidade, normalmente entre 6,0 – 6,5 (Rodrigues et al., 2000).

2.2.8. *Teor em Carbono Orgânico Total*

O teor em carbono orgânico total (COT) de um solo é diretamente proporcional à quantidade de matéria orgânica presente no mesmo (Alexander et al., 2018). Práticas conservacionistas como o plantio direto e rotação de cultura têm influência positiva no aumento e recuperação da matéria orgânica presente no solo e, como tal, promovem a acumulação de carbono orgânico. Essas práticas permitem que o solo mantenha a maioria das suas características físicas, químicas e biológicas, pois promovem um revolvimento pouco intenso, protegendo a cobertura da superfície do solo (Bruce et al., 1999; Swift, 2001).

O COT presente no solo é um dos elementos responsáveis pela estabilização dos agregados, especialmente dos agregados de maior dimensão, contribuindo assim para uma melhor estruturação do solo e interferindo na sua porosidade (Bayer et al., 2000).

2.2.9. *Teor em Água*

O teor em água do solo é um indicador da quantidade de água presente no solo, determinando-se pela relação entre a massa de água contida nos espaços porosos do solo e a massa sólida das suas partículas. Esta característica está associada a um dos elementos principais do ciclo hidrológico, pois desempenha uma função fundamental na elaboração dos balanços hídricos, já que o seu estudo auxilia na determinação das taxas de infiltração, percolação e escoamento superficial (Cerdà, 1997; Hossain et al., 2021). É influenciado por vários fatores que têm consequências diretas no volume de água no solo, dos quais podem destacar-se a precipitação, a temperatura, a textura do solo e a densidade do coberto vegetal (Gómez-Plaza et al., 2000; Illston et al., 2004).

Capítulo III
Fogos Florestais

(página propositadamente em branco)

3. Fogos Florestais

“De entre as causas de degradação da terra e desertificação na Região Mediterrânea o fogo surge como o fator responsável pela destruição do coberto vegetal e como tal agente potencial direto de degradação” (Coelho, 2001).

A temática dos incêndios rurais e florestais tem sido cada vez mais abordada, principalmente nos últimos anos, visto que, é notório um aumento muito significativo do seu número, bem como da sua severidade e intensidade, trazendo consequências devastadoras para as pessoas, o ambiente e a economia. É espectável um pico nas ocorrências de fogos florestais durante os períodos de temperatura mais elevada, maioritariamente no verão, sendo um efeito do clima mediterrâneo, que abrange alguns países europeus como Portugal, que se caracteriza pelos invernos amenos e chuvosos e verões quentes e secos. Mesmo antes da ocupação humana, já se ocorria um elevado número de fogos, com origem natural, causados por “trovoadas secas” que tinham poder de ignição (Silva et al., 2002).

O clima é um fator determinante para a ocorrência dos fogos, uma vez que durante as épocas de precipitação mais abundante e temperatura amena há um desenvolvimento superior de biomassa, enquanto nos períodos de seca, o oposto ocorre, provocando uma diminuição das porções vegetais e humidade presente (Fernandes et al., 2009).

Os fatores condicionantes do comportamento do fogo podem ser agrupados em três classes distintas: combustível, topografia e meteorologia (Viegas, 2006). No entanto, além destes, é possível identificar outras fontes que combinadas resultam na ocorrência de fogos, tais como: ação humana, ventos e tipo de vegetação presente (Leite, 2011).

3.1. Fogos Florestais na Europa

Analisando as informações cedidas pela Comissão Europeia, o aumento significativo dos incêndios florestais na última década nos países mediterrânicos tornou-se um importante problema ambiental, embora a área total afetada pelos incêndios tenha diminuído desde o ano 2000 até a atualidade (San-Miguel-Ayanz et al., 2022). Por vezes, áreas que já foram queimadas, podem voltar a incendiar no futuro, após já terem recuperado suas condições de pré-fogo. Este ciclo promove uma degradação progressiva dos ecossistemas onde se inserem, tendo como resultado uma alteração nas condições naturais das estruturas e hidrogeologia da região, o que leva a uma diminuição da biomassa presente, bem como mudança das espécies vegetais dominantes (Inbar et al., 1998). Estima-se que seja necessário um período entre 5 e 10 anos após o incêndio para que os

solos retomem suas características iniciais (Moody e Martin, 2001) e, espera-se que os grandes incêndios ocorram nas estações mais quentes, sendo seguidos pelas chuvas fortes de Outono, que têm como consequência um elevado potencial de escoamento superficial e erosão do local. A combinação destes dois fatores revela-se muito devastadora dos solos e da sua qualidade (Díaz-Fierros et al., 1994; Andreu et al., 1996).

Portugal foi o segundo país da União Europeia (UE) mais afetado por incêndios florestais em 2020, com 67170 hectares queimados, de acordo com o 21º relatório anual sobre incêndios florestais na Europa, Médio Oriente e Norte de África, publicado pelo Centro Comum de Investigação, no qual há registo da ocorrência de cerca de 9619 incêndios florestais no país. A Roménia foi o país mais afetado, seguido por Portugal, Espanha e Itália, ardendo cerca de 340000 hectares em toda a UE, o equivalente a uma área 30% maior que o Luxemburgo. Estima-se que cerca de 25% da área ardida na Europa em 2020 está localizada em regiões pertencentes a sítios Natura 2000, um reservatório de biodiversidade na União Europeia (San-Miguel-Ayanz et al., 2022).

3.2. Fogos Florestais em Portugal

Sendo a legislação mais antiga que se conhece no país para regulamentação de fogos florestais datada de há mais de quinhentos anos, é observável que os incêndios florestais são um problema que acompanhou o desenvolvimento e evolução do território. Apesar disso, apenas em 1978 se iniciou um levantamento sistemático do número de incêndios ocorridos e da área florestal ardida. Enquanto a vegetação e a meteorologia são, em grande parte, determinadas pelo clima, tipo de solo e características topográficas de uma área, em muitos casos a ignição de incêndios é largamente dependente da atividade humana (Ventura & Vasconcelos, 2006).

Os motivos mais plausíveis para o aumento dos fogos ao longo das décadas, são a combinação do abandono do meio rural e das práticas agrícolas, bem como incêndios intencionais, ateados por motivações diversas (Silva et al., 2002). A maioria dos fogos florestais ocorre por negligência, sendo a segunda maior causa os “fogos criminosos”, ou seja, ateados de forma intencional (Silva et al., 2002).

O 21º relatório anual sobre os incêndios florestais na Europa, Médio Oriente e Norte de África, divulgado pelo Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia, mostra que a época de incêndios de 2020 em Portugal, resultou em cerca do dobro de área ardida registada quando comparada com os dois anos anteriores. Os incêndios foram mapeados em todos os meses do ano, mas quase 90% dos danos ocorreram nos meses de Verão (julho a setembro). O maior incêndio ocorrido em 2020 em Portugal (e o segundo maior mapeado num país europeu no mesmo ano)

ocorreu na Beira Baixa, em setembro, e queimou mais de 15 000 ha. Tendo-se registado outros vinte incêndios com mais de 500 ha. As áreas ardidas e respetivas localizações em Portugal podem ser vistas na Figura 11. Verifica-se um padrão na distribuição dos incêndios pelos territórios nacionais; assim, de um modo geral, regiões mais populosas estão relacionadas com um maior número de ocorrências. O maior número ocorreu na zona Norte, principalmente nas zonas interiores. Em alguns distritos esse número tem decrescido, devido à floresta dominante e às formas de ocupação do solo (San-Miguel-Ayanz et al., 2022).



Figura 11. Áreas ardidas em Portugal em 2020. Fonte: ICNF, 2020.

3.3. Fogos Prescritos

O fogo prescrito ou controlado é a aplicação do fogo a locais específicos de uma determinada região, de forma a atingir objetivos predeterminados normalmente associados à gestão florestal (Merrill & Alexander, 1987). Na maioria dos casos, os fogos prescritos são usados como ferramenta para a preparação do local após as operações de extração de madeira (Hawkes et al., 1990), mas podem ter outras aplicações de interesse, como por exemplo: situações de controlo de pragas e doenças associadas, alteração de paisagem para melhoria de seus acessos, redução de materiais que possam desempenhar a função de combustíveis, gestão de espécies de vegetação presentes, entre outros (Waldrop et al., 2012).

Uma das principais questões associadas ao uso de fogos controlados em povoamentos florestais é o seu efeito nos solos, o grau de aquecimento do solo durante a combustão é altamente variável e depende do tipo de combustível (ervas, arbustos, árvores), da intensidade do fogo, da natureza da cobertura (espessura, teor de humidade) e da natureza do solo (matéria orgânica, teor de humidade, textura). Algumas propriedades do solo, como a estrutura, a capacidade de troca catiónica, a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana, são altamente dependentes da matéria orgânica, que começa a sofrer alterações químicas quando aquecida a 200 °C e se esgota completamente aos 450 °C. Grandes quantidades de nutrientes como o N, S e P, são volatilizados durante o fogo, enquanto que catiões de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ não volatilizam a estas temperaturas, embora pequenas quantidades possam ser transferidas do local juntamente com a nuvem de fumo produzida (Debano, 1989).

3.4. Legislação Nacional em vigor

Visando diminuir a ocorrência de fogos e proteger as áreas verdes do país, no dia 13 de outubro de 2021 foi publicado o Decreto-lei 82/2021, que propõe uma interajuda entre “todas as entidades participantes na prevenção estrutural, nos sistemas de autoproteção de pessoas e infraestruturas, nos mecanismos de apoio à decisão, no dispositivo de combate aos incêndios rurais e na recuperação de áreas ardidas”. Todas as ações tomadas passaram para a alçada do Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais, o SGIFR, que nada mais é do que um “conjunto de estruturas, normas e processos de articulação institucional na gestão integrada do fogo rural, de organização e de intervenção, relativas ao planeamento, preparação, prevenção, pré-supressão, supressão e socorro e pós-evento, a levar a cabo pelas entidades públicas com competências na gestão integrada de fogos rurais e por entidades privadas com intervenção em solo rústico ou solo urbano” (Diário da República n.º 199/2021, Série I de 2021-10-13).

O SGIFR reúne as mais diversas entidades, consoante a necessidade do caso, como: Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais, I. P. (AGIF, I. P.); Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, I. P. (ICNF, I. P.); Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC); Guarda Nacional Republicana (GNR); Polícia de Segurança Pública (PSP); Polícia Judiciária (PJ); Forças Armadas; Direção-Geral do Território (DGT); Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I. P. (IPMA, I. P.); Direções regionais de Agricultura e Pescas (DRAP); Direção-Geral de Alimentação e Veterinária (DGAV); Comissões de coordenação e desenvolvimento regional (CCDR); autarquias locais; corpos de bombeiros; organizações de produtores florestais e agrícolas e, ainda, gestores de infraestruturas de interesse público, os proprietários ou arrendatários florestais e agrícolas e os proprietários de edifícios.

As funções do SGIFR são as mais diversas, mas de acordo com o Ponto 2 do Artigo 4º do mesmo Decreto (Diário da República n.º 199/2021, Série I de 2021-10-13), tem-se que:

“2 - O SGIFR compreende os seguintes eixos de intervenção:

a) Proteção contra incêndios rurais, orientada para a segurança e salvaguarda das pessoas, animais e bens em áreas edificadas e nas demais áreas, instalações, estabelecimentos e infraestruturas abrangidos pela rede secundária, nos termos do presente decreto-lei, promovendo a mudança de comportamentos, adoção de medidas de autoproteção e maior resistência do edificado, no sentido de tornar estas áreas menos suscetíveis ao risco de incêndio rural e menos geradoras de ignições;

b) Gestão do fogo rural, orientada para a defesa e fomento do valor dos territórios rurais, considerando o seu papel de proteção ao reduzir as condições para ocorrência e progressão de incêndios rurais.”

3.5. Efeitos do Fogo nas Propriedades do Solo

O fogo atua como um poderoso regulador ambiental com efeitos a longo prazo nos ciclos de nutrientes do ecossistema, bem como na composição de espécies, crescimento de plantas, biota, lixiviação e erosão do solo (Wan et al., 2001). O carbono orgânico, o azoto e o enxofre têm temperaturas de volatilização baixas (200-300 °C) e conseqüentemente, ocorrem perdas significativa de nutrientes do solo. Já os cátions metálicos (cálcio, magnésio, potássio e sódio) volatilizam a temperaturas mais altas (740-1240 °C) e, como tal, permanecem no local reduzidos a cinzas, podendo ser levadas por lixiviação, erosão eólica e/ou erosão hídrica (Giovannini et al., 1987; Diaz-Fierros et al., 1990; Josa et al., 1994).

Em geral, a hidrofobicidade e a estabilidade dos agregados são os parâmetros físicos mais importantes dos solos que podem ser alterados pelo fogo, estas alterações afetam a porosidade e a hidrologia do solo, favorecendo o escoamento e a incidência de processos de erosão hídrica (Giovannini et al., 1987; Diaz-Fierros et al., 1990; Josa et al., 1994).

A estabilidade do agregado depende diretamente da coesão interna entre as partículas de argila que o constituem. A coesão é mediada por compostos ligantes, como as substâncias húmicas, que formam fortes complexos com ferro, alumínio e magnésio (Nwadiaro e Mbagwu, 1991). A ligação entre as partículas de argila e os ligantes é profundamente afetada pela temperatura do fogo, promovendo mudanças drásticas na estrutura do solo. Estas mudanças afetam, ainda, a disponibilidade de nutrientes a longo prazo através da perda de matéria orgânica (MO) e cátions associados ao solo da floresta queimada (Goetz et al., 1976).

O aumento gradual e frequente de incêndios, bem como a sua recorrência em áreas previamente afetadas, acelera os processos de degradação do solo aumentando o impacto da erosão hídrica. Campo et al. (2006) comprovaram este fenómeno com os dados obtidos num estudo realizado numa região espanhola, em parcelas queimadas nos verões entre 1995 e 2003. A sua pesquisa demonstra que nos cinco meses após os incêndios prescritos, o solo foi altamente suscetível à erosão hídrica, especialmente durante as chuvas, principalmente nos períodos de chuva torrencial, que é uma característica típica da região do Mediterrâneo.

O fogo promove alterações diretas tanto nas propriedades físicas como químicas dos solos onde atua. Alguns dos efeitos físicos diretos do fogo nos ecossistemas da floresta incluem variações na temperatura do solo (MacAdam et al., 1989) e diminuição da infiltração de água no mesmo (DeBano et al., 1998; Robichaud, 2000). Os efeitos mais relevantes do fogo no solo são bastante visíveis quando se analisa o teor em matéria orgânica, o pH, processos biológicos, estabilidade da estrutura, porosidade e ainda, alterações nos teores de nutrientes totais presentes no solo (Cuesta & Giraldo, 2013).

3.5.1. Porosidade

Sabendo que o espaço ou vazio criado pelos poros é responsável pela movimentação de água e ar no interior do solo, é importante que haja um equilíbrio entre as classes de poros presentes. Isto deve-se ao facto de a heterogeneidade do tamanho dos poros ser responsável por uma rápida transferência de água e ar através dos macroporos e pela retenção de água com auxílio dos microporos (Beyers et al., 2008). Assim, as zonas atingidas pelo fogo têm tendência a sofrer uma alteração abrupta na sua estrutura, principalmente sob os macroporos, o que leva a um aumento

do potencial de escoamento superficial e consequente erosão hídrica. Outra possível consequência é a deposição de cinzas nos poros existentes. As alterações citadas influenciam diretamente outras propriedades do solo, tais como a massa volúmica e a permeabilidade (Cuesta & Giraldo, 2013).

3.5.2. Estrutura

De um modo geral, o fogo apresenta consequências negativas nos agregados inseridos no solo, sendo que a sua estabilidade depende bastante da quantidade de argila e de carbono orgânico presente (Thomaz, 2021).

O fogo desestabiliza a estrutura do solo, podendo enfraquecer os seus agregados, que posteriormente são destruídos pelo impacto da chuva. Isto ocorre sempre que o fogo destrói parte da matéria orgânica, eliminando temporariamente a vegetação. Quando a estrutura do solo é destruída, a sua capacidade de absorção de água torna-se menor, com o consequente aumento do escoamento superficial, promovendo a ocorrência de processos erosivos (Martínez et al., 1991; Thomaz, 2021). Por vezes, o inverso ocorre e o fogo promove a estabilidade dos agregados, levando a uma maior coesão interpartículas e aumento da presença de agregados maiores. Isto deve-se à redução da porosidade e consequentemente à diminuição do teor de argila, aumento proporcional do teor de areia e da densidade das partículas (Mataix-Solera et al., 2011). Essas alterações podem influenciar de uma forma prejudicial as funções e dinâmica dos agregados na estrutura do solo (Thomaz, 2021).

3.5.3. Textura

De um modo geral, os componentes texturais do solo não são afetados pelo fogo, a menos que sejam sujeitos a temperaturas muito elevadas. Dos componentes presentes, o mais sensível à variação de temperatura é a argila, no entanto serão necessárias temperaturas mínimas de 400 °C para haver uma pequena alteração e temperaturas entre 700 e 800 °C para sua total destruição. No caso da areia e do silte, as temperaturas mínimas teriam de ser superiores a 1414 °C, o que se afigura pouco provável no decorrer de um incêndio (Beyers et al., 2008).

3.5.4. Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica (CE) é a medida de quantificação mais comum da salinidade do solo e indica a capacidade de uma solução aquosa de transportar uma corrente elétrica. Muitas vezes,

após um incêndio, há um aumento da CE do solo o que tem impacto negativo nas plantas. No entanto, após um curto período, os valores associados a este parâmetro tendem a diminuir de forma significativa, e as áreas queimadas podem ter uma CE menor do que as áreas que não foram atingidas pelo fogo (Iglesias et al., 1997; Alauzis et al., 2004).

3.5.5. pH

O pH do solo é uma das propriedades químicas que são afetadas após um incêndio. Há uma ligação direta entre o aumento do valor de pH e a presença de cinzas provenientes do fogo no solo, visto que estas contêm uma grande quantidade de carbonato de potássio (K_2CO_3). Assim, quanto maior a quantidade de cinzas, mais alto será o valor de pH. Pelo que, quando as cinzas são depositadas no solo, a acidez tende a diminuir (Batista et al., 1998). No entanto, quando ocorrem chuvas muito intensas, verifica-se uma diminuição acentuada dos valores do pH, devido aos efeitos da lixiviação, sendo os valores de pH registados muito inferiores aos obtidos antes do incêndio (Martínez et al., 1991).

Alguns autores, como Franco-Vizcaíno & Sosa-Ramirez (1997), acreditam que a diferença de pH entre regiões queimadas e não queimadas não é significativa. A alcalinidade do solo pode, geralmente, ser verificada quando a água do lixiviado não carrega álcalis e o complexo de troca está altamente saturado (Porta et al., 1999).

3.5.6. Matéria Orgânica

A taxa de decomposição da matéria orgânica varia principalmente com sua natureza, humidade, temperatura e reações no solo (Rheinheimer et al., 2003). Quando a matéria orgânica do solo sofre combustão, muitas das substâncias nela contidas são libertadas na forma de óxidos, e os carbonatos restantes geralmente reagem de forma alcalina (Batista et al., 1998).

Nos casos em que o fogo é de baixa intensidade, há poucas alterações visíveis no solo mineral, observando-se uma diminuição pouco significativa da matéria orgânica presente (Batista et al., 1998); nesta situação, o incêndio apresenta alguns benefícios como por exemplo, a libertação rápida de nutrientes minerais (Moreira et al., 2010). Em contrapartida, quando o fogo tem um carácter intenso, é notório o aumento no escoamento superficial e conseqüentemente uma maior erosão do horizonte superficial do solo (Figueira & Vega, 2011).

Quando os fogos atingem temperaturas superiores a 450 °C há uma aceleração na velocidade de decomposição do carbono orgânico, transformando a matéria orgânica até ao seu

desaparecimento por completo. A ausência da matéria orgânica provoca um impacto negativo na qualidade do solo (González et al., 2009).

3.5.7. Teor em Azoto

A combustão do solo influencia o seu teor em azoto uma vez que a queima de vegetação pode liberar grandes quantidades de azoto para a atmosfera na forma de gases, como o óxido nitroso (N_2O), dióxido de nitrogénio (NO_2) e amónia (NH_3). Nos casos em que a queima é muito intensa e prolongada, pode ocorrer perda significativa do azoto do solo, que é volatilizado e transportado para a atmosfera podendo, ainda, ser dissolvido por chuvas ácidas e promover a contaminação de outros ecossistemas (Rodrigues et al., 2000).

Uma quantidade substancial do azoto do solo resiste a fogos de baixa intensidade, enquanto em fogos de moderada a elevada intensidade a maioria do azoto orgânico é transformado nas suas formas inorgânicas, como iões de amónio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-). O primeiro resulta diretamente da combustão, enquanto o nitrato é uma consequência da evolução do ião amónio algumas semanas ou meses após o fogo, através do processo de nitrificação (Certini, 2005).

3.5.8. Teor em Carbono Orgânico Total

Durante um incêndio, a queima da vegetação pode liberar grandes quantidades de CO_2 para a atmosfera, reduzindo a quantidade de carbono orgânico presente no solo. O impacto do fogo sobre o teor de carbono orgânico do solo pode variar de acordo com a intensidade e duração do incêndio. Em alguns casos, a queima da vegetação pode estimular a produção de novos tecidos vegetais, que contribuem para a entrada de mais carbono no solo. Esse cenário é possível quando o fogo é de intensidade muito baixa e não causa danos significativos às raízes das plantas (Pinto, 2009).

Além de estar relacionada com a textura do solo e vegetação, a concentração do carbono orgânico total é proporcional à matéria orgânica presente no solo (Costa, 2004). Neste caso, o aumento da temperatura na camada mais à superfície do solo pode alterar os compostos orgânicos existentes, formando assim novos compostos e tendo como consequência, substâncias orgânicas hidrofóbicas que envolvem as partículas do solo. Essa alteração promove uma variação no teor de humidade presente no solo (Mattos et al., 2022).

3.5.9. *Teor em Água*

O teor em água no solo tem uma função de bastante importância no desempenho de um determinado complexo combustível. Ou seja, quanto mais elevados os níveis de humidade, com mais dificuldade o fogo se propaga, podendo mesmo não ocorrer, enquanto em solos com características secas há uma maior possibilidade de propagação extremamente rápida de fogos. Ainda durante um incêndio, a humidade do solo também auxilia no retardamento da penetração do calor no solo. Por outro lado, após um incêndio, pode ocorrer a diminuição da cobertura vegetal e da capacidade de retenção de água pelo solo, o que pode originar maior evaporação da água presente e consequentemente diminuição na humidade do solo (Ferreira et al., 2010).

Capítulo IV

Materiais e Métodos

(página propositadamente em branco)

4. Materiais e Métodos

4.1. Localização da Área Piloto de Aveleda e Amostragem

Como referido anteriormente, a área piloto em análise neste trabalho, localiza-se no Parque Natural de Montesinho e encontra-se representada na Figura 12, tendo uma área total de aproximadamente 13700 m².

Dentro desta área piloto foram definidas onze parcelas de monitorização (P1 a P11) onde, ao longo do estudo, foram recolhidas as amostras de solo a quatro diferentes profundidades: 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm. Até à atualidade, a recolha das amostras ocorreu em cinco momentos distintos: i) antes do fogo prescrito (campanha Bb); ii) imediatamente após o fogo (campanha B1a); iii) 2 meses após o fogo (campanha B2a); iv) 7 meses após o fogo (campanha B3a) e v) 1 ano após o fogo (campanha B4a).

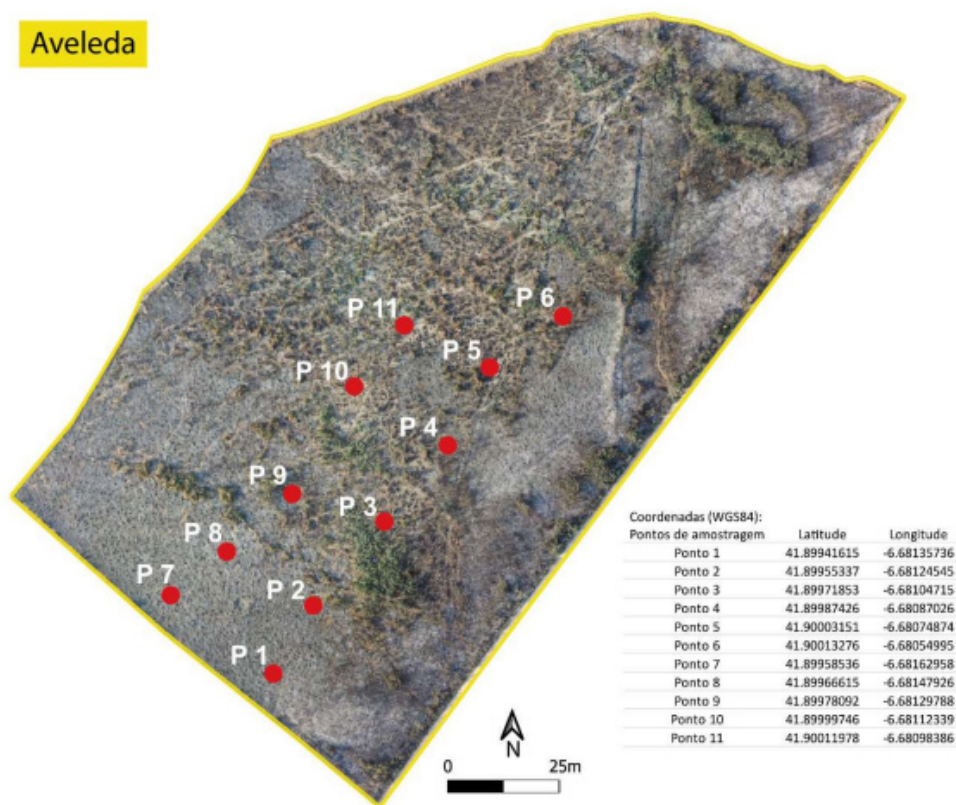


Figura 12. Localização geográfica da rede de amostragem definida na parcela piloto de Aveleda.
Fonte: Relatório técnico-científico do projeto TERRAMATER (TERRAMATER, 2022).

Ao longo das campanhas de amostragem, as parcelas P6 e P10 foram desabilitadas dadas as dificuldades associadas à colheita de amostras nestes dois locais. As amostras remexidas recolhidas (Figura 13), com cerca de um quilograma, foram guardadas e transportadas em sacos de plástico devidamente identificados. Posteriormente, em laboratório, após retirar provetes para determinação do teor em água, análise química elementar simplificada e quantificação dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), as amostras foram secas em estufa ventilada a cerca de 35 °C, durante cerca de uma semana, para simulação da secagem ao ar. As amostras secas foram, seguidamente, limpas de raízes e outros detritos e peneiradas no peneiro de 2 mm, para separação de duas frações granulométricas, uma superior a 2 mm e, outra, inferior a 2 mm (Figura 14). As frações granulométricas obtidas foram pesadas e armazenadas à temperatura ambiente. A fração granulométrica superior a 2 mm foi guardada, enquanto a fração inferior a 2 mm transitou para realização dos ensaios de caracterização seguidamente apresentados.



Figura 13. Processo de recolha de amostras. Bragança, 2022.



Figura 14. Processo de peneiração do solo e separação das duas frações granulométricas.

Para a identificação das amostras foi criada uma nomenclatura que contempla designação para a campanha de amostragem, parcela de amostragem e profundidade da amostra, assim, sequencialmente:

- Localização da área piloto, Bragança **(B)**;
- Campanha de amostragem:
 - Antes do fogo – Janeiro 2021 **(b)**
 - Imediatamente após o fogo – Março 2021 **(1a)**
 - 2 meses após o fogo – Maio 2021 **(2a)**
 - 7 meses após o fogo – Outubro 2021 **(3a)**
 - 1 ano após o fogo após o fogo – Abril 2022 **(4a)**
- Parcela de monitorização e amostragem **(1 a 11)**
- Profundidade de amostragem:
 - 0 a 3 cm **(1)**
 - 3 a 6 cm **(2)**
 - 6 a 10 cm **(3)**
 - 10 a 20 cm **(4)**

4.2. Tecnosolo

O Tecnosolo utilizado no projeto da presente dissertação foi dimensionado e produzido no âmbito do projeto TERRAMATER pela empresa parceira de projeto RVA – Recursos y Valorización Ambiental, tendo sido colocado numa faixa da área piloto 3 meses após o fogo prescrito (Figura 15). Nesta faixa encontram-se as parcelas de monitorização 2, 3, 4 e 5. Trata-se de um Tecnosolo com características ândicas e eutróficas e tem como principais objetivos acelerar a reabilitação das propriedades do solo, aumentar a água útil, o C recalcitrante e a resistência à erosão, bem como melhorar a fertilidade do mesmo (Moraes et al., 2022).



Figura 15. Colocação do Tecnosolo numa faixa de terreno na área piloto de Aveleda (Fonte: Projeto TERRAMATER).

Após a colocação do Tecnosolo, as campanhas de amostragem (B3a e B4a) passam a incluir um nível adicional que corresponde à camada de Tecnosolo que se encontra sobrejacente ao terreno natural, o qual passa a ser designado por “Tecnossolo”. Assim, esta camada sobrejacente ao terreno natural foi amostrada no dia da sua colocação (referido como “Tecnossolo inicial”) e nas campanhas B3a e B4a.

4.3. Análise Química Elementar Simplificada

Com a utilização do equipamento NiltonTM XL3t XRF Analyser foi possível realizar análise química elementar simplificada dos solos (

Figura 16), através do método de fluorescência de raio-X. Esta técnica torna possível a identificação dos elementos existentes, bem com a proporção dos mesmos na amostra. Neste ensaio foi utilizado solo seco a 105 °C, em toda a gama granulométrica. Os provetes de solo foram moídos manualmente, num almofariz, de modo a obter-se uma granulometria inferior a 250 µm, o provete obtido foi colocado em cápsulas de teflon e analisadas em modo minério Cu/Zn. Neste modo de operação é possível detetar os elementos químicos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Nilton™ XL3t XRF Analyser - Elementos analisáveis em Modo Minério Cu/Zn

XRF Analyser - Elementos analisáveis em Modo Minério Cu/Zn					
Al	Ca	Fe	Nb	S	Ti
Ag	Cd	K	Ni	Sb	V
As	Cl	Mg	P	Se	W
Au	Co	Mn	Pb	Si	Zn
Ba	Cr	Mo	Pd	Sn	Zr
Bi	Cu		Rb	Sr	



Figura 16. Preparação dos provetes para análise química elementar simplificada.

4.4. Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada pelo método de difração de raios laser, com recurso ao granulómetro Mastersize 3000 da Malvern. Esta análise foi realizada pelo Instituto de Ciências da

Terra da Universidade do Minho, um dos parceiros do projeto TERRAMATER. Posteriormente, conhecidas as percentagens das frações granulométricas areia, silte e argila, foi realizada a classificação da textura segundo a United States Department of Agriculture (USDA).

4.5. Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica foi determinada por potenciometria com recurso ao medidor multiparâmetro HI-4522-02 da Hanna Instruments, utilizando a sonda Hanna HI 76312 (Figura 17). Foram aplicados os procedimentos descritos na norma ISO 11265:1994. Tal como nos restantes ensaios executados no âmbito deste projeto, os ensaios foram realizados em duplicata, e quando os desvios obtidos eram superiores a 5%, foram realizadas triplicatas. Deste modo, seguiu-se a seguinte sequência de passos:

- Pesar 10 g de solo (< 2 mm) e colocar em um recipiente;
- Adicionar água desionizada (50 mL);
- Agitar mecanicamente o recipiente durante 30 minutos a 180 rpm, a temperatura controlada de ± 20 °C (foi utilizada uma câmara termoestática);
- Filtrar a solução em papel de filtro quantitativo 434 (retém partículas de aproximadamente 2 μm);
- Determinação da condutividade elétrica na solução filtrada.



Figura 17. Determinação da Condutividade Elétrica.

4.6. pH em H₂O e em KCl

Os valores de pH foram determinados em solução aquosa (Figura 18) e em solução de cloreto de potássio (KCl) (Figura 19). Ambas as medições foram realizadas segundo a norma ISO 10390:2005.

O procedimento utilizado seguiu os passos descritos de seguida:

- Pesar 4 g de solo (< 2 mm) e colocar em um Falcon de 50 mL de capacidade;
- Adicionar 25 mL de água desionizada ou 25 mL de solução de KCl (0,01 mol/L), consoante a determinação em execução;
- Agitar mecanicamente o recipiente no agitador orbital (Certomat® MO II) durante 60 minutos a 180 rpm, a temperatura controlada de 20°C ± 2°C;
- Retirar o recipiente, deixar em repouso em posição vertical, no mínimo 1 hora e no máximo 3h (a leitura dos valores não deve ultrapassar este intervalo);
- Com o auxílio do aparelho medidor multiparâmetro HI-4522-02 da Hanna Instruments, utilizando a sonda HI 1131B, determinar o pH da solução.



Figura 18. Determinação do pH em H₂O.



Figura 19. Determinação do pH em KCl.

4.7. Matéria Orgânica

A matéria orgânica (MO) presente no solo foi determinada por gravimetria, após incineração a 400 °C por 4 h (Figura 20). Foram seguidos os passos abaixo indicados:

- Pesar mais de 5 g de amostra de solo (< 2 mm) e colocar dentro de um recipiente, previamente limpo e seco;
- Secar a amostra de solo na estufa à temperaturas de 105 °C até massa constante;
- Retirar a amostra de solo da estufa e deixar arrefecer num ambiente com humidade controlada;
- Calcinar a 900 °C os cadinhos que irão ser utilizados na incineração e deixar arrefecer em ambiente com humidade controlada;
- Determinar a massa dos cadinhos após a calcinação (M_v) e identificá-los com as referências das amostras que neles serão colocadas;
- Colocar 5 g de solo seco (M105) em cada cadinho;
- Colocar os cadinhos com as amostras de solo seco na mufla a 400 °C durante \pm 4h;

- Deixar arrefecer em ambiente com humidade controlada;
- Determinar a massa total do recipiente mais a amostra de solo após calcinação (M400);
- Calcular a quantidade de matéria orgânica (MO) através da fórmula (Equação 2):

$$MO = \frac{(Mv+M105)-(M400)}{(M105)} \times 100\%$$

Equação 2



Figura 20. Determinação da Matéria Orgânica.

4.8. Teor em Carbono Orgânico Total

A determinação do teor de carbono orgânico total presente nas amostras foi realizado com o auxílio do equipamento TOC-Vcsn Shimadzu E200V (Figura 21). No procedimento, utilizou-se recipientes apropriados que comportassem o volume de 100 mg (barquinhas), sendo o mesmo medido em duplicado, para a determinação do carbono total (CT) e carbono inorgânico (CI). O carbono orgânico total foi obtido através da diferença entre os teores de CT e CI. O procedimento foi realizado seguindo as etapas abaixo referidas:

- Colocar o solo húmido (< 2 mm) num recipiente devidamente limpo e seco;
- Secar o solo em estufa ventilada, a 105 °C até massa constante;
- Retirar o solo da estufa e deixar arrefecer em ambiente com humidade controlada;
- Com o auxílio da mufla, calcinar barquinhas suficientes para o ensaio, com uma rampa de 1h no aparelho até atingir a temperatura de 900 °C e permanecer com a temperatura constante durante mais 30 minutos;
- Arrefecer completamente as barquinhas, num ambiente com humidade controlada;
- Colocar 100 mg de solo seco em cada barquinha;
- Identificar em um tabuleiro a posição de cada barquinha e colocá-las no seu devido lugar;
- Na determinação do CT, pré-programar o aparelho seguindo as suas especificações e aguardar que o mesmo dê sinal para se inserir a barquinha dentro do forno, que se encontra aproximadamente a 900 °C. Entre o tempo de leitura da amostra e o seu arrefecimento decorrem cerca de 5 minutos, e a amostra só deve ser retirada após esse tempo, quando o aparelho assim o indicar;
- No caso da determinação do CI, coloca-se 0,25 mL de ácido fosfórico na barquinha, imediatamente antes de se inserir a amostra no equipamento. Com rapidez, colocar a amostra no forno CI com temperatura aproximada de 200 °C;
- O teor de carbono orgânico total é obtido por diferença das concentrações anteriormente lidas (Equação 3):

$$COT = CT - CI$$

Equação 3



Figura 21. Determinação do Carbono Orgânico Total.

4.9. Teor em Azoto

A análise do azoto foi efetuada pelo método de Kjeldahl, o qual permite determinar quantitativamente o azoto orgânico e o azoto amoniacal, NH_3 e NH_4^+ . O azoto proveniente da matéria orgânica do solo é mineralizado pela oxidação com ácido sulfúrico, a $420\text{ }^\circ\text{C}$, na presença de catalisadores. Após a digestão, o azoto amoniacal é submetido a destilação a vapor com formação de condensado, a que se segue uma titulação. A quantidade de azoto existente na amostra é proporcional à quantidade de ácido gasta na titulação (TERRAMATER, 2022).

4.10. Teor em Água

O teor em água foi analisado por gravimetria através da secagem da amostra em estufa, em amostras com cerca de 20 g, aplicando o procedimento previsto na norma EN ISO 17892-1: 2014.

A análise foi realizada em duplicata seguindo os passos a seguir listados:

- Pesar um recipiente limpo e seco (M_r);
- Colocar o provete de solo húmido no recipiente;
- Determinar a massa total do recipiente mais provete de solo húmido (M_{sh});
- Colocar o recipiente com o provete de solo húmido na estufa ventilada e secar a 105 a 110 °C até a massa constante;
- Retirar da estufa o recipiente com o provete de solo seco e deixar arrefecer em ambiente com humidade controlada;
- Determinar a massa total do recipiente mais provete de solo seco (M_{ss});
- Calcular o teor em água aplicando a Equação 4:

$$\text{Teor em água (\%)} = \frac{(M_{sh} - M_{ss})}{(M_{ss} - M_r)} \times 100$$

Equação 4

Capítulo V

Resultados

(página propositadamente em branco)

5. Análise dos resultados nas propriedades

5.1. Análise Química Elementar Simplificada

Os resultados obtidos nas amostras de solo colhidas nas parcelas localizadas fora da faixa de aplicação do Tecno solo (P1, P7, P8, P9 e P11) nas diferentes campanhas de amostragem encontram-se sintetizados na Tabela 4 e na Tabela 5, a sua análise permite verificar que:

- Os elementos predominantes são, por ordem decrescente de concentração, Si, Al, Fe e K. Para além destes elementos maiores foram detetados vinte elementos vestigiais dos quais se destacam o Ti, Mn e Ca.
- Comparando os resultados obtidos nas campanhas de amostragem realizadas antes (Bb) e logo após (B1a) o fogo controlado, não se verificaram diferenças significativas na composição elementar dos solos. Os valores se mantêm pouco inalterados nas restantes campanhas.
- Tendo em conta os valores médios por profundidade, o Ca apresentou concentrações mais altas na camada superficial quando comparado com a mais profunda.

Tabela 4. Valores médios, máximos e mínimos de alguns elementos detetados nos solos naturais das parcelas sem Tecno solo (%)

Bb							
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Ca
Média (%)	19,31	6,23	4,47	2,28	0,39	0,22	0,11
Máximo (%)	19,53	6,83	4,77	2,43	0,40	0,24	0,21
Mínimo (%)	19,00	5,52	4,09	2,13	0,39	0,20	0,05
B1a							
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Ca
Média (%)	19,31	6,33	4,55	2,30	0,39	0,22	0,11
Máximo (%)	19,63	6,73	4,80	2,40	0,40	0,25	0,21
Mínimo (%)	19,06	5,73	4,25	2,17	0,38	0,19	0,05
B2a							
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Ca
Média (%)	18,54	6,19	4,70	2,34	0,38	0,27	0,09
Máximo (%)	18,92	6,49	4,94	2,43	0,39	0,38	0,14
Mínimo (%)	18,35	5,95	4,54	2,27	0,37	0,22	0,04
B3a							
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Ca
Média (%)	19,04	6,16	4,60	2,30	0,40	0,27	0,12
Máximo (%)	19,21	6,47	4,84	2,40	0,41	0,40	0,19
Mínimo (%)	18,82	5,82	4,33	2,20	0,40	0,20	0,07

Tabela 5. Valores médios por profundidade de alguns elementos detetados nos solos naturais das parcelas sem Tecnosolo (%)

Bb							
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Ca
[0-3cm]	19,00	5,52	4,09	2,13	0,39	0,24	0,21
[3-6cm]	19,45	6,05	4,40	2,24	0,40	0,23	0,11
[6-10cm]	19,53	6,52	4,62	2,33	0,40	0,21	0,07
[10-20cm]	19,27	6,83	4,77	2,43	0,39	0,20	0,05
B1a							
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Ca
[0-3cm]	19,38	5,73	4,25	2,17	0,40	0,25	0,21
[3-6cm]	19,63	6,27	4,47	2,28	0,40	0,23	0,12
[6-10cm]	19,17	6,59	4,69	2,36	0,38	0,20	0,07
[10-20cm]	19,06	6,73	4,80	2,40	0,38	0,19	0,05
B2a							
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Ca
[0-3cm]	18,45	6,03	4,57	2,33	0,37	0,23	0,14
[3-6cm]	18,92	5,95	4,54	2,27	0,39	0,24	0,12
[6-10cm]	18,43	6,29	4,74	2,34	0,39	0,22	0,07
[10-20cm]	18,35	6,49	4,94	2,43	0,38	0,38	0,04
B3a							
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Ca
[0-3cm]	19,10	5,82	4,33	2,20	0,41	0,24	0,19
[3-6cm]	19,21	6,10	4,56	2,29	0,41	0,22	0,11
[6-10cm]	19,01	6,24	4,65	2,33	0,40	0,20	0,09
[10-20cm]	18,82	6,47	4,84	2,40	0,40	0,40	0,07

Os resultados obtidos nas amostras de solo colhidas nas parcelas localizadas na faixa de terreno onde houve aplicação do Tecnosolo (P2, P3, P4 e P5) estão sintetizados na Tabela 6 e na Tabela 7, permitiram verificar que:

- Os elementos predominantes são Si, Al, Fe, K, Ca e P, sendo que P não foi encontrado nas parcelas sem Tecnosolo.
- Nas campanhas Bb, B1a e B2a, que ocorreram antes da aplicação do Tecnosolo, os valores obtidos para cada elemento são muito similares aos obtidos nos solos naturais das restantes parcelas descritas anteriormente.
- Com a deposição do Tecnosolo entre a campanha B2a e B3a, foi notório em B3a um pequeno aumento nas concentrações de todos os elementos, sendo que o aumento mais elevado ocorre no elemento Al.

- Tendo em consideração a média das concentrações por profundidade representadas na Tabela 7, os valores de Ca e P obtidos nas camadas mais superficiais de B2a são inferiores aos obtidos em B3a à mesma profundidade.

Tabela 6. Valores médios, máximos e mínimos de alguns elementos detetados nos solos naturais das parcelas com Tecnosolo (%)

Bb						
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ca	P
Média (%)	19,50	6,36	4,51	2,31	0,06	0,00
Máximo (%)	20,02	6,53	4,69	2,37	0,11	0,00
Mínimo (%)	18,65	6,09	4,39	2,28	0,02	0,00
B1a						
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ca	P
Média (%)	20,12	6,73	4,55	2,35	0,07	0,00
Máximo (%)	20,24	7,27	4,83	2,48	0,14	0,00
Mínimo (%)	20,03	6,18	4,28	2,24	0,03	0,00
B2a						
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ca	P
Média (%)	19,55	6,02	4,45	2,26	0,10	0,02
Máximo (%)	19,67	6,38	4,63	2,34	0,16	0,03
Mínimo (%)	19,48	5,57	4,23	2,17	0,06	0,00
B3a						
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ca	P
Média (%)	19,60	6,48	4,63	2,32	0,18	0,03
Máximo (%)	19,91	7,09	4,87	2,41	0,30	0,04
Mínimo (%)	19,31	6,13	4,47	2,27	0,08	0,01

Tabela 7. Valores médios por profundidade de alguns elementos detetados nos solos naturais das parcelas com Tecnosolo (%)

Bb						
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ca	P
[0-3cm]	20,02	6,09	4,39	2,29	0,11	0,00
[3-6cm]	19,81	6,36	4,46	2,28	0,08	0,00
[6-10cm]	19,50	6,53	4,69	2,37	0,04	0,00
[10-20cm]	18,65	6,48	4,49	2,28	0,02	0,00
B1a						
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ca	P
[0-3cm]	20,03	6,18	4,28	2,24	0,14	0,00
[3-6cm]	20,24	6,56	4,49	2,32	0,08	0,00
[6-10cm]	20,07	6,92	4,61	2,38	0,05	0,00
[10-20cm]	20,12	7,27	4,83	2,48	0,03	0,00
B2a						
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ca	P
[0-3cm]	19,53	5,81	4,40	2,23	0,11	0,00
[3-6cm]	19,48	5,57	4,23	2,17	0,16	0,03
[6-10cm]	19,53	6,31	4,53	2,28	0,07	0,02
[10-20cm]	19,67	6,38	4,63	2,34	0,06	0,02
B3a						
Elementos	Si	Al	Fe	K	Ca	P
[0-3cm]	19,36	6,13	4,53	2,27	0,30	0,01
[3-6cm]	19,31	6,24	4,47	2,27	0,21	0,04
[6-10cm]	19,91	6,48	4,62	2,34	0,14	0,03
[10-20cm]	19,80	7,09	4,87	2,41	0,08	0,02

Observando os resultados obtidos na análise do Tecnosolo aplicado encontrou-se, maioritariamente, na sua composição Si, seguido de Fe, Ca, Al e ainda, K e P (Tabela 8). Os restantes elementos detetados encontram-se em concentrações inferiores a 0,015%.

Tabela 8. Concentração de elementos maiores presentes no Tecnosolo (%)

Elementos	Fe	Ca	K	Al	P	Si
Parcela 2	7,88	4,91	1,44	3,42	1,20	13,56
Parcela 3	8,62	5,21	1,45	3,66	1,01	14,35
Parcela 4	8,67	6,07	1,43	3,73	1,08	14,13
Parcela 5	8,86	4,72	1,42	3,75	1,13	14,65
Média	8,51	5,23	1,43	3,64	1,10	14,17

Tendo em conta a análise realizada, concluiu-se que o Tecnosolo tem participação na variação das concentrações de alguns dos elementos, visto que nos locais onde foi aplicado, há um leve aumento dos seus valores, principalmente nos elementos P e Ca. Nas parcelas em que o Tecnosolo não está

presente, os resultados recolhidos pouco variam entre si, tanto quanto comparados a nível de profundidade como ao longo das campanhas. Segundo os autores *Roshan & Biswas (2023)*, a alteração da concentração dos elementos constituintes do solo causada pelo fogo, depende diretamente do tipo e intensidade deste, sendo que as maiores alterações estão associadas a incêndios de grandes dimensões.

5.2. Textura

5.2.1. Tecnosolo aplicado

No que refere ao Tecnosolo aplicado sobre as parcelas 2, 3, 4 e 5, este pode ser classificado quanto à sua textura como siltoso, apresentando a seguinte composição: 5,92% de areia, 12,02% de argila e 86,06% de silte. Analisando a variação da composição granulométrica do Tecnosolo desde a sua colocação até a campanha de amostragem B3a, após 4 meses de contato com o solo onde foi depositado, verificou-se aumento da fração arenosa e diminuição tanto das fração siltosa, como da argilosa, pelo que o Tecnosolo se torna mais grosseiro, evoluindo de textura siltosa para: (i) franco-arenoso em P2, P3 e P5, sendo que em P2 os valores de silte e areia são muito próximos e em P3 e P5 os valores de areia são muito superiores aos de silte; (ii) franco-siltoso em P4, onde os valores de areia são significativamente inferiores aos de silte. As percentagens de cada fração granulométrica do Tecnosolo inicial e da camada de Tecnosolo aplicada nas parcelas 2, 3, 4 e 5 amostrada na campanha B3a são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9. Valores médios das frações granulométricas no Tecnosolo em B3a

Textura do Tecnosolo em B3a					
	Tecnossolo inicial	P2	P3	P4	P5
Argila (%)	12,02	4,04	2,42	4,65	3,45
Silte (%)	86,06	47,74	36,07	56,89	38,47
Areia (%)	5,92	47,97	60,06	38,38	57,77

Na campanha B4a (Tabela 10), a parcela P2 apresentou valores bastante próximos aos valores do Tecnosolo inicial, o que não aconteceu nas restantes parcelas. Avaliando a evolução de B3a para B4a, verificou-se que ocorre diminuição de areia em todas as parcelas, sendo ligeira em P4. Os valores de argila e silte aumentam em todas as parcelas, sendo que P4 continua a ser a que apresenta menor variação. Deste modo, quanto à textura, P3, P4 e P5 classificam-se como franco-siltosos e P2 como siltoso.

Tabela 10. Valores médios das frações granulométricas no Tecno solo em B4a

Textura do Tecno solo em B4a					
	Tecno solo inicial	P2	P3	P4	P5
Argila (%)	12,02	9,01	10,4	5,01	8,01
Silte (%)	86,06	83,62	72,26	61,14	76,9
Areia (%)	5,92	7,37	17,33	33,85	15,08

Os resultados obtidos permitiram concluir que o Tecno solo aplicado sofre evolução textural ao longo do tempo, após aplicação, o que poderá estar relacionado com a sua exposição aos agentes atmosféricos, designadamente chuva e vento, provocando a sua erosão, lixiviação e mistura com o solo natural subjacente. No entanto, verificou-se no período estudado, alguma tendência de recuperação com aproximação dos valores iniciais.

5.2.2. Solo natural

Considerando os valores médios das frações granulométricas dos solos de todas as parcelas em cada campanha (Tabela 11), verificou-se que inicialmente a textura do solo seria enquadrada como sendo franco-siltosa, visto que em média, na campanha de amostragem Bb o solo possuía 34,27% de areia, 5,39% de argila e 60,30% de silte.

No cenário imediatamente após o fogo, campanha de amostragem B1a, observou-se um aumento na percentagem de areia e uma diminuição proporcional na percentagem de silte, permanecendo a percentagem de argila quase inalterada. Os valores médios obtidos foram: 35,65% de areia, 5,51% de argila e 58,70% de silte. Em B2a o cenário foi similar no que refere às percentagens de areia e silte, verificando-se que a primeira voltou a aumentar e a segunda a diminuir. Adicionalmente, e contrariando a tendência anterior, ocorreu um decréscimo na fração de argila. Os valores médios das frações granulométricas de todas as parcelas na campanha de amostragem B2a foi de: 44,23% de areia, 4,62% de argila e 50,76% de silte.

Tabela 11. Valores médios globais das frações granulométricas do solo natural

Textura dos solos em cada campanha					
	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
Argila (%)	5,39	5,51	4,62	4,75	6,60
Silte (%)	60,30	58,70	50,76	52,15	62,20
Areia (%)	34,27	35,65	44,23	42,79	30,66

Analisando os resultados obtidos nos solos amostrados nas parcelas 1, 7, 8, 9 e 11, fora da faixa de aplicação do Tecnosolo (Figura 22 e Tabela 12), foi notória a tendência para o aumento da concentração média de areia após o fogo até B2a e subsequente diminuição ao longo do tempo até à campanha de amostragem B4a, ocorrendo o inverso com os valores de silte e de argila. A percentagem de areia em B2a corresponde a 44,32% e evolui para 40,82% e 28,29%, em B3a e B4a, respetivamente. Por sua vez, a fração silte aumenta de 50,84% para 53,85% e posteriormente para 64,81%. O teor em argila também aumentou a partir da campanha B2a, evoluindo de 4,53% para 4,89% em B3a e por fim, 6,70% em B4a.

Tabela 12. Valores médios das frações granulométricas dos solos das parcelas fora da faixa com Tecnosolo

Textura dos solos em P1, P7, P8, P9 e P11					
	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
Argila (%)	5,32	4,97	4,53	4,89	6,70
Silte (%)	59,64	55,50	50,84	53,85	64,81
Areia (%)	35,02	39,28	44,32	40,82	28,29

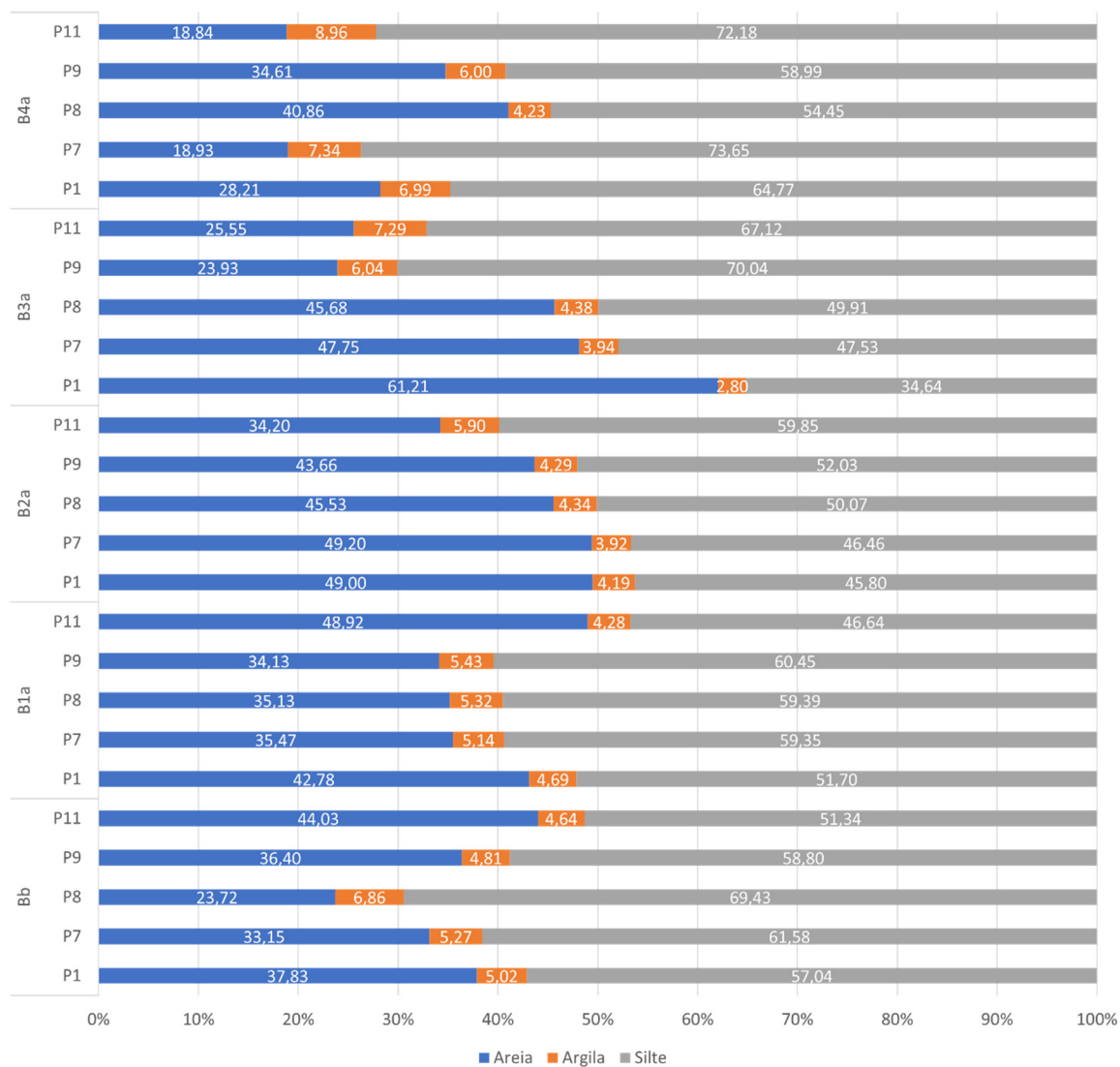


Figura 22. Valores médios das frações granulométricas ao longo do tempo nos solos das parcelas fora da faixa com Tecnosolo.

Após a colocação do Tecnosolo nas parcelas 2, 3, 4 e 5, (Figura 22 e Tabela 13), 4 meses após o incêndio (entre as amostragens B2a e B3a) verificou-se que, tendo em conta a média de todas as parcelas, ocorre uma diminuição progressiva da percentagem de areia e um aumento progressivo da concentração de silte e argila. O teor médio em areia diminui ligeiramente logo após o fogo, aumentando, depois, progressivamente até B3a e regressando ao valor inicial em B4a. Os valores médios de argila e de silte aumentam logo após o fogo, depois diminuem progressivamente até B3a e sofrem aumento de B3a para B4a, aproximando-se dos valores iniciais. De um modo geral, os valores médios de cada fração granulométrica na campanha B4a assemelharam-se aos valores médios na campanha Bb (antes do fogo), verificando-se a recuperação da textura inicial do solo cerca de 1 ano após o fogo controlado, ou seja, as frações granulométricas tendem a evoluir no sentido dos valores iniciais (anteriores ao incêndio).

Tabela 13. Valores médios das frações granulométricas dos solos das parcelas na faixa com Tecnosolo

Textura dos solos em P2, P3, P4 e P5					
	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
Argila (%)	5,48	6,19	4,74	4,57	6,47
Silte (%)	61,13	62,70	50,65	50,02	58,94
Areia (%)	33,33	31,11	44,12	45,24	33,62

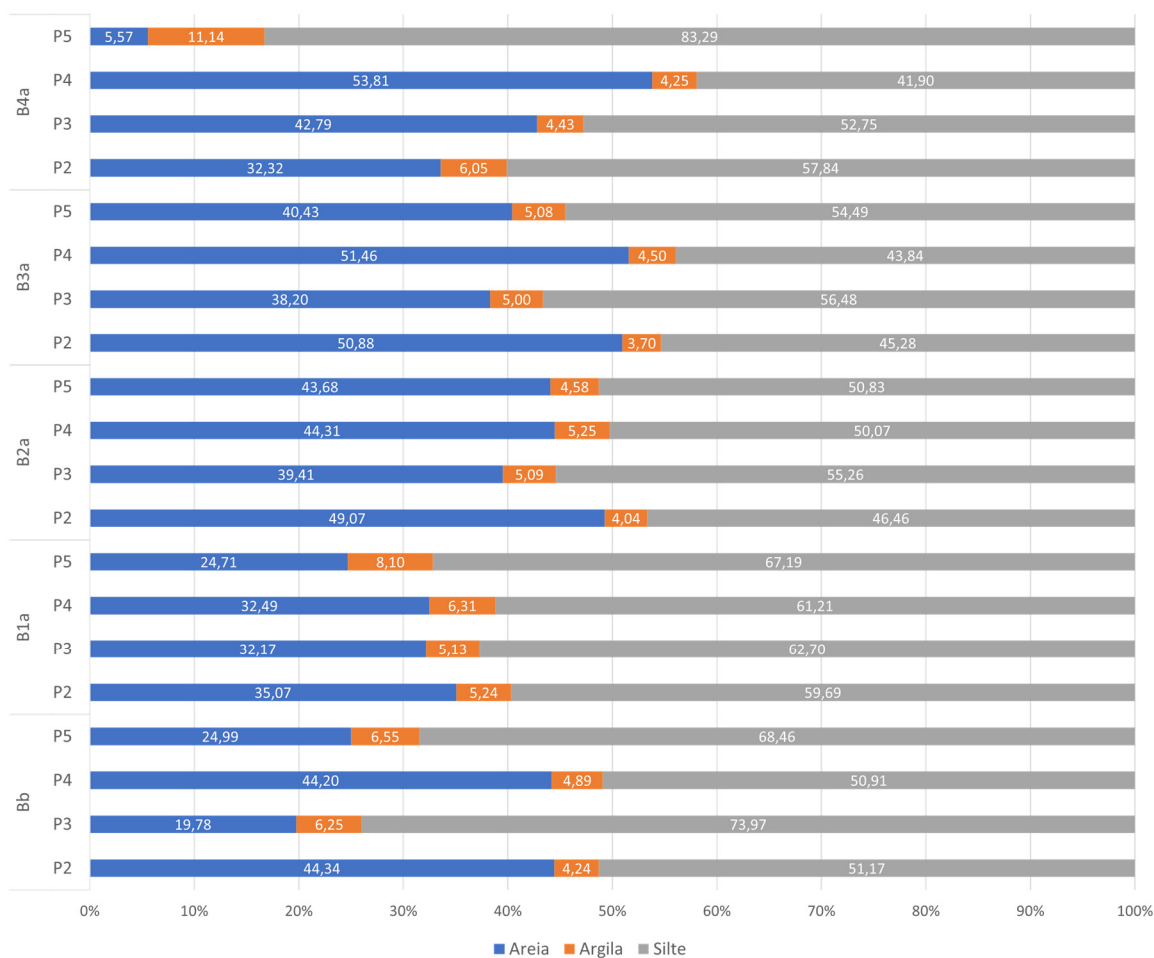


Figura 23. Valores médios das frações granulométricas ao longo do tempo nos solos das parcelas na faixa com Tecnosolo.

Nas Figura 24 apresenta-se a evolução das texturas dos solos naturais amostrados nas parcelas fora da faixa de aplicação do Tecnosolo. Já na Figura 25 representa-se a evolução temporal das texturas dos solos naturais e dos Tecnosolos amostrados na faixa onde este foi aplicado.

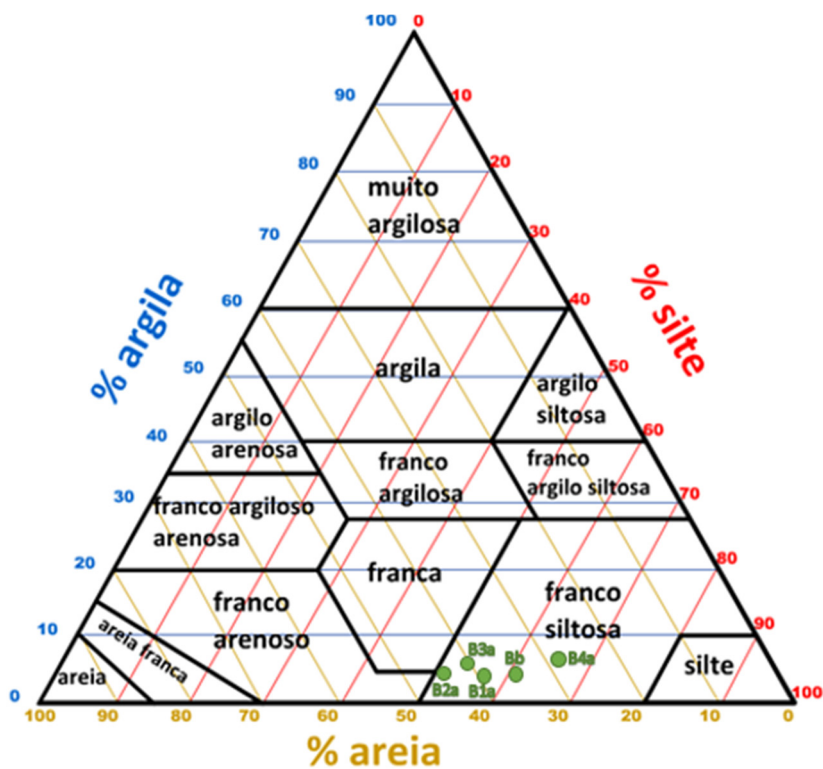


Figura 24. Classificação textural dos solos naturais tendo em conta os valores médios das parcelas fora da faixa com Tecnosolo (P1, P7, P8, P9 e P11).

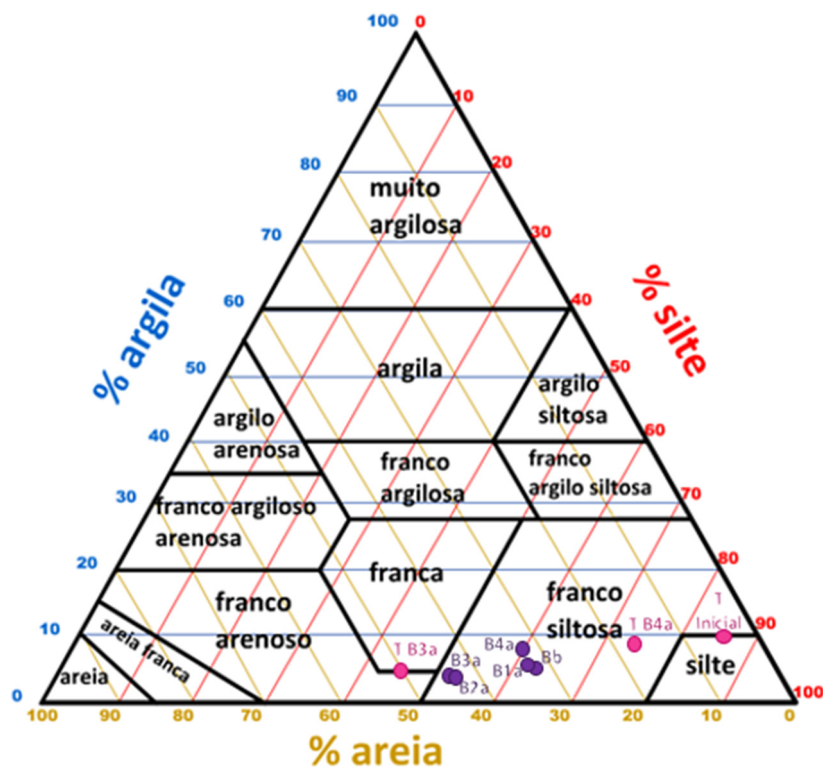


Figura 25. Classificação textural dos solos naturais tendo em conta os valores médios das parcelas na faixa com Tecnosolo (roxo), do Tecnosolo inicial (rosa) e do Tecnosolo em B3a e B4a (rosa).

Os dados obtidos permitiram concluir que não foram detectadas diferenças significativas nas parcelas com e sem aplicação de Tecnosolo, sendo que todas continuam a ser classificadas como franco-siltosas. Estes resultados vão ao encontro dos reportados por outros autores, como é o caso da revisão desenvolvida por Agbeshie et al. (2022), onde referem que, sendo a areia, a argila e o silte pouco sensíveis a elevadas temperaturas, dificilmente a textura do solo será alterada por fogos florestais. Ainda no mesmo artigo os autores comentam que a argila, entre as três citadas, é a mais suscetível à alteração por altas temperaturas por ter um limite inferior às restantes, sendo então a principal responsável pelas breves oscilações dentro da classificação do solo estudado. No caso dos Tecnosolos verificaram-se algumas alterações, com indícios de recuperação da textura inicial no final do período estudado (Agbeshie et al. 2022).

5.3. Condutividade Elétrica

Começando por avaliar os valores de condutividade elétrica (CE) dos Tecnosolos aplicados, verificou-se que apresentam valores iniciais muito elevados, de 6558 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Após colocação *in situ*, verifica-se uma diminuição progressiva deste parâmetro, apresentando valores médios de 1069,23 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 295,98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ após 4 e 9 meses de aplicação, respetivamente.

Analisando os valores médios de CE por parcela (Tabela 14) para as 4 profundidades estudadas, verifica-se que:

- Os valores iniciais (Bb) dos solos em situação pristina encontravam-se entre 28,99 e 41,57 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com valor médio de 33,58 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Logo após o fogo controlado (B1a), na maioria das parcelas, verificou-se uma diminuição do valor da CE, tendo os valores obtidos variado entre 21,91 e 43,77 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (média 29,91 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- 2 meses após o fogo (B2a) os valores tenderam a recuperar, apresentando, no geral, ligeiros aumentos e variando entre 19,46 e 44,21 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com valor médio de 30,02 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- 4 meses após colocação dos Tecnosolos, isto é, 7 meses após o fogo (B3a) verificou-se, nas parcelas por eles abrangidas, um aumento muito significativo da CE dos solos subjacentes com valores a variar entre 400,63 e 736,96 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto nas parcelas não abrangidas pela colocação dos Tecnosolos se verificou um ligeiro aumento relativamente a B2a, com valores entre 26,49 e 51,56 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- 9 meses após colocação dos Tecnosolos, isto é, 12 meses após o fogo (B4a) verificou-se que o aumento geral da CE verificado em B3a não permaneceu, observando-se uma diminuição geral dos valores para 140,55 a 275,34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 23,18 a 28,62 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nas parcelas com e sem Tecnosolo, respetivamente.

Tabela 14. Evolução temporal dos valores médios da CE por parcela

Valores médios por parcela ($\mu\text{S/cm}$)					
	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
P1	41,35	30,23	36,08	51,56	27,23
P2	32,64	23,77	35,43	415,33	163,68
P3	41,57	43,77	29,92	736,96	275,34
P4	33,81	26,53	25,15	400,63	210,96
P5	31,08	21,91	26,93	610,78	140,55
P7	31,92	32,30	19,46	33,64	23,18
P8	28,99	25,42	26,89	33,37	23,48
P9	30,63	31,87	44,21	26,49	28,62
P11	30,19	26,87	26,13	30,17	25,45

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 15) nas parcelas estudadas fora da faixa de aplicação dos Tecnosolos (P1, P7, P8, P9 e P11) verificou-se que:

- Os valores obtidos estão compreendidos entre 32,82 e 46,79 $\mu\text{S/cm}$, 26,71 e 33,66 $\mu\text{S/cm}$, 20,56 e 31,32 $\mu\text{S/cm}$ e 20,64 e 29,67 $\mu\text{S/cm}$ nas amostras recolhidas entre os 0 e os 3 cm, os 3 e os 6 cm, os 6 e os 10 cm e os 10 e os 20 cm, respetivamente;
- Em todas as fases de amostragem o valor médio de CE foi sempre superior na profundidade de 0 a 3 cm, apresentando uma tendência geral para diminuir com a profundidade.

Tabela 15. Valores médios da CE por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo

Média por profundidade ($\mu\text{S/cm}$)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	[0-3cm]	43,35	46,72	44,83	46,79
[3-6cm]	31,43	33,60	27,48	33,66	26,71
[6-10cm]	26,47	26,65	20,56	31,32	22,20
[10-20cm]	26,29	27,70	29,67	28,41	20,64

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 16) nas parcelas estudadas na zona onde foram aplicados Tecnosolos (P2, P3, P4 e P5) verificou-se que:

- Nas amostras colhidas antes da colocação dos Tecnosolos (Bb, B1a e B2a), os valores obtidos são muito semelhantes ao das parcelas 1, 7, 8, 9 e 11, variado entre 38,59 e 46,96 $\mu\text{S/cm}$, 25,84 e 37,15 $\mu\text{S/cm}$, 22,25 e 30,71 $\mu\text{S/cm}$ e 20,39 e 27,22 $\mu\text{S/cm}$ nas amostras dos 0 aos 3 cm, 3 aos 6 cm, 6 aos 10 cm e 10 aos 20 cm, respetivamente. Verifica-se, também, uma tendência de decréscimo da CE com a profundidade.
- Nas amostras colhidas após colocação dos Tecnosolos os valores médios nestas parcelas apresentam uma subida drástica, variando entre 720,41 e 231,51 $\mu\text{S/cm}$, 541,88 e 178,23

$\mu\text{S}/\text{cm}$, 525,92 e 180,11 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 375,48 e 200,68 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dos 0 aos 3 cm, 3 aos 6 cm, 6 aos 10 cm e 10 aos 20 cm, respetivamente. A tendencia de diminuição da CE em profundidade mantém-se.

- De B3a para B4a os valores da CE sofrem um decréscimo, para valores na ordem dos 32 a 52% dos obtidos em B3a.
- Comparando os valores antes e depois da colocação dos Tecnosolos verificou-se, em B3a, a evolução para valores 15 a 23 vezes superiores aos obtidos em B2a e, em B4a, para valores 5 a 10 vezes superiores aos obtidos em B2a.
- O aumento da CE nos solos após colocação dos Tecnosolos foi superior nas camadas intermédias (3 a 6 e 6 a 10 cm) e, em média, a diminuição ao longo do tempo (de B3a para B4a) é menos pronunciada a maiores profundidades.

Tabela 16. Valores médios da CE por profundidade nas parcelas com Tecnosolo

Média por profundidade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	Tecnossolo	-	-	-	1069,23
[0-3cm]	44,01	38,59	46,96	720,41	231,51
[3-6cm]	37,15	25,84	27,82	541,88	178,23
[6-10cm]	30,71	28,13	22,25	525,92	180,11
[10-20cm]	27,22	23,42	20,40	375,48	200,68

Com base nos resultados obtidos concluiu-se que: (i) imediatamente após o fogo, verificou-se uma tendência geral para diminuição da CE, que tendeu a recuperar ao longo do tempo; (ii) a aplicação de Tecnosolos apresentou uma grande influência nesta propriedade dos solos, no entanto, o efeito foi transitório uma vez que, na janela de tempo estudada, se verificou uma diminuição progressiva.

5.4. pH

Tendo em conta os valores médios de pH por parcela (Tabela 17 e Tabela 18) para as 4 profundidades estudadas, verificou-se:

- Em Bb os valores do pH variaram de 4,63 a 5,12 em H_2O e de 4,08 a 4,22 em KCl, com valores médios de 4,93 e 4,13, respetivamente.
- Em ambos os casos (pH em H_2O ou pH em KCl), verificou-se um aumento do seu valor imediatamente após o fogo (B1a) quando comparado com o valor inicial. O valor médio de pH em H_2O aumentou de 4,93 para 5,58 e em KCl de 4,13 para 4,25.
- Em B2a observou-se uma descida dos valores do pH. O valor médio de pH em H_2O desceu para 5,28 e de pH em KCl voltou ao seu valor original, de 4,13.

- Nas parcelas abrangidas pelo Tecnosolo, em B3a, foi visível a diminuição do valor médio do pH em H₂O e um aumento do pH em KCl, sendo os valores médios de pH nesta campanha de 5,11 e 4,41, respectivamente. No entanto, esta diminuição do pH em H₂O foi transitória uma vez que, entre as campanhas de amostragem B3a e B4a, ocorreu um aumento em ambos os pHs alcançando valores médios em B4a de 5,58 e 4,88 em H₂O e KCl, respetivamente, em ambos os casos valores superiores aos iniciais.
- Nos valores de pH dos solos amostrados nas parcelas fora da faixa de Tecnosolo verificou-se um aumento do valor médio do pH entre as campanhas B2a e B3a, obtendo-se, nesta última, valores médios de pH de 5,58 em H₂O e 4,21 em KCl. Esta tendência de aumento manteve-se em B4a, atingindo valores de 5,85 e 4,25 para o pH em H₂O e KCl, respetivamente, ultrapassando, também nestas parcelas, os valores de pH iniciais.

Tabela 17. Evolução temporal dos valores médios de pH em H₂O por parcela

Valores médios por parcela (pH em H₂O)					
	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
P1	5,07	5,60	5,48	5,52	6,16
P2	5,08	5,50	4,68	5,16	5,58
P3	4,63	5,60	5,32	4,91	5,41
P4	4,94	5,60	5,50	5,32	5,93
P5	4,98	5,63	5,44	5,04	5,39
P7	4,93	5,48	5,33	5,34	6,12
P8	4,83	5,66	5,05	5,72	6,17
P9	4,82	5,66	5,37	5,88	5,73
P11	5,12	5,52	5,36	5,44	5,06

Tabela 18. Evolução temporal dos valores médios de pH em KCl por parcela

Valores médios por parcela (pH em KCl)					
	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
P1	4,11	4,19	4,10	4,16	4,28
P2	4,22	4,21	4,09	4,43	4,71
P3	4,12	4,31	4,08	4,31	5,22
P4	4,12	4,29	4,20	4,41	4,98
P5	4,17	4,33	4,16	4,48	4,59
P7	4,16	4,22	4,15	4,12	4,24
P8	4,12	4,19	4,16	4,32	4,31
P9	4,11	4,25	4,11	4,23	4,17
P11	4,08	4,22	4,09	4,20	4,24

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 19 e Tabela 20) nas parcelas estudadas fora da faixa com aplicação de Tecno solos (P1, P7, P8, P9 e P11) verificou-se que:

- Os valores obtidos para o pH em H₂O estão compreendidos entre 5,03 e 5,92, 4,93 e 5,93, 4,90 e 5,84, 4,89 e 5,63, nas amostras recolhidas à profundidade de 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm, respetivamente, e em KCl os valores variaram entre 4,01 e 4,24, 4,06 e 4,20, 4,10 e 4,26, 4,15 e 4,31, para as mesmas profundidades.
- No ensaio com H₂O o valor mais alto do pH foi encontrado na camada dos 3 aos 6 cm, enquanto no ensaio com KCl, ocorre o inverso, tendo sido o valor mais alto o registado na camada mais profunda.

Tabela 19. Valores médios do pH H₂O por profundidade nas parcelas sem Tecno solo

Média por profundidade	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	[0-3cm]	5,03	5,72	5,55	5,63
[3-6cm]	4,93	5,53	5,25	5,54	5,93
[6-10cm]	4,90	5,42	5,30	5,67	5,84
[10-20cm]	4,89	5,44	5,29	5,40	5,63

Tabela 20. Valores médios do pH KCl por profundidade nas parcelas sem Tecno solo

Média por profundidade	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	[0-3cm]	4,01	4,24	4,18	4,22
[3-6cm]	4,06	4,16	4,07	4,17	4,20
[6-10cm]	4,16	4,17	4,10	4,17	4,26
[10-20cm]	4,24	4,25	4,15	4,27	4,31

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 21 e Tabela 22) nas parcelas estudadas na zona onde foram aplicados Tecno solos (P2, P3, P4 e P5) verificou-se que:

- Nas amostras colhidas antes da colocação dos Tecno solos (Bb, B1a e B2a), os valores obtidos são semelhantes ao das parcelas sem Tecno solo, em ambos os ensaios. O pH em H₂O varia entre 5,03 e 5,75, 4,95 e 5,56, 4,79 e 5,50, 4,88 e 5,53, nas amostras dos 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm, respetivamente. No caso do pH em KCl, para as mesmas profundidades, os valores do pH encontram-se nos intervalos 4,11 e 4,29, 4,05 e 4,21, 4,12 e 4,26, 4,20 e 4,35, verificando-se que o valor do pH não sofre uma variação considerável com a profundidade.
- Após a deposição do Tecno solo, na campanha de amostragem B3a foi visível a diminuição do pH em H₂O, em todas as profundidades, à exceção da profundidade 3 a 6 cm, em que o valor se manteve o mesmo. A redução deste valor está compreendida no intervalo 1,36% a 6,85%.

Em KCl verifica-se um comportamento oposto, uma vez que todos os valores aumentaram na ordem dos 2,90% a 12,08%.

- A diminuição dos valores de pH no ensaio com H₂O não prevalece no tempo uma vez que, em B4a, se verificou uma subida generalizada tanto em H₂O como em KCl, apresentando, para todas as profundidades, valores superiores aos obtidos em B2a. No ensaio com H₂O esse aumento encontra-se no intervalo 3,48% a 10,91%, enquanto no ensaio KCl 3,95% a 19,55%.

Tabela 21. Valores médios do pH H₂O por profundidade nas parcelas com Tecno solo

Média por profundidade		Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	Tecno solo	-	-	-	7,23	7,45
[0-3cm]	5,03	5,75	5,53	5,42	5,98	
[3-6cm]	4,95	5,56	5,15	5,15	5,70	
[6-10cm]	4,79	5,50	5,14	4,81	5,40	
[10-20cm]	4,88	5,53	5,12	5,05	5,23	

Tabela 22. Valores médios do pH KCl por profundidade nas parcelas com Tecno solo

Média por Profundidade		Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	Tecno solo	-	-	-	7,47	7,13
[0-3cm]	4,11	4,29	4,15	4,72	5,87	
[3-6cm]	4,07	4,21	4,05	4,27	4,54	
[6-10cm]	4,20	4,26	4,12	4,25	4,43	
[10-20cm]	4,25	4,35	4,20	4,33	4,60	

Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que: (i) se verifica um aumento dos valores de pH em H₂O e KCl após a ocorrência do incêndio; (ii) a profundidade não tem muita influência na variação dos valores de pH, em ambos os ensaios; e (iii) o pH em H₂O não revela diferenças significativas entre os valores obtidos nas parcelas com e sem Tecno solo. No caso do KCl, a diferença é um pouco maior, sendo as parcelas com Tecno solo as que têm tendência a atingir valores de pH mais altos. Segundo os autores Agbeshie et al. (2022), o aumento do pH em solos florestais incendiados está relacionado com a combustão da matéria orgânica que liberta compostos carbonizados e produz cinzas.

5.5. Matéria Orgânica

Os solos estudados revelaram teores em matéria orgânica (MO) compreendidos entre 8,95% e 18,59%. Nas parcelas em que o Tecnosolo foi aplicado, o valor médio de teor em MO presente foi de 11,58% e 10,96% em B3a e B4a, respetivamente.

Tendo em conta os valores médios por parcela (Tabela 23) para as 4 profundidades estudadas, observou-se que:

- Os valores iniciais obtidos de MO (Bb) estão compreendidos no intervalo 10,23% e 18,59%, sendo o seu valor médio de 12,69%.
- Na campanha B1a, verificou-se uma diminuição do valor mínimo (10,15%), bem como do valor máximo (15,40%) de MO, sendo o valor médio de 13,41%, verificando-se um aumento de cerca de 1% relativamente a Bb.
- A campanha B2a apresenta valores inferiores aos obtidos em Bb e bastante próximos aos de B1a. Os valores de MO obtidos encontram-se no intervalo de 9,46% a 15,21%, apresentando um valor médio de 13,05%.
- Na campanha seguinte, B3a, a média dos valores nas parcelas sem Tecnosolo é inferior a B2a, 12,89%, bem como, nas parcelas com aplicação de Tecnosolo, em que esse valor é 11,58%.
- Na última campanha, B4a, a média dos valores de MO nas parcelas sem Tecnosolo é inferior à de B2a, mas ligeiramente superior à de B3a, com o valor 12,93%. No caso das parcelas com Tecnosolo, o valor médio de MO foi de 10,96%, inferior aos obtidos em B2a e B3a.

Tabela 23. Valores médios de MO por parcela (%)

	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
P1	13,78	15,40	13,22	12,46	11,51
P2	11,06	12,15	15,21	11,57	12,96
P3	10,23	14,19	13,75	9,25	8,95
P4	11,54	12,76	11,30	11,57	12,12
P5	10,32	10,15	9,46	13,94	9,82
P7	15,29	14,60	10,90	12,62	12,68
P8	10,95	13,99	13,92	14,15	13,46
P9	12,42	13,90	14,70	10,96	13,69
P11	18,59	13,59	15,02	14,28	13,30

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 24) nas parcelas estudadas fora da faixa de aplicação de Tecno solos (P1, P7, P8, P9 e P11) foi possível observar que:

- Os valores de MO obtidos enquadraram-se nos intervalos de 13,78% a 18,57%, 12,73% a 13,93%, 11,58% a 13,39% e 10,49% a 12,51% para as profundidades de amostragem de 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm, respetivamente.
- O valor médio mais elevado foi encontrado na camada mais superficial e corresponde a 16,11%. É visível um decréscimo deste valor com o aumento da profundidade, em que a camada mais profunda apresenta um valor médio de 11,57%.
- Em todas as campanhas, o valor médio do teor em MO diminui em profundidade.
- Na camada superficial (0 a 3 cm), o valor médio do teor em MO diminuiu progressivamente após o fogo até à colocação do Tecno solo na vizinhança, aumentando seguidamente embora em B4a ainda não tenha atingido o valor inicial (Bb). Este facto não ocorre nas camadas inferiores, onde se detectaram menores variações no teor de MO ao longo do tempo e a ocorrência em B4a de valores semelhantes ou superiores aos identificados em Bb.

Tabela 24. Valores médios de MO por profundidade nas parcelas sem Tecno solo

Média por Profundidade (%)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a	Média em cada profundidade
	[0-3cm]	18,57	17,10	13,78	15,60	15,49
[3-6cm]	12,91	13,93	13,33	12,73	12,99	13,18
[6-10cm]	11,58	13,39	12,80	11,89	11,80	12,29
[10-20cm]	10,49	12,51	12,05	11,35	11,43	11,57

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 25) nas parcelas estudadas na zona onde foram aplicados Tecno solos (P2, P3, P4 e P5) observou-se que:

- O Tecno solo utilizado apresentava, inicialmente, um teor em MO de 15,80%, valor que foi decrescendo após colocação e ao longo do tempo (B3a e B4a).
- Os teores médios de MO nestas parcelas, antes da colocação dos Tecno solos (Bb, B1a e B2a) variavam entre 11,70% a 14,40%, de 10,71% a 16,44%, de 10,42% a 12,21% e de 9,66% a 10,68%, correspondendo respetivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm.
- Depois da colocação do Tecno solo, os valores do intervalo transformam-se em 12,96% a 13,68%, de 11,66% a 12,57%, de 10,19% a 11,08% e de 8,32% a 9,72%, correspondendo respetivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm. Comparando

com os teores anteriores à colocação do Tecnosolo, observou-se aumento do teor na camada mais superficial e tendência para diminuição nas restantes camadas, mais profundas.

- Ao comparar os valores de B4a com Bb, verifica-se que nas camadas mais superficiais (0 a 3 cm e 3 a 6 cm) os teores de MO em B4a são superiores aos da campanha Bb, enquanto nas camadas mais profundas (6 a 10 e 10 a 20 cm) os teores ainda não atingiram os valores iniciais. De B2a para B3a há um aumento de 9,71% e 0,47% nas camadas 0 a 3 cm e 6 a 10 cm, respectivamente. Nas restantes há uma diminuição de 30,87% e 8,48% correspondendo às camadas 3 a 6 cm e 10 a 20 cm. De B3a para B4a, a evolução é ligeiramente diferente, verificando-se um aumento de 5,28% do teor em MO na camada superficial e uma diminuição nas restantes profundidades de amostragem, nas quais os valores estão compreendidos no intervalo de 7,73% a 16,88%.

Tabela 25. Valores médios de MO por profundidade nas parcelas com Tecnosolo

Média por profundidade (%)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	Tecnosolo	-	-	-	12,36
[0-3cm]	12,36	14,40	11,70	12,96	13,68
[3-6cm]	10,71	11,96	16,44	12,57	11,66
[6-10cm]	10,42	12,21	11,03	11,08	10,19
[10-20cm]	9,66	10,68	10,54	9,72	8,32

Tendo em conta os valores obtidos, conclui-se que as parcelas sem Tecnosolo tendem a perder MO durante a janela de tempo estudada, principalmente na zona mais superficial do solo, sendo que nas camadas mais profundas, a alteração é relativamente pequena. Tanto nas parcelas com aplicação de Tecnosolo como nas parcelas fora da zona de aplicação do mesmo verifica-se um aumento da MO na camada superficial (0 a 3 cm) após a sua aplicação (da campanha B2a para B3a). Este comportamento não se verifica nas camadas mais profundas. Em média, exceto na camada superficial fora da faixa de aplicação do Tecnosolo, verificou-se um ligeiro aumento da MO imediatamente após o fogo. Embora Agbeshie et al. (2022) refiram que há redução da MO após a ocorrência de um incêndio, tal não se verificou neste estudo. Isto deve-se ao facto de a degradação da MO estar relacionada com a temperatura atingida (ocorre a partir dos 200 °C), sendo que, neste trabalho o fogo controlado aplicado foi de muito baixa intensidade, podendo não ter atingido temperaturas necessárias para a total degradação da MO.

5.6. Teor em Carbono Orgânico Total

Analisando os valores médios por parcela (Tabela 26) para as 4 profundidades estudadas, verificou-se que:

- Os valores iniciais (Bb) se encontravam no intervalo 4,91% a 9,45%, sendo o seu valor médio 6,25%.
- Na campanha B1a (logo após o fogo prescrito), houve um leve aumento do valor mínimo do COT, sendo que o máximo se mantém próximo do inicial. Estes variam entre 4,35% e 9,26%, sendo o seu valor médio de 6,38%.
- A campanha seguinte (B2a) mostrou um decréscimo nos valores quando comparada com B1a e também Bb, sendo o valor mínimo 4,20% e o valor máximo 8,56%, com valor médio de 6,27%.
- Em B3a (4 meses após a colocação do Tecnosolo e 7 meses após o fogo prescrito) as parcelas em que foi aplicado o Tecnosolo, à exceção de P3, mostraram um aumento dos seus valores. Nas parcelas que não foram abrangidas pelo Tecnosolo, o inverso ocorre, os valores em B3a são inferiores a B2a.
- Na última campanha realizada, que ocorreu 9 meses após colocação dos Tecnosolos e 12 meses após o fogo (B4a), as parcelas influenciadas pela Tecnosolo apresentaram valores ligeiramente superiores a B3a, à exceção de P5. No caso das parcelas fora das zonas com Tecnosolo, todas apresentam valores muito próximos entre B3a e B4a.

Tabela 26. Valores médios do COT por parcela (%)

	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
P1	7,40	7,01	6,16	5,82	5,78
P2	5,20	5,11	5,94	6,44	6,51
P3	5,11	6,95	6,46	4,00	4,19
P4	5,62	5,52	4,77	6,00	6,09
P5	4,91	5,03	4,20	6,20	4,56
P7	8,16	6,85	6,27	6,16	5,62
P8	5,65	6,75	7,36	6,84	6,67
P9	5,90	6,91	8,56	5,61	6,81
P11	9,45	6,44	6,69	6,44	6,84

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 27) nas parcelas estudadas fora da faixa de aplicação do Tecnosolo (P1, P7, P8, P9 e P11) verificou-se que:

- Os intervalos de valores obtidos foram de 7,46% a 10,43%, de 5,85% a 6,24%, de 5,38% a 5,94% e de 5,37% a 6,17%, correspondendo respetivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm.
- O valor médio mais elevado se encontra na camada mais superficial (0 a 3 cm), sendo este de 8,66%, bastante superior ao da camada mais profunda (10 a 20 cm), que é de 5,71%.

Tabela 27. Valores médios do COT por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo

Média por Profundidade (%)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a	Média em cada profundidade
	[0-3cm]	10,43	9,21	8,15	7,46	8,08
[3-6cm]	6,14	6,18	5,86	5,85	6,24	6,06
[6-10cm]	5,38	5,88	5,94	5,70	5,68	5,71
[10-20cm]	5,42	5,91	6,17	5,68	5,37	5,71

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 28) nas parcelas estudadas na zona onde foram aplicados Tecnosolos (P2, P3, P4 e P5) verificou-se que:

- Nas amostras antes da colocação do Tecnosolo (Bb, B1a e B2a), os intervalos de valores de COT obtidos foram de 6,36 a 7,85%, 5,05 a 5,49%, 4,63 a 5,70%, 3,84 a 4,50%, correspondendo respetivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm. Após a colocação do Tecnosolo, os valores do intervalo passam a 7,03 a 7,47%, 5,53 a 5,61%, 5,05 a 5,27% e 3,51 a 4,52%, correspondendo respetivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm.
- Tendo em conta a evolução dos valores após a aplicação do Tecnosolo, de B2a para B3a houve uma tendência para um aumento dos valores de 8,38% a 15,06%, à excepção da camada superficial em que foi visível uma diminuição de 5,17%. Entre B4a e B2a, foi visível que os valores médios em B2a nas camadas intermédias foram inferiores aos de B4a, mas na camada superficial e na mais profunda o oposto acontece, assim sendo houve um aumento de B2a para B4a compreendido entre 8,72% e 12,22% nas camadas intermédias e uma diminuição entre 9,48% e 11,60% nas restantes. Entre B3a e B4a, à exceção da camada 6 a 10 cm em que o valor de B4a é 4,19% superior ao de B3a, todos os valores de B3a são superiores aos de B4a, inserindo-se essa variação no intervalo 1,41% a 28,90%.
- Considerando os valores do COT obtidos para o Tecnosolo, verificou-se que estes são relativamente próximos em ambas as campanhas onde estão presentes (B3a e B4a), sendo o seu valor médio 7,86% e 7,12%, respectivamente.

Tabela 28. Valores médios de COT por profundidade nas parcelas com Tecnossolo

Média por profundidade (%)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	Tecnossolo	-	-	-	7,86
[0-3cm]	6,36	7,07	7,85	7,47	7,03
[3-6cm]	5,36	5,49	5,05	5,61	5,53
[6-10cm]	4,63	5,70	4,63	5,05	5,27
[10-20cm]	4,50	4,35	3,84	4,52	3,51

Analisando os resultados obtidos, concluiu-se que: há uma tendência geral para o aumento da concentração do COT no período imediatamente após o fogo posto, em relação aos valores apresentados no pré-fogo. Em todas as parcelas, independentemente do período estudado foi notório que os valores mais altos se encontram nas camadas mais superficiais, ou seja, quanto maior a profundidade, menor a concentração do COT.

Enquanto que nas parcelas sem Tecnossolo a concentração tende a diminuir no intervalo de tempo estudado, as parcelas em que mesmo foi aplicado apresentam uma concentração superior quando comparadas com os resultados iniciais, o que demonstra a influência do Tecnossolo.

5.7. Teor em Azoto

Tendo em conta os valores relativos ao teor em azoto obtidos para o Tecnossolo, verifica-se que estes são os mesmos em ambas as campanhas onde estão presentes (B3a e B4a), sendo o seu valor médio de 0,46%.

Analisando os valores médios por parcela (Tabela 29) para as 4 profundidades estudadas, verificou-se que:

- Os valores iniciais (Bb) do teor de azoto encontravam-se no intervalo 0,25% a 0,40%, sendo o seu valor médio 0,31%.
- Na campanha B1a (logo após o fogo prescrito), houve uma tendência para a diminuição dos teores em azoto, em que os valores variam entre 0,19% e 0,37%, e o seu valor médio é de 0,28%.
- A campanha seguinte (B2a) mostrou valores muito próximos aos iniciais (Bb), sendo o valor mínimo bastante próximo (0,22%), bem como o valor máximo (0,39%). O valor médio foi de 0,32%. Em cerca de metade das parcelas, os valores de B2a verificaram-se superiores aos de B1a, sendo, também nestes casos, quase sempre superiores a Bb.
- Em B3a (4 meses após a colocação do Tecnossolo e 7 meses após o fogo prescrito) as parcelas em que foi aplicado o Tecnossolo, mostraram um aumento dos seus valores, que

variam entre 0,04% e 0,14%, à exceção da parcela 3 em que é visível um decréscimo (de 0,35% para 0,26%). As parcelas que não foram abrangidas pelo Tecnosolo, não apresentam nenhuma tendência, pois enquanto as parcelas 9 e 11 apresentam valores inferiores a B2a, a parcela 8 mantém-se igual e as parcelas 1 e 7 aumentam ligeiramente.

- Na última campanha realizada, que ocorreu 9 meses após colocação dos Tecnosolos e 12 meses após o fogo (B4a), todas as parcelas influenciadas pela Tecnosolo apresentam valores inferiores a B3a. No caso das parcelas fora das zonas com Tecnosolo, à exceção das parcelas 1 e 8, há um aumento contínuo dos valores de B3a para B4a.

Tabela 29. Valores médios de teor em azoto por parcela (%)

	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
P1	0,40	0,37	0,32	0,33	0,28
P2	0,26	0,27	0,30	0,34	0,32
P3	0,25	0,33	0,35	0,26	0,24
P4	0,32	0,29	0,28	0,33	0,31
P5	0,27	0,25	0,22	0,36	0,26
P7	0,36	0,33	0,28	0,31	0,33
P8	0,26	0,28	0,33	0,33	0,32
P9	0,32	0,34	0,39	0,30	0,37
P11	0,40	0,19	0,37	0,31	0,38

Analisando os valores médios de teor em azoto por profundidade (Tabela 30) nas parcelas estudadas fora da faixa de Tecnosolos (P1, P7, P8, P9 e P11) verificou-se que:

- Os intervalos de valores obtidos foram de 0,35% a 0,46%, de 0,28% a 0,33%, de 0,26% a 0,31% e de 0,25% a 0,31%, correspondendo respetivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm.
- O valor médio mais elevado foi encontrado na camada mais superficial (0 a 3 cm) em todas as campanhas de amostragem, com tendência para diminuir progressivamente em profundidade.

Tabela 30. Valores médios de teor em azoto por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo

Média por Profundidade (%)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	[0-3cm]	0,46	0,35	0,39	0,37
[3-6cm]	0,31	0,28	0,31	0,30	0,33
[6-10cm]	0,29	0,26	0,29	0,30	0,31
[10-20cm]	0,25	0,26	0,31	0,29	0,30

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 31) nas parcelas estudadas na zona onde foram aplicados Tecno solos (P2, P3, P4 e P5) verificou-se que:

- Os intervalos de valores obtidos nas amostras antes da colocação do Tecno solo foram de 0,33% a 0,39%, de 0,28% a 0,29%, de 0,26% a 0,29% e 0,23%, correspondendo respectivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm.
- Após a colocação do Tecno solo, os valores relativos ao teor em azoto estão compreendidos nos intervalos de 0,36% a 0,39%, de 0,29% a 0,32%, de 0,26% a 0,31% e de 0,22% a 0,26%, correspondendo respectivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm.
- Houve uma tendência para aumento dos valores quando comparados com o cenário anterior à deposição do Tecno solo.
- Analisando os resultados obtidos em B4a é possível observar, após o aumento dos teores em azoto ocorrido em B3a, uma tendência a que estes valores se aproximem dos obtidos em B2a, havendo um pequeno decréscimo na camada mais superficial e na mais profunda. Os valores de B4a nas camadas dos 3 aos 20 cm são iguais ou muito próximos dos iniciais (Bb). De B2a para B3a o valor da camada superficial manteve-se igual, enquanto que nas restantes há um aumento que pode variar entre 11,81% e 17,50%. Por sua vez, de B3a para B4a há um decréscimo nos valores em todas as profundidades, compreendidos entre 8,80% e 21,65%.

Tabela 31. Valores médios de N por profundidade nas parcelas com Tecno solo

Média por profundidade (%)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	Tecno solo	-	-	-	0,46
[0-3cm]	0,33	0,34	0,39	0,39	0,36
[3-6cm]	0,29	0,28	0,28	0,32	0,29
[6-10cm]	0,26	0,29	0,26	0,31	0,26
[10-20cm]	0,23	0,23	0,23	0,26	0,22

Com base nestes resultados concluiu-se que não há uma tendência clara na variação do teor em azoto. Nas médias por parcela nota-se tendência para o decréscimo imediatamente após o fogo, mas na análise por profundidade essa tendência não é consistente. Neste parâmetro a influência do Tecno solo não é evidente.

5.8. Teor em Água

Tendo em conta os valores do teor em água obtidos para o Tecnosolo, verifica-se que estes são relativamente próximos em ambas as campanhas onde estão presentes (B3a e B4a), sendo o seu valor médio compreendido entre 12,57% e 14,13%.

Analisando os valores médios por parcela (Tabela 32) para as 4 profundidades estudadas, verificou-se que:

- Os valores iniciais (Bb) do teor em água encontram-se no intervalo entre 30,52% e 43,90%, sendo o seu valor médio 36,64%.
- Na campanha B1a (logo após o fogo prescrito), tal como ocorre em outras propriedades, verificou-se uma tendência para a diminuição dos valores de teor em água, em que estes variam entre 22,83 e 36,67%, e o seu valor médio é de 29,48%.
- A campanha seguinte (B2a) mostra um decréscimo nos seus valores quando comparada com B1a e com Bb, sendo o valor mínimo 13,97% e o valor máximo 27,60%. Assim sendo, o seu valor médio é de 19,70%. Em todas as parcelas, os valores de B2a mostraram-se inferiores aos de B1a.
- Em B3a (4 meses após a colocação do Tecnosolo e 7 meses após o fogo prescrito) as parcelas em que foi aplicado o Tecnosolo mostram um aumento do seu teor em água, apresentando variações entre 1% a 2%. Já as parcelas que não foram abrangidas pelo Tecnosolo apresentam teores em água inferiores em B3a relativamente a B2a, verificando-se um decréscimo entre 1% e 2%.
- Na última campanha realizada, que ocorreu 9 meses após colocação dos Tecnosolos e 12 meses após o fogo (B4a), todas as parcelas influenciadas pelo Tecnosolo apresentaram valores ligeiramente superiores a B3a. No caso das parcelas fora das zonas com Tecnosolo, as parcelas também apresentam um aumento dos valores de B3a para B4a, mas bastante superior às citadas anteriormente.

Tabela 32. Valores médios de teor em água por parcela (%)

	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
P1	34,99	27,63	19,08	10,30	20,22
P2	41,87	29,57	18,21	27,11	30,92
P3	33,28	32,91	26,08	26,80	31,83
P4	30,52	30,08	13,98	23,67	25,97
P5	34,76	28,62	13,97	27,12	29,28
P7	36,30	22,83	16,28	11,30	21,35
P8	36,46	28,68	24,42	13,87	29,11
P9	42,63	29,34	25,48	11,52	29,20
P11	43,90	36,67	27,60	25,11	34,86

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 33) nas parcelas estudadas fora da faixa de aplicação do Tecnosolo (P1, P7, P8, P9 e P11) verificou-se que:

- Os intervalos de valores obtidos foram de 10,97% a 50,80%, de 14,48% a 31,98%, de 15,44% a 32,70% e de 16,79% a 34,58%, correspondendo respetivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm. É notório o efeito da sazonalidade, o qual é mais evidente nas camadas mais próximas da superfície. Também, o efeito do Tecnosolo é visível uma vez que, nas parcelas onde foi colocado apresentam teores em água mais elevados, principalmente em B3a.
- O valor médio mais elevado encontra-se na camada mais profunda (10-20cm), sendo este de 26,96%, no entanto o valor é bastante próximo da camada mais superficial (0-3cm), que é de 26,42%.

Tabela 33. Valores médios de teor em água por profundidade nas parcelas sem Tecnosolo

Média por profundidade (%)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a	Média em Cada Profundidade
	[0-3cm]	50,80	28,38	18,54	10,97	23,40
[3-6cm]	31,98	27,95	18,93	14,48	25,58	23,79
[6-10cm]	32,70	30,39	21,74	15,44	28,01	25,66
[10-20cm]	34,58	29,35	23,30	16,79	30,79	26,96

Analisando os valores médios por profundidade (Tabela 34) nas parcelas estudadas na zona onde foram aplicados Tecnosolos (P2, P3, P4 e P5) verificou-se que:

- Os intervalos de valores obtidos foram de 18,84% a 40,91%, de 13,78% a 34,36%, de 19,42% a 32,20% e de 20,21% a 32,97%, correspondendo respetivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm. De novo é notório o efeito da sazonalidade, os valores

mais elevados ocorrem em Bb para todas as profundidades, diminuindo a influência em profundidade.

- Após a colocação do Tecnosolo, os valores do intervalo transformam-se em 25,70% a 31,42%, de 24,50% a 29,04%, de 26,54% a 29,06% e de 27,96% a 28,48%, correspondendo respectivamente às profundidades 0 a 3 cm, 3 a 6 cm, 6 a 10 cm e 10 a 20 cm. É visível um pequeno aumento nos valores quando comparados os resultados com os obtidos antes da deposição do Tecnosolo. Neste caso o efeito da sazonalidade deveria conduzir, tal como nas parcelas sem Tecnosolo, a diminuição de teor, assim considera-se que este aumento será devido ao efeito do Tecnosolo nestas parcelas.
- Há um aumento dos valores de B2a para B3a em todas as profundidades, que varia entre 26,68% e 43,76%. Comparando os resultados obtidos em B4a e B2a, verifica-se que há tendência a que a diferença entre estes valores aumente, visto que os valores de B4a são superiores a B2a e também a B3a. No caso de B3a, esta campanha apresenta valores ligeiramente inferiores a B4a, ou seja, há um aumento entre 1,80% a 18,21% de B3a para B4a.

Tabela 34. Valores médios de teor em água por profundidade nas parcelas com Tecnosolo

Média por profundidade (%)	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
	Tecnosolo	-	-	-	14,13
[0-3cm]	40,91	28,85	18,84	25,70	31,42
[3-6cm]	34,36	29,10	13,78	24,50	29,04
[6-10cm]	32,20	31,20	19,42	26,54	29,06
[10-20cm]	32,97	32,03	20,21	27,96	28,48

Com base nestes resultados conclui-se que os valores obtidos para a o teor em água do solo refletem, como seria de esperar, o efeito da sazonalidade sobre este parâmetro. A campanha de amostragem Bb foi realizada no inverno (em janeiro 2021), as campanhas B1a e B4a no início da primavera (final de março de 2021 e março de 2022), a campanha B2a no final da primavera (final de maio de 2022) e B3a no outono (final de outubro de 2022). Verifica-se que: há uma tendência para o decréscimo do teor de água no período imediatamente após o fogo, quando comparado com as condições iniciais. Neste parâmetro o impacto do Tecnosolo é visível, pois nas parcelas por ele abrangidas o teor em água na campanha B3a é superior e deixa de haver decréscimo do teor em água de B2a para B3a, o que não acontece nas restantes. Verifica-se, também, que nas parcelas com Tecnosolo, os valores obtidos em B4a são superiores aos das restantes parcelas na mesma campanha.

5.9. Relações entre as propriedades

5.9.1. pH com teor de argila (valores médios por profundidade)

Nas parcelas fora da faixa de aplicação do Tecnosolo (Tabela 35), tendo em conta valores médios por profundidade, verifica-se que quanto maior a profundidade maior o teor de argila e menor o pH em H₂O. No caso do pH em KCl, não há uma tendência clara na sua variação, visto que os valores da camada superficial e da camada 6 a 10 cm são os mesmos, enquanto o da camada 3 a 6 cm é inferior aos anteriores e por fim, a camada mais profunda é a que apresenta um valor mais alto.

Tendo em conta as parcelas sob a camada de Tecnosolo, verifica-se que quanto maior a profundidade, maior a percentagem de argila, e menores os valores de pH em H₂O. No que refere ao pH em KCl, o valor mais alto é o da camada superficial, seguido do da camada mais profunda. As camadas intermédias possuem valores muito próximos, sendo o valor de 3 a 6 cm ligeiramente inferior ao de 6 a 10 cm (Tabela 36).

Tabela 35. Média por Profundidade (Parcelas sem Tecnosolo)

Média por profundidade (Parcelas sem Tecnosolo)	Argila (%)	pH H ₂ O	pH KCl
	[0-3cm]	4,52	5,57
[3-6cm]	5,65	5,44	4,13
[6-10cm]	5,66	5,42	4,17
[10-20cm]	5,89	5,33	4,24

Tabela 36. Média por Profundidade (Parcelas com Tecnosolo)

Média por profundidade (parcelas com Tecnosolo)	Argila (%)	pH H ₂ O	pH KCl
	[0-3cm]	4,87	5,54
[3-6cm]	5,34	5,30	4,23
[6-10cm]	5,85	5,13	4,25
[10-20cm]	5,89	5,16	4,35

5.9.2. pH com teor em azoto (valores médios por profundidade)

Nas parcelas fora da faixa de aplicação do Tecnosolo, quanto maior a profundidade menor o teor em azoto (Tabela 37). No caso das parcelas em que o Tecnosolo foi depositado, verifica-se uma tendência semelhante à anterior, isto é, quanto maior a profundidade, menor o teor em azoto presente (Tabela 38). Relativamente aos ensaios de pH verifica-se, uma vez mais, uma tendência de diminuição com a profundidade no pH em H₂O, enquanto que em KCl não há um padrão aparente de variação.

Tabela 37. Média por profundidade (Parcelas sem Tecnosolo)

Média por profundidade (Parcelas sem Tecnosolo)	Azoto (%)	pH H ₂ O	pH KCl
	[0-3cm]	0,39	5,57
[3-6cm]	0,31	5,44	4,13
[6-10cm]	0,29	5,42	4,17
[10-20cm]	0,28	5,33	4,24

Tabela 38. Média por profundidade (Parcelas com Tecnosolo)

Média por profundidade (Parcelas com Tecnosolo)	Azoto (%)	pH H ₂ O	pH KCl
	[0-3cm]	0,36	5,54
[3-6cm]	0,29	5,30	4,23
[6-10cm]	0,27	5,13	4,25
[10-20cm]	0,23	5,16	4,35

5.9.3. Evolução temporal (valores médios por campanha)

Analisando os valores médios por campanha das propriedades estudadas (Tabela 39), verifica-se que: (i) os ensaios de pH e o teor em argila têm comportamentos similares, verificando-se um aumento de seus valores de Bb para B1a, seguidos de uma diminuição em B2a e um aumento gradual de B3a a B4a; (ii) no caso da condutividade elétrica e do teor em azoto, é visível uma diminuição nos valores de B1a quando comparados com Bb, seguidos de um aumento de B1a para B2a. Já em B3a os valores da condutividade elétrica continuam a aumentar, enquanto o teor de azoto se mantém igual; (iii) de B3a para B4a há uma diminuição dos valores da MO, N e CE, que é mais acentuada na condutividade elétrica; (iv) a matéria orgânica apresentou um aumento em B1a quando comparada com Bb, mas a partir desse momento ocorreu uma diminuição progressiva nas restantes campanhas.

Tabela 39. Valores médios por campanha das propriedades

Propriedades	Bb	B1a	B2a	B3a	B4a
Condutividade Elétrica	33,58	-	+	+	--
Matéria Orgânica	12,69	+	-	-	-
Teor de Azoto	0,31	-	+	=	-
pH H2O	4,93	+	-	+	+
pH KCl	4,13	+	-	+	+
Teor de Argila	5,39	+	-	+	++

Legenda:

(-) – Diminuição Ligeira

(+) – Aumento Ligeiro

(=) – Pouca/nenhuma variação

(--) – Diminuição elevada

(++) – Aumento elevada

Capítulo VI

Considerações Finais

(página propositadamente em branco)

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação teve como principal finalidade analisar as variações nas propriedades de um solo, antes e após aplicação de um Tecnosolo “à medida” em um ambiente no qual foi aplicado fogo controlado. A estratégia utilizada foi inovadora, visto que, é pouco comum haver métodos de prevenção ou recuperação aplicados em solos que foram sujeitos a este tipo de circunstância. A investigação realizada foi necessária para entender as consequências do fogo sobre os solos e, principalmente, avaliar o papel desempenhado pela aplicação de um Tecnosolo “à medida” como medida de correção e mitigação.

Através das análises executadas, concluiu-se que algumas propriedades foram mais influenciadas pelo fogo controlado e pela adição do Tecnosolo comparativamente às restantes estudadas.

No estudo dos resultados da análise química elementar simplificada, verificou-se que não há grande variação entre a concentração dos elementos antes e após o incêndio. Relativamente à aplicação do Tecnosolo, além de promover a variação das concentrações de alguns elementos pré-existentes no solo, também é responsável pelo aparecimento de novos elementos não detetados previamente.

A textura do solo pouco variou quando comparado os cenários pré e pós fogo. A composição elementar, também foi influenciada pela aplicação do Tecnosolo, sendo a quantidade de areia nas amostras o fator mais afetado. No entanto, a variação sofrida não foi suficiente para alterar a classificação do solo em estudo, que permaneceu franco-siltoso mesmo após a deposição do Tecnosolo.

A condutividade elétrica foi a propriedade em que o efeito do fogo e do Tecnosolo foi mais notório. O incêndio foi responsável pela diminuição dos valores da CE em quase todas as parcelas, à exceção de P3, P7 e P9. A aplicação do Tecnosolo causou um aumento elevado dos seus valores, principalmente quando comparados com os obtidos nas parcelas sem Tecnosolo. No entanto, essa variação não será permanente, visto que nos resultados analisados observou-se uma clara tendência para a sua diminuição com o avançar do tempo. Ainda assim, as parcelas com Tecnosolo apresentaram valores de CE muito superiores às restantes.

No caso dos ensaios realizados para determinação do pH em H₂O e KCl, verificou-se que em H₂O o pH aumentou em todas as parcelas, quando comparados os valores anteriores ao incêndio com os posteriores. No caso do pH em KCl foi bastante similar, à exceção da parcela P1 em que o pH diminuiu. Nesta propriedade o Tecnosolo não teve grande influência, visto que quando comparadas as parcelas com e sem Tecnosolo não foi visível uma diferença elevada entre os valores. No entanto, entre os dois ensaios, o pH em H₂O foi o que apresentou uma maior variação de valores e os valores de pH mais altos obtidos.

Quanto à presença de matéria orgânica, ao contrário do esperado, com o fogo controlado, os seus valores pós-fogo só foram inferiores ao pré-fogo em P5, P7, P8 e P11. Considerando a aplicação do Tecno solo, foi visível que as parcelas em que o seu valor mais diminuiu ao longo do período de tempo estudado, foram as que não apresentavam Tecno solo. Essa variação foi notória principalmente nas camadas mais superficiais. Em contrapartida, a aplicação do Tecno solo ajudou a restabelecer a concentração de MO nas zonas em que foi aplicado e traduziu uma tendência para que esses valores sejam ainda mais elevados com o passar do tempo.

A análise ao teor de carbono orgânico total revelou que após o fogo, a concentração aumentou nas parcelas P3, P5, P8 e P9 e nas restantes diminuiu. As parcelas em que o Tecno solo foi aplicado mostram uma concentração mais elevada quando comparadas às que se mantiveram inalteradas. O ponto em comum em ambas é o facto de todos os valores mais elevados se encontrarem nas camadas mais superficiais.

Relativamente à concentração de azoto presente no solo, os valores pós-incêndio são superiores nas parcelas P2, P3, P8 e P9, sendo que nas restantes são inferiores aos valores do pré-fogo. Com a aplicação do Tecno solo, não foi visível uma tendência clara na sua variação, não sendo possível afirmar que o Tecno solo influenciou de algum modo a evolução dos valores desta propriedade.

Por fim, o teor em água do solo, tal como esperado, foi inferior em todas as parcelas após o fogo controlado. Relativamente à presença do Tecno solo, traduziu-se como tendo uma variação que é concordante com as diferentes estações do ano, mas mesmo assim a influência do Tecno solo foi visível, visto que houve um aumento do teor em água após sua aplicação e os valores mais elevados obtidos foram obtidos nas parcelas com Tecno solo, pertencentes à campanha B4a.

Tendo essas informações em consideração, concluiu-se que o fogo controlado influencia a maioria das propriedades estudadas, à exceção da análise química elementar simplificada e da textura. De um modo geral, o Tecno solo cumpriu com a sua proposta inicial, o restabelecimento e/ou melhoria das propriedades presentes no solo, antes deste ser atingido pelo fogo. No entanto, vale ressaltar que alguns dos resultados obtidos não estão totalmente de acordo com o esperado, o que poderá estar relacionado com atividades antrópicas na região onde as amostras foram colhidas, com uma tentativa de execução de um fogo controlado anterior ao realizado e com o facto do fogo aplicado ser de baixa intensidade.

Bibliografia e Referências Bibliográficas

(página propositadamente em branco)

-
- Agbeshie, A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., Awuah, R., 2022. A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33: 1-23. 10.1007/s11676-022-01475-4.
- Alauzis, M.V., Mazzarino, M.J., Raffaele, E., Roselli, L., 2004. Wildfires in NW Patagonia: long-term effects on a *Nothofagus* forest soil. *Forest Ecology and Management*, 192(2–3):131-142.
- Albergaria, J.T., Alvim-Ferraz, M.C.M., Delerue-Matos, C., 2008. Soil vapor extraction in sandy soils: Influence of airflow rate, *Chemosphere*, 73(9): 1557-1561.
- Albergaria, J.T., Delerue-Matos, C., Alvim-Ferraz, M.C.M., 2006. Remediation Efficiency of Vapour Extraction of Sandy Soils Contaminated with Cyclohexane: Influence of air flow rate and of water and natural organic matter contents. *Environmental Pollution*, 143(1):146-152.
- Alexander, H. D., Natali, S. M., Loranty, M. M., Ludwig, S. M., Spektor, V. V., Davydov, S., Zimov, N., Trujillo, I., Mack, M. C., 2018. Impacts of increased soil burn severity on larch forest regeneration on permafrost soils of far northeastern Siberia, *Forest Ecology and Management*, 417: 144-153, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.008>.
- Alves, D., 2021. Efeito do fogo prescrito nas propriedades físico-químicas dos solos: estudo de caso. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, Dissertação de Mestrado (URI: <http://hdl.handle.net/10400.22/19331>)
- Andreu, V., Imeson, A.C., Rubio, J.L., 2001. Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *Catena*, 44(1): 69-84.
- APA, 2021. O Relatório do Estado do Ambiente (REA). APA, Lisboa.
- Arán, D.; Antelo, J.; Fiol, S.; Macías, F., 2021. Immobilization of phosphate by a Technosol spolic silandic: kinetics, equilibrium and dependency on environmental variables. *Journal of Soils Sediments* 18:2914–2923. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1970-y>
- Araújo, B.; Moraes, H.; Santos, P.; Alves, D.; Fernandes, M. J.; Carvalho, M. M.; Teixeira, S.; Delarue-Matos, C., 2022. Influence of fire on pH and electrical conductivity of forest soils - case study.
- Arocena, J.M., Opio, C., 2003. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma*, 113(1–2):1-16.
- Askenasy, P.E., W.L. Joseph, and A.L. Senkayi, 1997. Concepts and criteria for evaluating topsoil substitutes: The Texas experience. ASMR Proceedings, 14th Annual Meeting.
- Baehr, A.L., Hoag, G.E., Marley, M.C., 1989. Removing volatile contaminants from the unsaturated zone by inducing advective air-phase transport. *Journal of Contaminant Hydrology*, 4:1-26.

Batista, A.C., Reissmann, C.B., Soares, R.V., 1998. Efeitos da queima controlada sobre algumas propriedades químicas do solo em um povoamento de *Pinus taeda* no município de Sengés – PR. Floresta 27(1/2):59-70.

Bayer, C., Mielniczuk, J., Amado, T. J. C., Martin-Neto, L., Fernandes, S. V., 2000. Organic Matter Storage In A Sandy Clay Loam Acrisol Affected By Tillage And Cropping Systems In Southern Brazil. Soil Tillage Research, 54:101-109.

Beyers, J., Brown, J., Busse, M., Debano, L., Elliot, W., Folliott, P. et al., 2008. Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soils and water. Lincoln: University of Nebraska, United States Department of Agriculture, Rocky Mountain Research Station.

Brady N. & R. Weil., 2002. The nature and properties of soils. 13th Edition. Pearson Prentis Hall. 960 pp.

Bruce, J. P., Frome, M., Haites, E., Janzen, H., Lal, R., Paustian, K., 1999. Carbon Sequestration in Soils. Journal Soil Water and Conservation, 54:382-389

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., Brussaard, L., 2018. Soil quality: A critical review. Soil Biology and Biochemistry, 120:105-125, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

Campo, J., Andreu, V., Gimeno-García, E., González, O., Rubio, J.L., 2006. Occurrence of soil erosion after repeated experimental fires in a Mediterranean environment. Geomorphology, 82(3–4):376-387

Carta de Solos de Portugal, segundo o Atlas Digital do Ambiente, 2002. Disponível em: <https://florestas.pt/conhecer/o-estudo-do-solo-a-pedologia-e-as-cartas-de-solo-em-portugal/>.

Consultado a 5 de Abril de 2023.

Ceballos, A., 1999, Procesos hidrológicos en una pequeña cuenca hidrográfica bajo explotación de Dehesa en Extremadura, Universidad de Extremadura, Cáceres, España.

Centeno, L.N, Guevara, M.D.F., Cecconello, S.T., Sousa, R.O.D., Timm, L.C., 2017. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. RBES, Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade, 4(1):31-37.

Cerdà, A., 1997. Distribución de la humedad del suelo en las cárcavas del sur del País Valenciano. Cuadernos de Geografía, 61:1-13.

-
- Cerdá, A., Doerr, H. S., 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74(3):256-263.
- Certini G., Ugolini F.C., 2013. An updated, expanded, universal definition of soil. *Geoderma*, 192:378-379.
- Certini, G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143(1): 1– 10.
- Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S., Baker, A.J.M., 1997. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 3:279-284.
- Chesworth, W., 2006. The enemy within, Chapter 3. In Lavigne. D.M., ed., *Gaining Ground*. Guelph, Canada; Limerick, Ireland: published by IFAW/University of Limerick, pp. 31–42.
- Chesworth, W., 2008. *Encyclopedia of Soil Science Series: Encyclopedia of Earth Sciences Series XXVI*, 902 p. Springer.
- Chesworth, W., and Macias-Vasquez, F., 1985. pe, pH and podzolization. *Am. J. Sci.*, 285: 128–146.
- Clementino M., Neto P., Alencar J., 2007. Carbono orgânico total: metodologia analítica e aplicações para indústria farmacêutica, *Rev. Bras. Farm.*, 89(1).
- Coelho, C., 2001. Efeitos dos Incêndios Florestais sobre a erosão e a degradação do solo. In Ministério da Administração Interna – SEAMAI (ed.). *A floresta que futuro?* 135-146. Instituto Nacional de Administração (INA).
- Comissão Europeia, 2009. Fogos Florestais na Europa 2008. Report 9 EUR 23971 EN.
- Costa, J.B., 2004. *Caracterização e constituição do solo*, 7ª edição, Lisboa, Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian.
- Craul, P.J., 1999. *Urban Soils: Applications and Practices*. John Wiley and Sons.
- Cuesta, J. R. & Giraldo, I. O., 2013. Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. *Estado del Arte*. pp. 1-9.
- Darmody, R. G., Daniels, W.L., Marlin, J.C., Cremeens, D.L., 2009. Topsoil: what is it and who cares?. In: National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, ASMR, Lexington, KY.
- DeBano, L. F., 1989. Effects of fire on chaparral soils in Arizona and California and postfire management implications. In: Berg, N., ed., *Fire and watershed management: symposium proceedings; 1988 October 16-28; Sacramento, CA*. Gen. Tech. Rep. PSW-109. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station: 55-62.

Debano, L.F., Neary, D.G., Folliot, P.F., 1998. Fere's effects on ecosystems. New York: John Wiley and Sons.

Domenico, P. A., Schwartz, F. W., 1997. Physical and chemical hydrogeology.

Fang, W., Hu, R., and Wu, P., 2001. Influence of black shales on soils and edible plants in the Ankang Area, Shaanxi Province, P. R. of China. *Environ. Geochem. Health*, 24: 35–46.

FAO, 2014. Lecture notes on the major soils of the world. *World Soil Resources Reports*, 94. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 334 pp.

Fernandes, M.M., 2017. *Mecânica dos Solos - Volume 1: Conceitos e Princípios Fundamentais* (5ª Edição). Upress, Porto.

Fernandes, R.C., Cordovil, C.M., De Varennes, A., 2009. Use of organic residues to recover nutrients and organic matter pools AFTER FOREST FIRES. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa, Portugal.

Ferreira, A., 2000. Caracterização de Portugal Continental. Capítulo II.

Ferreira, A.D., Coelho, C., Silva, J.S., Esteves, T., 2010. Efeitos do Fogo no Solo e no Regime Hidrológico. Editores: Moreira, F., Catry, F.X., Silva, J.S., Rego, F. *Ecologia do Fogo e Gestão de Áreas Áridas*. Editora: ISA Press, Lisboa.

Ferreira-Leite, F., Bento-Gonçalves, A., Lourenço, L., Úbeda, X., & Vieira, A., 2013. Grandes Incêndios Florestais em Portugal Continental como Resultado das Perturbações nos Regimes de Fogo no Mundo Mediterrâneo. *Silva Lusitana*, nº Especial, pp. 127-142.

Ferreira-Leite, F., Bento-Gonçalvez, A., & Lourenço, L., 2012. Grandes incêndios florestais em Portugal Continental. Da história recente à atualidade. *Cadernos de Geografia*, Coimbra, FLUC, 30/31:81-86.

Fetter, C. W., 2008. *Contaminant Hydrogeology*. 3rd edition, Waveland Press, Inc.

Figueiredo, T., 1990. Aplicação da equação universal de perda de solo na estimativa da erosão potencial: o caso do Parque Natural de Montesinho. Bragança: Escola Superior Agrária de Bragança.

Filgueira, C. F., & Vega, J. A., 2011. Erosión después de incendios forestales. *Boletín del CIDEU* (10):23-36.

Fitz Patrick, E.A., 1986. *An Introduction to Soil Science*. 2nd edn, Essex, England/ New York: Longman Scientific & Technical/Wiley, 255 pp.

Florescu, D, Iordache, A. Costinel, D. Horj, E. Ionete, R. Culea, M., 2011. Validation Procedure for Assessing the Total Organic Carbon in Water Samples. *Romanian Journal of Physics*, 58(1–2):211–219.

Freitas, A., Gonçalves, T.P., 2004. Impacto das queimadas no solo à superfície.

Frouz, J., 2021. *Soils and Landscape Restoration*.

FRTR, Federal Remediation Technologies Roundtable, 2010. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, <http://www.frtr.gov//matrix2/section4/D01-4-4.html>

Gan, S., Lau, E.V., Ng, H.K., 2009. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Journal of Hazardous Materials*, 2-3:532-549.

Gerasimova, M.; Lebedeva-Verba, M., 2010. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths.

Gómez-Plaza, A., Alvarez-rogel, J., Albaladejo, J., Castillo, V. M., 2000. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in semiarid environment. *Hydrological Processes*, 14:1261-1277.

González, C., 2009. El fuego, la quema de pastos y sus consecuencias. Colegio De Ciencias Agrícolas. Puerto Rico.

González, F., Almendros, G., González J., Knicker, H., González, R., Hernández, Z. et al., 2009. Transformaciones de la materia orgánica del suelo por incendios naturales y calentamientos controlados en condiciones de laboratorio. Cátedra de divulgación de la ciencia. Valencia.

González, R., 2011. Impacto de los incendios forestales en la materia orgánica de los suelos. Tesis doctoral. CSIC. Sevilla.

González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H., 2004. The effect of fire on soil organic matter: a review. *Environment International*, 30(6):855-70.

Grasso D., 1993. Hazardous waste site remediation: source control. Connecticut, USA, Lewis Publisher.

Grego, C. R., Rabello, L. M., Brancalhão, S. R., Vieira, S. R., Oliveira, A., 2011. Geoestatística aplicada a condutividade elétrica do solo e altitude do solo cultivado com cana-de-açúcar. In: Inamasu, R. Y., Naime, J. M., Resende, A. V., Bassoi, L. H., Bernardi, A. C. (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos: Embrapa Instrumentação, p. 245-248.

Hartemink, A.E., 2016. The definition of soil since the early 1800s. *Advances in Agronomy*, 137: 73-126

Hatten, J., & Liles, G., 2019. A 'healthy' balance: The role of physical and chemical properties in maintaining forest soil function in a changing world. 36: 373–396. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63998-1.00015-x>

Hossain, S., Islam, A., Badhon, F., & Imtiaz, T., 2021. Properties and Behavior of Soil – Online Lab Manual (G. Bowers (ed.)). Mavs Open Press. <https://uta.pressbooks.pub/soilmechanics/>

ICNF, 2017. RELATÓRIO PROVISÓRIO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS.

ICNF, 2020. Mapa de áreas ardidas em Portugal.

ICNF, 2022. 8.º RELATÓRIO PROVISÓRIO DE INCÊNDIOS RURAIS - Divisão de Gestão do Programa de Fogos Rurais.

Iglésias, M. P. L., Ribeiro, M. L. & Ribeiro, A., 1983. La interpretación aloctonista de la estructura del Noroeste Peninsular. In: Libro Jubilar J.M. Rios, Geología España, Inst. Geol. Min., España, 1: 459-467.

Illston, B. G., Basara, J. B., Crawford, K. C., 2004. Seasonal to interannual variations of soil moisture measured in Oklahoma. *International Journal of Climatology*, 24:1883-1896.

IPMA, 2021. Boletim Climático Globo e Europa Portugal.

IPMA, 2022. Boletim Sazonal Inverno 2021/2022.

IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106, Rome: FAO.

Ko, H., Choo, H., Ji, K., 2023. Effect of temperature on electrical conductivity of soils – Role of surface conduction, *Engineering Geology*, 321: 10714, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107147>.

Kuo, J., 1998. Practical Design Calculations for Groundwater and Soil Remediation.

LaGrega, M., Buckingham, F., Evans, J., 2000. Hazardous Waste Management.

Lo Papa G., Dazzi C., 2022. A new definition of soil to promote soil awareness, sustainability, security and governance. *International Soil and Water Conservation Research* 10(1):99-108.

Lourenço, L., 1994. Risco de incêndio florestal em Portugal Continental. *Informação Florestal*, Lisboa, 4:22-32.

MacAdam, J.W., Volenec, J.J., Nelson, C.J., 1989. Effects of nitrogen on mesophyll cell division and epidermal cell elongation in tall fescue leaf blades. *Plant Physiology*, 89:549-556.

Madeira, M., & Monteiro, F. M., 2004. A Base de Referência para os Solos do Mundo e a Classificação dos Solos de Portugal. *Revista de Ciências Agrárias*, pp. 7-12.

Mariano, A.P., Kataoka A.P., Angelis D.F. e Bonotto D.M., 2007. Laboratory study on the bioremediation of diesel oil contaminated soil from a petrol station, *Brazilian Journal of Microbiology*, 38:346–353.

Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordan, A., Zavala, L.M., 2011. Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Sci. Rev.* 109:44–60. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002>.

Matos Leite, M., 2011. Impacto dos incêndios nas propriedades dos solos em áreas de montanha sob coberto de matos. IPB, Bragança, Dissertação de mestrado (URI: <http://hdl.handle.net/10198/6811>)

Mattos, B.S., Bertolino, A.V., Bertolino, L. C., 2022. A influência do fogo nas propriedades de um solo sob manejo de agricultura de corte e queima em ambiente serrano no bioma de Mata Atlântica. *Sociedade e Natureza, Uberlândia*, 34:e63656.

Meireles, C., Pereira D. I., Caetano Alves, M. I., Pereira, P., 1999. Inventariação e caracterização do Património Geológico na área do Parque Natural de Montesinho (PNM, NE de Portugal) – contributo para o seu Plano de Ordenamento.

Meireles, C., Pereira, D. I., Alves, M. I. C. & Pereira, P., 2002. Interesse patrimonial dos aspectos geológicos e geomorfológicos da região de Aveleda-Baçal (Parque Natural de Montesinho, NE Portugal). *Comunicações, Instituto Geológico e Mineiro* 89:225-238.

Mitchell, R. J., Liu, Y., O'Brien, J. J., Elliott, K. J., Starr, G., Miniati, C. F., Hiers, J. K., 2014. Future climate and fire interactions in the southeastern region of the United States, *Forest Ecology and Management*, 327:316-326, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.003>.

Moraes, H., Araújo, B., Santos, P., Alves, D., Fernandes, M. J., Vázquez, F. M., Teixeira, S., Carvalho, M.M., Delerue-Matos, C., 2022. Use of Technosoil in the recovery of burned forest soils - case study. Disponível no livro de resumos do IJUP.

Moreira, F., Catry, F., Silva, J., Rego, F., 2010. *Ecologia do fogo e gestão de áreas ardidas*. Isapress, Lisboa, 323 p.

Moreira, L., Rosa, L.J., Lourenço, J., Barroso, I., Pimenta, V., 1997. Parque Natural de Montesinho. Projecto Lobo. Relatório de Progressão 1996. Ministério do Ambiente e dos recursos Naturais. Instituto da Conservação da Natureza.

Nunes, A., 2010. Análise Comparativa Da Humidade Do Solo Sob Diferentes Usos e Cobertos Vegetais. VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física. II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física.

Pardini, G., Gispert, M., Dunjó, G., 2004. Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Science of the Total Environment* 328:237-246.

Patil, S., Ghadi, H., Ramgir, N., Adhikari, A., & Rao, V. R., 2019. Monitoring soil pH variation using Polyaniline/SU-8 composite film based conductometric microsensor. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 286: 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.02.016>

Pavlů, L, Kodešová, R., Vašát, R, Fér, M., Klement, A., Nikodem, A., Kapička, A., 2022. Estimation of the stability of topsoil aggregates in areas affected by water erosion using selected soil and terrain properties. *Soil and Tillage Research*, 219:105348.

Pereira, J.S., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, J.N., Silva, T.P., 2006. Incêndios Florestais em Portugal. Caracterização, Impactes e Prevenção, Cap.6, ISA press, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Pereira, P., Pereira D. I., Caetano Alves, M. I., Meireles, C., 1999. Geomorfologia do Parque Natural de Montesinho: controlo estrutural e superfícies de aplanamento. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, nº esp. V, pp. C61-C64.

Pinto, R., 2009. Recuperação de um solo florestal queimado por aplicação de resíduos orgânicos. Respiração induzida por substrato dos microrganismos do solo. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, Dissertação de Mestrado. (URI: <http://hdl.handle.net/10400.5/2077>)

Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Roquero de Laburu, C., 2003. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*, 830.

Reinert, D. J., & Reichert, J. M., 2006. Propriedades físicas do solo. Departamento de Solos, UFSM, 1-18.

Rheinheimer, S., Santos, J.C., Fernandes, V.B., Almeida, A.L., 2003. Modificações nos atributos químicos de solo sob campo nativo submetido à queima. *Brasil. Ciência Rural*, 33(1), <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000100008>

Ribeiro, A., 1974. Contribution à l'étude Tectonique de Trás-os-Montes Oriental. *Mem. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, nº 24 (Nova Série), 168 pp.

-
- Robichaud, Peter., 2000. Fire Effects on Infiltration Rates After Prescribed Fire in Northern Rocky Mountain Forests, USA. *Journal of Hydrology*, 231-232:220-229. 10.1016/S0022-1694(00)00196-7.
- Rodrigues, M. A., & Coutinho, J. F., 2000. Eficiência de utilização do azoto pelas plantas. [<https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/205/1/47%20-%20Efici%C3%A2ncia%20de%20utiliza%C3%A7%C3%A3o%20de%20azoto%20pelas%20plantas.pdf>]
- Roshan, A., & Biswas, A., 2023. Fire-induced geochemical changes in soil: Implication for the element cycling, *Science of The Total Environment*, 868:161714.
- Salt, D. E., Smith, R. D., Raskin, I., 1998. Phytoremediation, *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49:643-668.
- San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Maianti, P., Libertá, G., Artés-Vivancos, T., Oom, D., Branco, A., de Rigo, D., Ferrari, D., Pfeiffer, H., Grecchi, R., Onida, M., Löffler, P., 2022. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2021, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/34094, JRC130846.
- Santos Pereira, D.A., 2016. Implementação e validação de um método analítico para determinação de carbono orgânico total. Universidade Nova de Lisboa, Dissertação de mestrado (URI: <http://hdl.handle.net/10362/19709>).
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Lumbreras, J. F., Coelho, M.R., Almeida, J.A., Araujo Filho, J. C., Oliveira, J. B., Cunha, T.J.F., 2018. Sistema Brasileiro de classificação de solos, 1: 44-48.
- Sawyer, C., McCarty, P., Parkin, G., 2002. *Chemistry for environmental engineering and science*. McGraw-Hill Education, USA.
- Schirrmann, M., Gebbers, R., Kramer, E., & Seidel, J., 2011. Soil pH Mapping with an On-The-Go Sensor. *Sensors*, 11(1):573–598. <https://doi.org/10.3390/s110100573>
- Schnoor, J.L., 1996. *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil*. Wiley-Interscience, USA.
- Silva, J.S., Vasconcelos, T., 2002. *Manual de Silvicultura para a Prevenção de Incêndios Florestais*, Cap I e V, DGF – Direcção Geral das Florestas, Lisboa
- SSDS, 2017. Soil survey manual agriculture. Handbook No. 18. USDA, Natural Resources Conservation Service, 18(18):483.
- Stegmann R., Brunner G., Calmano W., Matz G., 2001. Treatment of contaminated soil.
-

SWIFT, R. S. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, v. 166, p. 858-871, 2001.

TERRAMATER, 2022. Caracterização química dos solos da área-piloto de Aveleda – Bragança – Portugal. Relatório técnico-científico do projeto TERRAMATER. ISEP, Porto. (Autores: Maria João Fernandes; Patrícia Santos; Salomé Teixeira; Maria Manuela Carvalho; Cristina Delerue-Matos.)

Thomaz, E. L., 2021. Effects of fire on the aggregate stability of clayey soils: A meta-analysis. *Earth-Science Reviews*, 221:103802.

USEPA, 2007. The Use of Soil Amendments for Remediation, Revitalization and Reuse, Solid Waste and Emergency Response (5203P), EPA 542-R-07-013 December 2007 www.epa.gov.

Valani, G. P., Martíni, A. F., Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. de C., & Cooper, M., 2022. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, 220: 105357. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2022.105357>.

Vega, J., Landsberg. J., Bará, S., Paysen, T., Fontúrbe L, M. y Alonso, M., 2000. Efectos del fuego prescrito bajo arbolado de *P. pinaster* en suelos forestales de Galicia y Andalucía. *Cuadernos de la S.E.C.R.*, 9:123-136.

Veloso, C. A.C., Borges, A. L., Muniz, A. S. J. M., Veigas, I. A., 1992. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. *Scientia Agricola* 49:123-128. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161992000400016>.

Ventura, J., Vasconcelos, M.J., 2006. O fogo como processo físico-químico e ecológico, Incêndios Florestais em Portugal, Caracterização, Impactes e Prevenção, ISAPress, Lisboa, 93: 113.

Viegas, D.X., 2006. Comportamento do fogo e segurança pessoal. *Jornadas de prevención de Riesgos Laborales y Ambientales Sevilla*.

Wells, C., Campbell, R.E., DeBano, L.F., Lewis, C.E., Fredricksen, R.L., Franklin, E.C., Froelich, R.C., Dunn, P.H., 1979. Effects of fire on soil: a state of knowledge review. *Gen. Tech. Rep.*, Washington, U.S.D.A. Forest Service: 34.

Werth, C.J., Cunningham, J., Reinhard, M., Roberts, P.V., 1997. Effects of grain scale mass transfer on the transport of volatile organics through sediments: 2. Column results, *Water Resources Research*, 33:2727–2740.

Yong, R.N., Taheri, E., Khodadadi, A., Khodadadi, A., 2007. Evaluation of Remediation Methods for Soils Contaminated with Benzo[a]Pyrene, *International Journal of Environmental Research*, 1(4):341-346.

Yuan, Y., Liu, S., Wu, M., Zhong, M., Shahid, M. Z., Liu, Y., 2021. Effects of topography and soil properties on the distribution and fractionation of REEs in topsoil: A case study in Sichuan Basin, China. *The Science of The Total Environment*, 791: 148404.

Zech, W., & Hintermaier-Erhard, G., 2008. *Soils of the World*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag. 130 pp.

Zheng, C., Bennett, G.D., 2002. *Applied contaminant transport modeling*. Wiley.