

Efeitos de curta duração do fogo controlado em propriedades e processos físicos do solo: um exemplo em áreas de matos do Parque Natural de Montesinho

Eloiza de Lima Piovesan

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

Orientada por
Professor Doutor Tomás D'Aquino Rosa de Figueiredo (ESA-IPB)
Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca (ESA-IPB)
Professora Doutora Giovana Clarice Poggere (UTFPR-MD)

Bragança

2021

“A sabedoria é um paradoxo. O homem que mais sabe é aquele que mais reconhece a vastidão da sua ignorância.” (Friedrich Nietzsche)

ELOIZA DE LIMA PIOVESAN

**Efeitos de curta duração do fogo controlado em
propriedades e processos físicos do solo: um
exemplo em áreas de matos do Parque Natural
de Montesinho**

Trabalho apresentado ao Instituto
Politécnico de Bragança, como requisito
para conclusão da dissertação do mestrado
em Tecnologia Ambiental no âmbito da
dupla diplomação com a Universidade
Tecnológica Federal do Paraná

Bragança

2021

iii

Agradecimentos

Ao professor doutor Tomás Figueiredo, que além de ótimo orientador, é um ótimo professor e amigo, obrigada imensamente.

A professora doutora Giovana Poggere, que mesmo distante, me deu todo suporte necessário.

A professora doutora Felícia Fonseca, que auxiliou e colaborou muito na elaboração deste trabalho.

Ao meus colegas de laboratório, que colaboraram na realização das análises.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por me proporcionar essa oportunidade acadêmica, e ao Instituto Politécnico de Bragança pelo acolhimento.

A minha família, em especial a minha mãe Marcia Lima, ao meu pai Luiz Piovesan e a minha tia Marli Lima, que me deram o suporte nos momentos em que mais precisei.

Aos meus amigos Alan Silva, André Assis, Tamires Bertocco, Thayane Ribeiro, Rafael Rezende e demais, que me deram força e carinho, estando a quilômetros de casa.

A mim, que mesmo com todas as adversidades encontradas, consegui concluir mais essa etapa.

Aos seres de luz e guias espirituais, que me ajudaram e ajudam nesta caminhada.

A todos a minha imensa gratidão!

Resumo

O fogo produz efeitos adversos no solo, alterando as suas propriedades físicas, químicas, biológicas e mineralógicas. O Parque Natural de Montesinho (PNM), apresenta 1/3 da sua área coberto por áreas de matos, que são altamente inflamáveis, e combinado as características mediterrânicas do ambiente, elevam o risco de incêndios. O fogo controlado é uma medida preventiva do risco de incêndio, diminuindo a biomassa combustível, que admite-se ter baixo impacto sobre o solo, face à sua baixa intensidade.

Este estudo focou-se nas alterações das propriedades e processos físicos do solo, após a aplicação de fogo controlado numa área de matos do PNM, vizinha de um povoamento florestal de resinosas. As propriedades físicas foram analisadas em três momentos: antes, imediatamente pós fogo e dois meses pós fogo. Em 11 pontos de amostragem foram tomadas amostras não perturbadas na camada 0-5 cm, em anéis metálicos 100 cm³. As determinações laboratoriais incluíram permeabilidade saturada, densidade aparente, capacidade máxima para a água, capacidade de campo, porosidade (macro-, micro- e total).

A densidade aparente e os macroporos aumentaram significativamente, assim como a capacidade máxima para água, a capacidade de campo, e o armazenamento de água, sofreram uma diminuição; para além disso, a porosidade total e a permeabilidade diminuíram, mesmo que não significativamente. Contudo, a combinação de todas essas mudanças consta que a dinâmica hidrológica do solo se alterou após o fogo, entretanto, tendendo a voltar ao estágio anterior ao fogo controlado, no momento dois meses após o fogo.

A perda de solo e o escoamento foram monitorados durante 3 meses após a queima, através da inserção de 8 microparcels de 4m², 4 delas localizadas em um declive mais acentuado e 4 em declive menor. A precipitação total durante o monitoramento foi de 80,2 mm, resultando em uma média de 0,616 mm em escoamento e 19,51 (g.m⁻²) em perda de solo, para o declive mais baixo e 2,39 mm e 22,95 (g.m⁻²) para o declive mais acentuado. Embora o período de monitoramento fosse curto, pode-se notar que houve uma perda de solo ocasionada pelo fogo e um efeito do declive, quanto ao escoamento.

Entende-se que a contribuição deste trabalho para a investigação dos impactos do fogo controlado nas propriedades e processos físicos do solo em áreas de matos permite um conhecimento mais amplo dos efeitos a curto prazo no Parque Natural de Montesinho, NE Portugal.

Palavras-chave: Áreas ardidas; Recuperação pós fogo; Matos; Propriedades Físicas do solo; Erosão

Abstract

Fire produces adverse effects on soil, altering its physical, chemical, biological, and mineralogical properties. The Montesinho natural park (MNP), has 1/3 of its area covered by shrublands, which are highly flammable, and combined by the Mediterranean characteristics of the environment, increase the risk of fires. Prescribed fire is a preventive measure of the risk of wildfire, reducing fuel biomass, which is admitted having low impact on the soil, given its low intensity.

This study focused on changes in soil physical properties and processes after the application of prescribed fire in a shrubland area of MNP, neighboring a resinous forest settlement. The physical properties were analyzed in three moments: before, immediately after fire and two months after fire. At 11 sampling point, undisturbed samples were taken in the 0 – 5cm layer, in 100 cm³ metal rings. Laboratory determinations included saturated permeability, bulk density, maximum water capacity, field capacity and porosity (macro-, micro-, and total).

The bulk density and macropores increased significantly, as well as the maximum water capacity, field capacity, and water storage, decreased; in addition, total porosity and permeability decreased, even if not significantly. However, the combination of all these changes is reported that the hydrological dynamics of the soil changed after the fire, however, tending to return to the stage prior to the controlled fire, at the moment two months after the fire.

Soil loss and runoff were monitored for 3 months after burning, through the insertion of 8 microplots of 4m², 4 of them located on a steeper slope and 4 on a flatter slope. The total precipitation during monitoring was 80.2 mm, resulting in an average of 0.616 mm in runoff and 19.51 (g.m⁻²) in soil loss, for the lower slope and 2.39 mm and 22.95 (g.m⁻²) for the steepest slope. Although the monitoring period was short, it can be noted that there was a soil loss caused by fire and a slope effect on runoff.

It is understood that the contribution of this work to the investigation of the impacts of controlled fire on the properties and physical processes of the soil in shrublands areas allows a broader knowledge of the short-term effects in the Natural Park of Montesinho, NE Portugal.

Keywords: Burned areas; Post-fire recovery; Scrubs; Soil physical properties; Erosion.

Índice Geral

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	x
Índice de Quadros	xii
1. INTRODUÇÃO	13
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Solos	15
2.1.1 Formação e Importância dos solos.....	15
2.2.2 Perfil e horizontes do solo	16
2.2.3 Propriedades físicas do Solo	17
2.2.4 Propriedades químicas do solo	18
2.2 Erosão.....	19
2.2.1 Erosão Hídrica.....	20
2.3 Parque Natural de Montesinho (PNM)	20
2.3.1 O solo do PNM.....	21
2.3.2 Parâmetros climáticos do PNM.....	22
2.3.3 Uso da terra do Nordeste Transmontano.....	23
2.3.4 Vegetação do PNM	24
2.4 Incêndios Florestais e em Matos	25
2.4.1 Aspetos introdutórios.....	25
2.4.2 Intensidade e Risco de incêndios.....	26
2.4.3 Área de matos e as suas problemáticas quanto aos riscos de incêndios	27
2.4.4 Fogo Controlado.....	28
2.4.5 Impactos do fogo controlado nos processos e propriedades físicas do solo.....	29
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Localização e Caracterização da área de estudo	31
3.2 Fogo Controlado.....	32
3.3 Avaliações de Campo	33
3.3.1 Parcelas e plano de amostragem	33
3.3.2 Recolha das amostras de solo e vegetação.....	34
3.3.3 Instalação das microparcelas de erosão	35
3.4 Métodos analíticos	35
3.4.1 Análises físicas do solo	35
3.4.2 Capacidade de armazenamento de água no solo	39

3.4.3	Análises da vegetação e horizonte orgânico	39
3.4.4	Perda de solo por erosão	40
3.5	Tratamento estatístico de dados.....	41
3.5.1	Teste dos Outliers	41
3.5.2	Teste de Normalidade Kolmogorov-Smirnov	42
3.5.3	Análise de Variância (ANOVA)	42
3.5.4	Teste de Tukey da Diferença Honestamente Significativa (HSD).....	42
3.5.5	Teste de Correlação e Regressão.....	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Fogo controlado.....	44
4.2	Vegetação e Horizonte Orgânico	45
4.2.1	Vegetação e percentagem de cobertura	45
4.2.2	Horizonte Orgânico.....	48
4.3	Propriedades Físicas do Solo.....	51
4.3.1	Estatística dos Parâmetros analisados.....	51
4.3.2	Elementos Grosseiros	53
4.3.3	Textura	54
4.3.5	Porosidade do solo.....	56
4.3.6	Capacidade Máxima para Água e Capacidade de Campo	57
4.3.7	Permeabilidade	58
4.4	Perdas de solo por erosão	60
5.	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	65
	ANEXOS	i
	Anexo I – Caracterização das Propriedades físicas do Solo	ii
	Anexo II – Caracterização da Vegetação e do Horizonte Orgânico	viii
	Anexo III – Caracterização da Perda de Solo e Escoamento	xiv

Índice de Figuras

Figura 1: A paisagem e os fatores de formação do solo.....	15
Figura 2: Representação esquemática do perfil de solo mostrando seus principais horizontes e camadas	16
Figura 3: Parque Natural de Montesinho	21
Figura 4: Unidades principais, secundárias e litológicas do solo dominantes identificadas no PNM	22
Figura 5: Classes de Aptidão da terra no Nordeste de Portugal: importância relativa na área total	24
Figura 6: Distribuição dos Matos – Esteva, Giesta e Urze, no PNM.....	25
Figura 7: Estrutura do índice meteorológico de risco de incêndio florestal FWI	27
Figura 8: Localização da área de estudo no Parque Natural de Montesinho, NE de Portugal.....	31
Figura 9: Aplicação do Fogo Controlado.....	32
Figura 10: Localização das parcelas de amostragem na área de estudo.....	33
Figura 11: Quadrado metálico utilizado como molde para as amostragens.....	34
Figura 12: Recolha das amostras de solo não perturbadas	34
Figura 13: Recolha do escoamento superficial e de solo por erosão	35
Figura 14: Equipamento para a determinação do teor de elementos grosseiros.	36
Figura 15: Permeâmetro de circuito fechado e carga constante.....	37
Figura 16: Aplicação do fogo controlado no Parque Natural de Montesinho.....	44
Figura 17: Imagens térmicas do fogo controlado.....	45
Figura 18: Biomassa das espécies vegetais por parcelas.....	46
Figura 19: Médias de teor de Humidade por espécie vegetal	46
Figura 20: Cobertura Vegetal por espécie.....	47
Figura 21: Vegetação antes e depois do fogo controlado no Parque Natural de Montesinho	48
Figura 22: Horizonte Orgânico antes e depois do fogo controlado.....	49
Figura 23: Humidade do horizonte orgânico antes e pós fogo.....	49
Figura 24: Biomassa seca do horizonte orgânico antes e pós fogo	49
Figura 25: Espessura do horizonte orgânico antes e pós fogo	50
Figura 26: Densidade do horizonte orgânico antes e pós fogo	50
Figura 27: Elementos Grosseiros nas quatro camadas amostradas	53

Figura 28: Frações do solo por parcela no antes do fogo.....	54
Figura 29: Frações do solo por profundidade antes do fogo.....	54
Figura 30: Frações do solo por parcel depois do fogo	54
Figura 31: Frações do solo profundidade depois do fogo	54
Figura 32: Curva granulométrica do momento antes do fogo.....	55
Figura 33: Curva granulométrica imediatamente pós fogo.....	55
Figura 34: Densidade aparente na camada de 0 - 5cm.....	55
Figura 35: Porosidade Total na camada 0 - 5cm.....	56
Figura 36: Microporosidade na camada 0 - 5cm.....	57
Figura 37: Macroporosidade na camada 0 - 5cm	57
Figura 38: Capacidade máxima de água na camada 0 - 5cm	58
Figura 39: Capacidade de Campo na camada 0 - 5cm	58
Figura 40: Permeabilidade na camada de 0 - 5cm	59
Figura 41: Armazenamento de água no solo na profundidade de 0 - 5cm.....	60
Figura 42: Perda de solo por declive e colheita	61
Figura 43: Escoamento por declive e colheita	61
Figura 44: Perda de solo e escoamento para o declive 1 e declive 2	62
Figura 45: Pedregosidade nas microparcels de perda de solo e escoamento	63

Índice de Quadros

Quadro 1: Classificação da permeabilidade dos solos	37
Quadro 2: Características da vegetação quanto a % de cobertura, altura e biomassa...	47
Quadro 3: Estatística descritiva dos parâmetros em cada período de amostragem	51
Quadro 4: Análise de variância a um fator testando o efeito dos momentos de amostragem (Antes do fogo, imediatamente pós fogo, dois meses pós fogo)	52
Quadro 5: Análise de variância a dois fatores.....	52
Quadro 6: Parâmetros de perda de solo e escoamento por declive	61

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso fundamental para a vida na terra, sendo a base para a promoção da produção de alimentos, rações, combustíveis e fibras (Blanco & Lal, 2008). Estima-se que mais de 30% da superfície terrestre esteja sujeita a fogos frequentes, e o solo, é um dos recursos mais afetados por esse fenômeno, apresentando mudanças nas suas características físicas, químicas, mineralógicas, biológicas, e com maior suscetibilidade a erosão (Hubbert *et al.*, 2006; Imeson *et al.*, 1992).

Devido as mudanças climáticas e socioeconômicas das últimas décadas desencadeou-se um aumento significativo no número de incêndios florestais, o que alterou o seu regime, promovendo severos efeitos no solo, na água e na vegetação (Bento-Gonçalves *et al.*, 2011; Nunes *et al.*, 2013).

Os solos ardidos apresentam uma maior suscetibilidade à erosão em decorrência da supressão da cobertura vegetal e devido às modificações físicas do próprio solo pelo aquecimento, nomeadamente: grau da repelência, estrutura do solo, textura, material argiloso, densidade aparente e porosidade (Caria, 2011, Neary, 2005). Esses efeitos podem ser notados, principalmente, nos primeiros meses após a queima, e estão associadas a diferentes severidades, pois existe uma interdependência entre a intensidade do fogo e a resposta do ecossistema (Neary, 2005).

Os incêndios florestais são comumente considerados como catástrofes, contudo, o fogo é um processo natural e está integrado no ciclo de muitos ecossistemas (Zedler & Rego, 2006; Catry, *et al.*, 2007). Se de alta intensidade, pode gerar graves efeitos na vegetação e no solo (FAO, 2001; Hubbert *et al.*, 2006; Imeson *et al.*, 1992). Quando de baixa intensidade pode moldar a paisagem através da destruição de pequenas árvores, renovação da vegetação e acelerar o ciclo de nutrientes (Fisher *et al.*, 2000).

O ambiente mediterrâneo, é um ecossistema que apresenta fatores naturais para a ocorrência de incêndios, em decorrência do seu clima e vegetação. O verão é bastante quente e seco, deixando o solo e a vegetação com baixa humidade, e tornando as áreas verdes altamente inflamáveis, ocasionando assim, a problemática dos incêndios florestais (Molina & Sanroque, 1996). Portugal apresenta características mediterrânicas, e devido a isso, a utilização do fogo se tornou uma prática comum, seja como forma de melhorar as pastagens para os animais, quanto como uma prática manejo deste ambiente (Leite, 2011).

Uma forma de manejo citado anteriormente, é a do fogo controlado, utilizando-o sob um planejamento cuidadoso e condições monitoradas, servindo como uma das maneiras mais importantes de prevenção de incêndios de alta intensidade, pois reduz a quantidade de combustível e, portanto, evita que o fogo se alastre para povoamentos florestais (Fernandes & Botelho, 2004; Bento-Gonçalves *et al.*, 2011; Fonseca *et al.*, 2017).

Um exemplo de utilização do fogo controlado é o do Parque natural de Montesinho (PNM), localizado no Nordeste de Portugal e que possui uma área de aproximadamente 750 km², sendo em 1/3 corresponde a vegetação arbustiva de matos (IPB/ICN, 2007). Esses matos servem como um forte combustível, devido ao acúmulo de biomassa altamente inflamável, sendo indispensável o manejo dessa vegetação para a proteção da floresta nacional (Cavalli *et al.*, 2017).

Por mais que o fogo controlado seja uma ferramenta importante de prevenção aos incêndios florestais, constitui ainda assim, uma perturbação ao meio ambiente, e pode provocar impactos significativos, especialmente no solo (Castro *et al.*, 2010).

Devido a isso, o trabalho proposto tem por objetivo avaliar as mudanças a curto prazo nas propriedades físicas do solo e nos processos erosivos, após a aplicação de um fogo controlado. Como uma medida mitigatória do risco de incêndio pela redução de combustível, em áreas de matos do Parque Natural de Montesinho. Inicia-se com uma fundamentação teórica, a fim a perceber o contexto das análises, posteriormente, apresenta-se a metodologia aplicada, assim como os materiais e métodos, e o tratamento de dados obtidos. Finalmente, realiza-se uma discussão sobre os resultados, concluindo com uma síntese do que resultou as análises e interpretações efetuadas ao longo deste estudo.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Solos

2.1.1 Formação e Importância dos solos

O solo é um recurso fundamental e básico para a vida humana, erroneamente percebido por muitos como algo de valor insignificante, todavia, é a base da vida, promovendo a produção de alimentos, rações, combustíveis e fibras (Blanco & Lal, 2008).

É um corpo natural que se desenvolve na superfície da Terra devido alguns fatores essenciais como: o clima, o material originário, o relevo, os organismos (como a vegetação e os microrganismos) e o tempo (Costa, 1991; Jenny, 1986). A sua formação inicia-se por meio das rochas da litosfera, que expostas à atmosfera sofrem ação direta do meio. Estas ocorrem de forma simultânea, ou seja, o clima e os organismos afetam o material originário e o relevo, durante um certo período (Butt & Zeegers, 1992). Esses elementos (rocha, clima, organismo, relevo e tempo) são chamados de fatores de formação do solo (figura 1) e os processos de modificações da composição química e física dos minerais, são chamados de intemperismo ou meteorização (Lepsch, 2010; Lima *et al.*, 2007).



Figura 1: A paisagem e os fatores de formação do solo

Fonte: (Lima *et al.*, 2007)

O solo é um sistema complexo que integra três fases: sólida, líquida e gasosa (Caputo, 1988). As partículas sólidas são de origem mineral e orgânica, a líquida é

representada pela água e os iões dissolvidos, e a gasosa é representada pelo ar e outros gases (Reinert & Reichert, 2006). É um ambiente propício para o desenvolvimento da vegetação, impedindo flutuações de temperaturas extremas, protegendo as sementes e principalmente as raízes, auxiliando também na função de fixação e alocação, fazendo com que os caules se mantenham fixos e eretos (Varenes, 2003; Lepsch, 2010). É através das raízes que as plantas extraem água e nutrientes, e além de consumir oxigênio e gás carbônico, retira outros 16 elementos essenciais do solo. Nove deles os macronutrientes: carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, e os outros elementos chamados de micronutrientes, consumidos em menores quantidades (FAO, 2021).

2.2.2 Perfil e horizontes do solo

O perfil do solo é a seção vertical que se inicia na sua superfície e termina na rocha. Neste espaço encontram-se os horizontes, que são as camadas que constituem o solo, formados através de processos pedogenéticos (adição, perdas, transporte e transformações). Cada horizonte apresenta uma letra correspondente, sendo os principais horizontes denominados pelas letras O, A, B, C e R, como representando na figura 2 (Lima *et al.*, 2007):

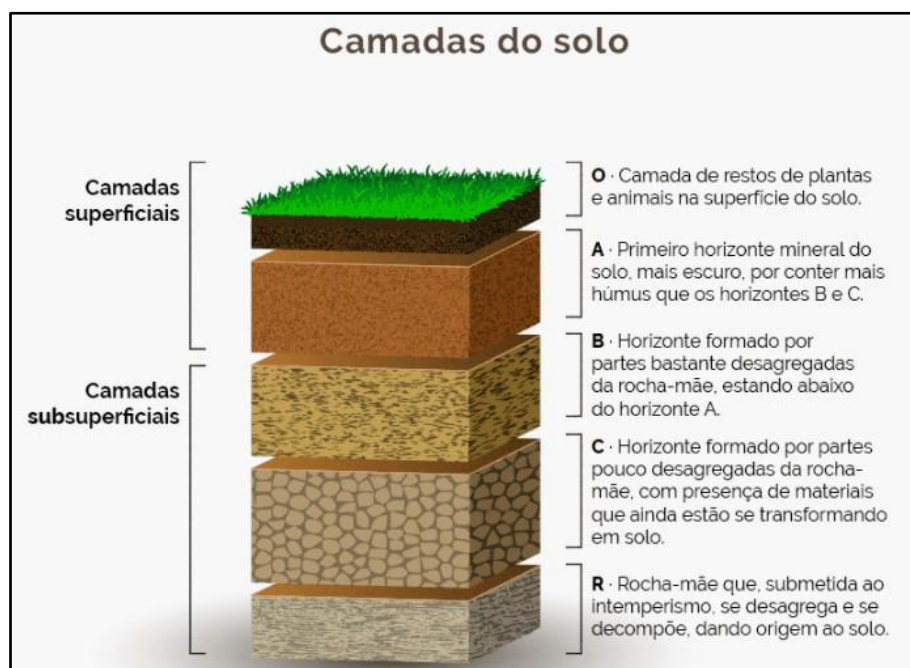


Figura 2: Representação esquemática do perfil de solo mostrando seus principais horizontes e camadas
Fonte: (Ramiro, J., 2019).

Um solo em um estágio mais evoluído pode apresentar os cinco tipos de horizontes, partindo do mais superficial ao mais profundo, como ilustrado na figura 2. Entretanto, nem sempre isso ocorre, pois, os solos podem não apresentar todos os horizontes. Em especial, quando o solo não apresenta horizonte B, é considerado “pouco evoluído”, devido ao horizonte B ser de grande importância na evolução do solo (Lepsch, 2010).

2.2.3 Propriedades físicas do Solo

A constituição do material sólido do solo é através das substâncias minerais de diferentes dimensões e composições. As partículas maiores de 2mm de diâmetro são designadas de elementos grosseiros, e os inferiores de terra fina (Reinert & Reichert, 2006). Os elementos grosseiros apresentam uma fraca reatividade, reduzindo a quantidade de água e nutrientes que o solo retém, mas contribuem para a formação de poros, aumentando a drenagem. Já a terra fina apresenta três componentes: areia, limo e argila, que variam em proporção conforme a sua formação. Sobretudo na argila, se encontram as principais propriedades químicas do solo, como o poder tampão e a capacidade de reter nutrientes (Weil & Brady, 2008).

As propriedades do solo quanto as características físicas podem ser avaliadas de acordo com a textura, o teor de humidade, a densidade aparente, a porosidade, a permeabilidade e a estabilidade dos agregados.

A textura é a característica que correlaciona o conteúdo de areia, limo e argila presentes no solo, sendo que a predominância de uma fração de areia representa um solo de textura grosseira, e um predomínio de argila, de textura fina (Lopes, 1978; Fonseca, 2005). Essa propriedade reflete na qualidade do solo, pois controla a retenção de água, de nutrientes e as trocas gasosas com a atmosfera, intervindo com outras propriedades e processos que possuem o solo e é afetada diretamente pela erosão, já que algumas frações granulométricas são removidas e transportadas mais facilmente do que as outras (Fonseca, 2005; Guerra & Cunha, 1994).

A densidade aparente é a razão entre a massa de solo seco por unidade de volume, que representa o nível de compactidade ou o grau de proximidade entre partículas (Costa, 1991; Pereira & Arrobas, 2010). Solos com textura fina apresentam densidades aparentes menores do que os de textura grosseira, por apresentar maior tendência de formação de agregados e logo, existir maior porosidade (Lopes, 1978).

A porosidade do solo é a razão entre o seu volume e a parte onde não existem partículas sólidas, ou seja, onde esses espaços vazios, denominado de poros, possam estar parciais ou totalmente preenchidos por água (Macedo & Sardinha, 1993; Netto, 1995). Segundo Pereira & Arrobas (2010) a textura e a estrutura do solo estão interligadas com a porosidade, pois o tamanho, número e distribuição dos poros intervém na maneira como o ar, a água e os nutrientes dissolvidos circulam pelo solo.

A permeabilidade é a capacidade do solo em transmitir a água sob uma determinada temperatura ou viscosidade, e está estritamente relacionada com a porosidade do solo (Netto, 1995). Um solo muito arenoso apresenta uma taxa de permeabilidade maior devido a presença de poros maiores, já nos solos argilosos a permeabilidade é menor devido ao menor tamanho dos poros (Schaeztl & Thompson, 2015).

2.2.4 Propriedades químicas do solo

As propriedades do solo quanto as características químicas podem ser avaliadas quanto o teor de pH, fósforo e potássio, capacidade de troca catiónica, acidez de troca e matéria orgânica. Os solos podem ser naturalmente ácidos devido a própria natureza do material de origem ou devido aos processos de formação que favoreceram a remoção de elementos básicos como K, Ca, Mg e Na. Essa acidez pode afetar a disponibilidade de nutrientes no solo e a atividade dos microrganismos (Pereira & Arrobas, 2010; Lopes *et al.*, 1991).

O fósforo nos solos encontra-se nas formas orgânicas e inorgânicas, e pode ser encontrado dissolvido em poucas quantidades, associados a minerais ou compostos orgânicos (Espinoza *et al.*, 2013). Quanto ao potássio, está presente nas micas e feldspatos, sendo estes os minerais primários com maior abundância no solo, cerca de 90-98% (Varenes, 2003).

A troca catiónica é a capacidade em que o solo tem de reter ou armazenar nutrientes carregados positivamente. As partículas de solo que atraem mais cátions são partículas menores, como a argila e o húmus (matéria orgânica), tornando geralmente os solos de textura fina mais férteis, em relação ao de textura grossa (Pereira & Arrobas, 2010).

A matéria orgânica decomposta, chamada de húmus, apresenta cargas predominantemente negativas. Esta age como uma cola que retém as partículas minerais do solo, formando agregados e contribuindo para a estrutura do solo, criando espaços

porosos e propiciando a passagem e movimento da água e ar (Neary *et al.*, 2005). É um elemento de primordial importância na constituição dos solos, condicionando a produtividade e sustentabilidade dos ecossistemas. Serve como um depósito de nutrientes disponíveis para as plantas, aumentando a capacidade de troca catiônica onde permite a manutenção dos nutrientes no solo e funciona como agente fixador de micronutrientes (Fernandes *et al.*, 2009).

2.2 Erosão

Chamamos de erosão o desprendimento, arraste e transporte (e deposição) das partículas do solo causada por diversos fatores (Boardman & Poesen, 2006). Tais fatores geram tipos de degradação dos solos, sendo: 1) a erosão hídrica, causada pela água; 2) a eólica, advinda dos ventos; 3) a química, pela perda de nutrientes e/ou matéria orgânica, salinização, acidificação e/ou poluição; 4) a física, pela compactação, selamento, encostamento, inundação, aeração deficiente e o excesso ou falta de água; e 5) a biológica, que é a redução da biomassa e redução da biodiversidade (Hernani *et al.*, 2002).

A degradação do solo pela erosão ocorre naturalmente, durante eventos extremos como chuvadas torrenciais e de longa duração. Porém, esses são eventos menos frequentes se comparados aos impactos causados pelo homem, que acelera tal degradação, através do desmatamento, de práticas agrícolas, da mineração de superfície, de construções e da urbanização (Blum, 2008; Diyabalanage *et al.*, 2017).

O efeito causado por uma erosão do solo acelerada impacta direta e indiretamente a agricultura, o meio ambiente e a economia (Boardman & Poesen, 2006; Blanco & Lal, 2008). Diretamente, o efeito vem através da diminuição da produtividade do solo, visto que reduzindo a camada superficial resulta em uma estrutura de solo degradada, compactada, esgotada de nutrientes e com pouca matéria orgânica, o que enfraquece a germinação (Blanco, H. & Lal, R., 2008). Os efeitos indiretos são através da sedimentação e transportes de elementos químicos até outros locais. Com a remoção da camada do solo, muitas partículas são arrastadas e sedimentadas, poluindo os recursos aquáticos (Bermudéz, 2012).

O solo apresenta uma enorme importância socioeconômica e ambiental, por isso é fundamental protegê-lo. Visto que as consequências associadas são enormes, tanto em relação à economia, quanto aos custos associados à sua reparação (Boardman & Poesen, 2006; Bompastor *et al.*, 2009). A sua degradação tem um impacto estrito quanto a qualidade da água, do ar, da biodiversidade e das alterações climáticas, o que pode

prejudicar a saúde das pessoas e ameaçar a segurança alimentar humana e animal, por essas razões, é uma preocupação a nível europeu e mundial (Figueiredo, 2012; Bompastor *et al.*, 2009).

2.2.1 Erosão Hídrica

A erosão hídrica e o escoamento superficial são uma das maiores ameaças aos recursos em Portugal e na Europa, apresentando maior relevância e influência na degradação do solo (Figueiredo, 2012; Morgan, 2005). É englobado na erosão hídrica, o impacto causado pelas águas pluviais, fluviais, subterrâneas e do mar. Sendo a causada por águas pluviais, a que mais afeta os recursos para os humanos (Zachar, 1982; Figueiredo, 2012).

A erosão causada pelas chuvas, se inicia pelo impacto das gotas no solo, desagregando as partículas, em seguida acumulando a água em volume, propiciando o escoamento superficial e logo, arrastando as partículas liberadas (Bertoni & Lombardi-Neto, 1990). O rápido humedecimento da superfície, principalmente em casos em que o solo está muito seco, gera uma compressão do ar gradual, que é aprisionada no interior dos agregados, levando à abertura de pequenas fissuras, superfícies de fractura ou até mesmo a fragmentação completa do agregado (Dexter, 1988). Tais fissuras ao longo do tempo se tornam erosões mais avançadas, podendo se tornar erosões laminares, em sulcos ou até mesmo ravinas (Morgan, 2005).

A cobertura vegetal pode interferir diretamente nos processos erosivos através dos seus efeitos espaciais, diminuindo a energia cinética da chuva e no seu papel de formação de húmus, que infere na estabilidade e no teor de agregados. A densidade de cobertura vegetal tem correlação com a taxa de escoamento superficial, logo gera a redução da perda de solo (Guerra & Cunha, 1994). Com a cobertura removida, a transmissão dos nutrientes minerais do solo para a biomassa não ocorre, e a água remove esses nutrientes do solo pela lixiviação e escoamento (Bastos, 1999). Sendo de extrema importância a manutenção da vegetação para a diminuição dos processos erosivos.

2.3 Parque Natural de Montesinho (PNM)

As informações sobre o Parque Natural de Montesinho partiram do seu Plano de Ordenamento (IPB/ICN, 2007) e da tese de doutoramento de Aguiar (2001). O Parque Natural de Montesinho (PNM), apresenta uma superfície total de 74.600 hectares e fica localizado no extremo nordeste de Portugal (figura 3) e faz fronteira com Espanha.

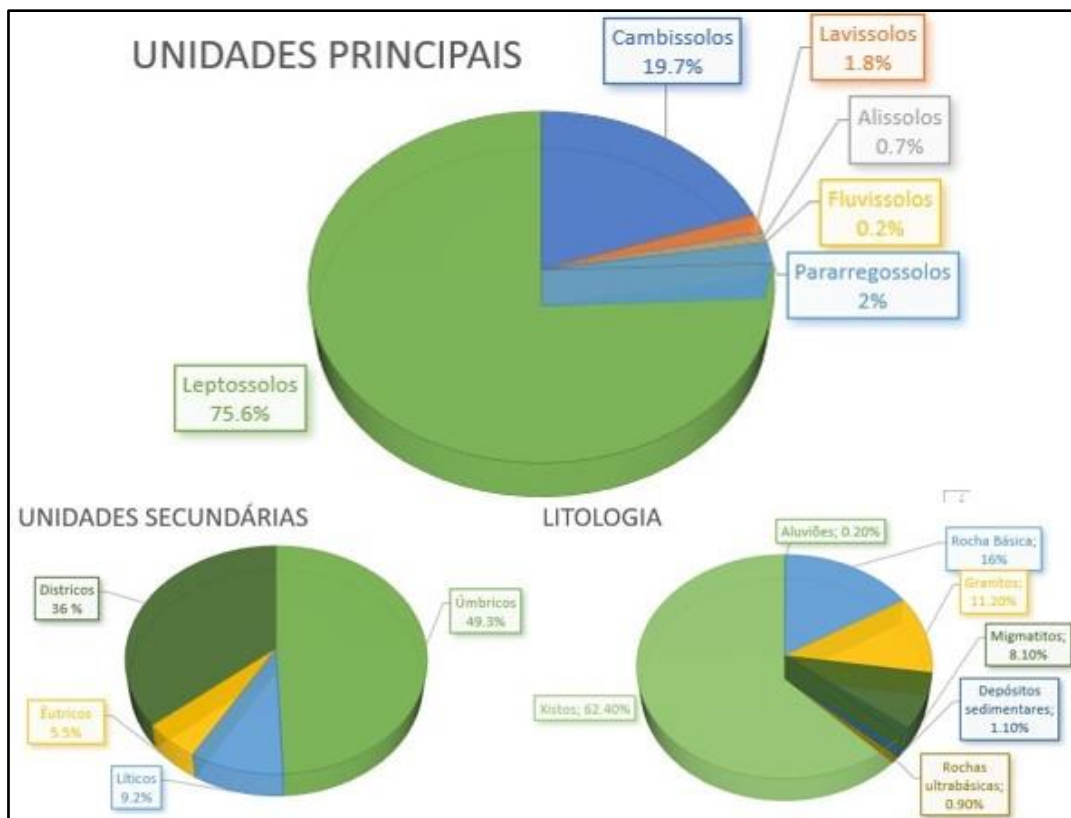


Figura 4: Unidades principais, secundárias e litológicas do solo dominantes identificadas no PNM
Fonte: (Adaptado IPB/ICN, 2007)

Na figura 4 podemos ver que o PNM ainda apresenta outras unidades principais: os Luviolos, Alissolos, Fluviolos e os Pararregossolos. Os Luviolos correspondem a 1,8% da área e os Alissolos 0,7%, e são denominados os mais evoluídos (horizonte B árgico e capacidade de troca catiônica de 16 cmol.kg⁻¹). Já os Fluviolos correspondem a 0,2% da área e os Pararregossolos a 2% (IPB/ICN, 2007).

Quanto as unidades secundárias dão a indicação acerca do: (1) teor de matéria orgânica no horizonte A (sendo o Úmbico o mais elevado dentre todos); (2) da acidez do solo (Luviolos são pouco ácidos e o restante muito ácidos); e (3) da espessura (os Líticos apresentam rocha dura a menos de 10cm de profundidade) (Agroconsultores e Coba, 1991).

2.3.2 Parâmetros climáticos do PNM

A região transmontana apresenta condições climáticas muito influenciadas pelo cordão montanhoso do Alto Minho com 1545m, e pelo Alvão-Marão com 1415m de altitude, agindo como uma barreira geográfica, fazendo com que a precipitação anual seja diminuída consideravelmente. Varia de 400mm a 500mm nos vales mais encaixados e apresentando cerca do triplo nas zonas montanhosas (Aguiar, 2001). Devido a sua

posição, a região encontra-se fechada para influências marítimas, gerando um macroclima diferenciado que resultou no ditado popular, “em Trás-os-Montes existem nove meses de inverno e três de meses de inferno”, o que conjuga suas características típicas mediterrânicas (Gonçalves, 1991).

Este ditado popular é percebido através da média da temperatura nos meses de inverno e verão, a média mensal do mês mais frio (janeiro) é de 4,5°C e de 20,7°C no mês mais quente (julho) (Castro *et al.*, 2010; Aguiar, 2001). A precipitação é típica do clima mediterrânico, com um grande volume no período frio e quase ausência nas épocas quentes. A época húmida (outubro-março) chega a 72% da precipitação anual e gera consequências aos solos, que ficam com excesso de água no inverno e em défice no período estival. Outra questão é inverno proeminente, sendo as geadas um fenómeno climático de extrema importância para o ritmo biológico e para as atividades agrícolas do PNM, entretanto, torna outras atividades dos sistemas ecológicos e agroecológicos limitadas ao período sem geadas (IPB/ICN, 2007).

2.3.3 Uso da terra do Nordeste Transmontano

O Nordeste (NE) Português, devido aos seus aspetos climáticos e paisagísticos, apresenta alguns fatores limitativos quanto ao uso da terra, em especial ao uso agrário da terra em Trás-os-Montes. Da superfície total deste local, apenas 12% corresponde a solos com mais de 1 metro de espessura efectiva, e menos de ¼ do território é coberto por solos com mais de 50 centímetros (Figueiredo, 2013). Segundo a Carta de Aptidão da Terra do NE de Portugal, feita por Agroconsultores e Coba (1991), a espessura é fundamental para a produção agrícola, pois afecta diretamente as condições de enraizamento das plantas. Solos muito rasos são menos favoráveis a este uso.

Figueiredo (2013) cita que a carência de água no solo do NE de Portugal é dita de extrema severidade a muito severa em ¾ da superfície da região. E que da área total, 84% do solo apresenta mais de 30% em elementos grosseiros, o que os qualifica como solos pedregosos. A combinação da elevada carência de água e da fina espessura, torna o armazenamento de água deficiente, constituindo obstáculos para as práticas de cultura (Agroconsultores & Coba, 1991). Com isso, a aptidão de uso do solo para a região NE de Portugal é representada pela figura 5:

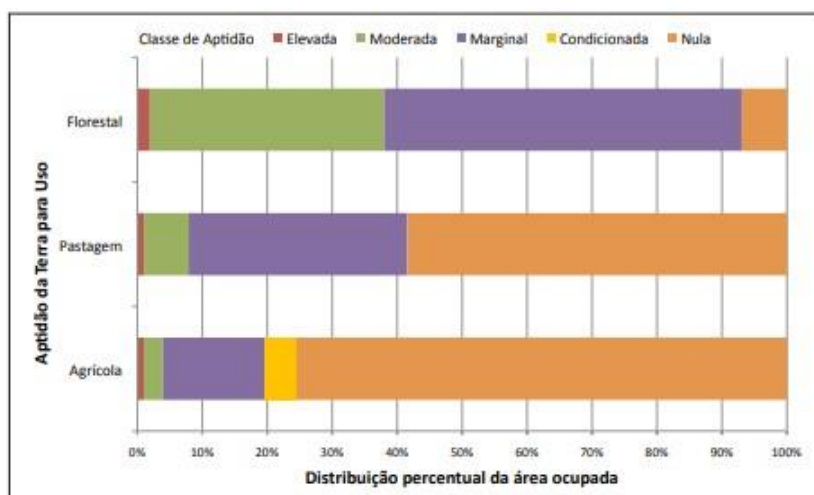


Figura 5: Classes de Aptidão da terra no Nordeste de Portugal: importância relativa na área total
Fonte: (Figueiredo, 2013).

Não é de se surpreender que a aptidão agrícola para o uso deste solo seja praticamente nula em 75% da área, e para pastagem melhorada cerca de 60%. O uso marginal mais elevado é das áreas florestais, com cerca de 60%. Apenas 1% do território apresenta realmente aptidão agrícola elevada e 7% não possuem aptidão de uso algum (Figueiredo, 2013).

Devido a carência de aptidão agrícola e da sobre-exploração das áreas com aptidão, fez com que as zonas de matos se sobressaíssem. Chamados antigamente de incultos, esses matos erram visto pela população sem nenhuma utilização. No atual momento, apresentam contribuições socioeconômicas, com atuações positivas nas atividades agroflorestais através da caça, da produção de pequenos ruminantes e para apicultura (Figueiredo *et al.*, 2015a).

2.3.4 Vegetação do PNM

O PNM apresenta cinco unidades paisagísticas principais: matas e matos (43,3%), matos e pinhais (24,2%), vinhas (20,1%), unidade aberta (8,2%) e unidade paisagística de montanha granítica (4,2%) (Bompastor *et al.*, 2009). Sendo a vegetação arbustiva constituída por: (i) Matos altos, dividido em dois grandes grupos, os matagais de *Pistacio-Rhamnetalia alaterni* (*Quercetea ilicis*) e giestais (*Cytisetea scopario-striati*); e, (ii) Matos baixos que são distribuídos em três classes de vegetação, *Calluno-Ulicetea* (maioritariamente acidófilos meso-higrófilos), *Cisto-Lavanduletea* (maioritariamente acidófilos mesoxerófilos), e *Rosmarinetea officinalis* (calcícolas) (Aguiar, 2001).

Os matos apresentam 34% da unidade de paisagística do PNM e através da figura 6 são expressos os principais matos encontrados, que apresentam como classes denominadas Estevas, Giestais e Urzais.

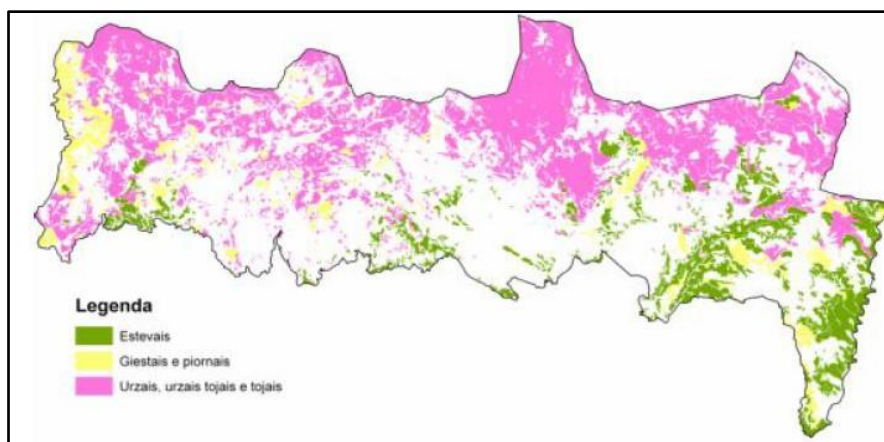


Figura 6: Distribuição dos Matos – Esteva, Giesta e Urze, no PNM

Fonte: (mapa produzido pelo Ligeo, ESA/IPB, no âmbito do projecto Edunather, 2007).

2.4 Incêndios Florestais e em Matos

2.4.1 Aspetos introdutórios

Do ponto de vista físico-químico, um incêndio florestal ocorre através da reação entre um material combustível (como a vegetação) e de um oxidante (como o oxigênio), de forma natural ou antropogénica, sendo um fenómeno global que afeta mais terras que qualquer outro distúrbio natural (Caria, 2011; González-Pérez *et al.*, 2004; Lavorel *et al.*, 2007).). Estima-se que mais de 30% da superfície da terra esteja sujeita a fogos frequentes, contudo, com as mudanças climáticas é espetável que haja mudanças imediatas no regime de fogos em termos de frequência, tamanho, sazonalidade, recorrência, intensidade e severidade (Bento- Gonçalves *et al.*, 2011).

O fogo possui um impacto determinante no ciclo de vida das florestas. Quando de baixa intensidade, podem moldar a paisagem através da destruição de pequenas árvores, renovação da vegetação e aceleração do ciclo de nutrientes (Fisher *et al.*, 2000). Entretanto, se de alta intensidade pode gerar graves efeitos irreversíveis na vegetação e no solo, modificando propriedades físicas, químicas, mineralógicas, biológicas e aumentar o risco de erosão (FAO, 2001; Hubbert *et al.*, 2006; Imeson *et al.*, 1992).

As zonas mediterrâneas, e em especial Portugal, apresentam um ambiente propício para a ocorrência de incêndios florestais (Cтры, *et al.*, 2007). Se visto de um contexto

ecológico, o fogo faz parte da dinâmica desse ecossistema, porém, representa um corriqueiro problema ambiental, com inúmeros problemas de controle, principalmente no período do verão, em que as temperaturas são elevadas, há um déficit de precipitação e as espécies arbustivas incidentes apresentam alta inflamabilidade, propiciando a destruição de grandes áreas florestais e de matos todos os anos (IPB/ICN, 2007; Pausas *et al.*, 2008; Lourenço *et al.*, 2011).

Como consequência, os solos portugueses perdem a camada superior dos solos por erosão, removendo os poucos nutrientes existentes (Bento-Gonçalves *et al.*, 2013). A exportação de nutrientes e sedimentos depende da recorrência dos incêndios, da sua intensidade, severidade, variabilidade espacial, da hidrofobicidade do solo e das características do local (altitude, declive, exposição, clima e geologia) (Jungerius & DeJong 1989; Ritsema & Dekker 1994; Coelho *et al.* 2004). A resposta dos ecossistemas para com o fogo possui uma interdependência entre a intensidade e a sua severidade, tornando assim, necessários meios de redução dessa severidade (Neary *et al.*, 2005).

2.4.2 Intensidade e Risco de incêndios

Quando se discute os efeitos dos incêndios nos ecossistemas e nos recursos do solo, existe uma grande e importante diferença entre a intensidade e a severidade do fogo. A intensidade é o termo utilizado para descrever a taxa com que o fogo produz energia térmica. É a forma quantitativa em termos de intensidade de linha de fogo e mensuração do comprimento da chama (Brown & Davis 1973, Chandler *et al.*, 1991, DeBano *et al.*, 1998). Já a severidade é mais qualitativa, descreve a resposta do ecossistema para com o fogo, representando seus efeitos sobre o solo e a água (Simard, 1991). Reflete na quantidade de energia (calor) que é oferecida pelo fogo, e o seu grau é o que afeta os recursos, podendo ser classificado em baixa, moderada e alta severidade (Neary *et al.*, 2005).

A dimensão de um incêndio está relacionada com o tipo de combustível queimado (biomassa), correlacionado com sua humidade e densidade, e a direção do vento (Miranda, 1998). Um mecanismo de avaliação da intensidade, que é muito utilizado pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), é o índice de intensidade do fogo - FWI (*Fire weather index*). Que é um subsistema extraído do sistema de classificação de perigo de incêndio florestal canadense (CFFDRS). Esse tem sido historicamente utilizado como uma importante ferramenta para sobrepular problemas relacionados com a potencial ocorrência de incêndios florestais, sua propagação e dificuldade de supressão

(Carvalho, 2014). O FWI inclui seis indicadores (figura 7), três que dizem respeito ao teor de humidade do combustível e três que ditam o comportamento do fogo.

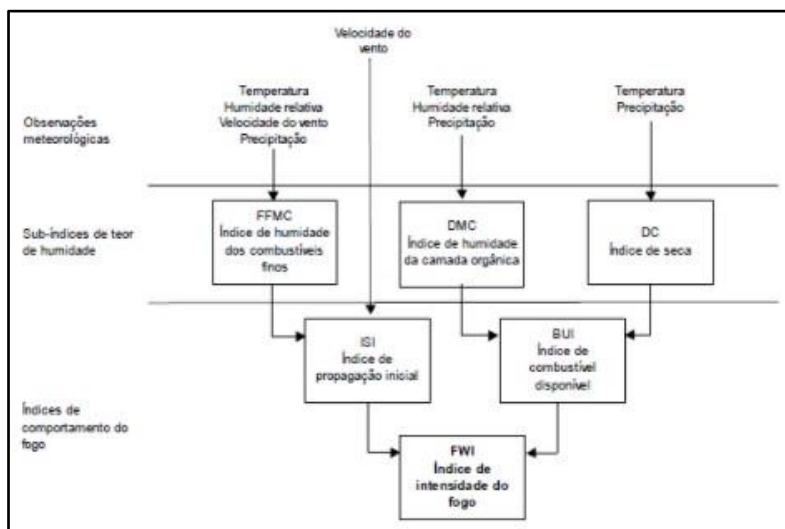


Figura 7: Estrutura do índice meteorológico de risco de incêndio florestal FWI
 Fonte: (IPMA, 2021)

Na estruturação deste índice, se encontram subdivididos o Índice de Humidade dos Combustíveis Finos (FFMC), o índice de húmus (DMC), o índice de seca (DC), o índice de propagação inicial (ISI) e o índice de combustível disponível (BIU).

Segundo o IPMA (2021), o FFCM correspondente ao teor de humidade dos combustíveis finos mortos, o qual constitui um bom indicador de inflamabilidade; o DMC representa o teor de humidade da camada fina e pouco compacta do solo (até 8 cm de profundidade), indicando o estado de decomposição da matéria orgânica e dos materiais lenhosos de tamanho médio; o DC indica o teor de humidade dos combustíveis florestais presentes na camada inferior da superfície do solo (cerca de 8 a 20 cm de profundidade), sendo um bom indicador dos efeitos do período seco sazonal.

Já o ISI resulta da composição do índice FFMC e da intensidade do vento, indicando a taxa de propagação inicial do fogo, sem relacionar com a influência das quantidades de combustíveis; e o BUI expressando a composição dos índices DMC e DC, demonstra a quantidade total de combustível presente disponível para a propagação do fogo.

2.4.3 Área de matos e as suas problemáticas quanto aos riscos de incêndios

Como citado anteriormente, um dos fatores que afetam a ocorrência e a intensidade de um incêndio é o seu combustível. Existem 3 características fundamentais da vegetação que propiciam os incêndios florestais de alta intensidade e de rápida

propagação: (1) acumulação de vegetação em ramos e folhas mortas que apresentam decomposição lenta; (2) a relação de área superficial/volume de material vegetal elevado, permitindo uma secagem rápida e por conseguinte, um baixo teor de humidade do combustível; e (3) compostos voláteis facilmente inflamáveis e de elevada proporção (Lloret *et al.*, 2009; Shakesby, 2011).

Os três principais fatores relacionados ao combustível podem ser notados nas áreas de matos, que se estendem por 25% da área Portuguesa e contemplam boa parte da paisagem do Nordeste e é claramente o tipo de cobertura vegetal com maior ocorrência na proporção dos incêndios do território (DGRF, 2006; Marques, *et al.*, 2011).

Tal vegetação possui um elevado risco potencial de incêndios, dentre outras razões, pela sua localização, sendo regiões afastadas dos centros populacionais que dificultam o controle, e por sua ampla ocorrência em áreas íngremes; ausência de estratégias e práticas de gestão destas áreas, sendo detida pela própria natureza ou por ações antrópicas desregradadas; e principalmente, ao seu efetivo potencial combustível, em decorrência de suas propriedades (como a presença de resinas e óleos essenciais inflamáveis) (Campo *et al.*, 2006; Fernandes *et al.*, 2009; Moreira *et al.*, 2009). Tudo isso é acrescido ao fato da região de incidência desses matos ficar situado em um contexto ecológico de montanha mediterrânica, em que as ocorrências de fogos fazem parte da dinâmica da paisagem (IPB/ICN, 2007; CIMO, 2009; Rosário, 2011).

Em decorrência de tais fatores, as áreas de matos tornam o ambiente vulnerável a recorrentes incêndios, havendo uma constante necessidade de encontrar maneiras práticas de controle e manejo desses combustíveis altamente inflamáveis.

2.4.4 Fogo Controlado

O fogo controlado é uma técnica de manejo habitual de prevenção de incêndios florestais, sendo comumente praticada por entidades públicas e privadas, como método de controle da carga de combustíveis presente nas florestas (Castro *et al.*, 2010b). Tal técnica consiste na manipulação do fogo de forma deliberada, sob um planeamento cuidadoso e condições monitoradas, servindo como um redutor de carga dos combustíveis florestais perigosos e da quebra de continuidade dos mesmos, sendo esses combustíveis a matéria mais facilmente inflamável, como espécies herbáceas e arbustivas (Fernandes & Botelho, 2004; Fernandes & Loureiro, 2010; Bento-Gonçalves, 2011).

Diferentemente do que ocorre em um incêndio florestal, na aplicação do fogo controlado a queima ocorre rapidamente e é liberado uma enorme quantidade de calor,

com baixa transferência de energia para o solo, submetendo-o a temperaturas mais restritas na camada superficial (Castro *et al.*, 2010b). Segundo Doerr (2000), os incêndios de baixa intensidade que não alcançam temperaturas elevadas e que não afetam excessivamente a cobertura vegetal, não causam grandes impactos, e que em todo caso, ficam restritos a superfície e aos primeiros milímetros de profundidade do solo. Já em incêndios de maior intensidade, que alcançam altas temperaturas e consomem a maior parte da cobertura vegetal, podem ocasionar mudanças importantes no funcionamento do sistema do solo. Neste último caso, o período de restabelecimento das condições iniciais pode ser muito longo e as mudanças podem ser permanentes (Celis *et al.*, 2013).

A redução da quantidade de combustíveis evita que em épocas propícias para incêndios, o combustível facilmente volátil esteja altamente disponível no meio, diminuindo assim, o risco de incêndios em povoamentos florestais (Fonseca *et al.*, 2017). Segundo o relatório da Comissão Eventual para os Incêndios Florestais, Portugal (2004), as áreas florestais expressam 36% do território nacional. Além de representarem grande importância para o meio físico e biótico, possui grande relevância socioeconômica, sendo 4% do PIB nacional e gerando aproximadamente 160 mil empregos.

Por conta disso, a preservação da floresta nacional é de extrema importância. Uma maneira de minimizar os incêndios florestais é através do uso do fogo controlado, que é utilizado por exemplo no Parque Natural de Montesinho (PNM), reduzindo a carga de combustível vegetal, a fim de proteger seus povoamentos florestais (IPB/ICN, 2007; Fonseca *et al.*, 2011).

2.4.5 Impactos do fogo controlado nos processos e propriedades físicas do solo

Por mais que o fogo controlado seja uma ferramenta importante de prevenção aos incêndios florestais, constitui ainda assim, uma perturbação ao meio ambiente, e pode provocar impactos significativos no solo (Castro *et al.*, 2010b). Podem ser divididos basicamente em efeitos diretos, em consequência da combustão dos resíduos orgânicos e da temperatura alcançada; e indiretos, pelas mudanças produzidas no ecossistema, como a diminuição da cobertura vegetal, o aporte de cinzas e folhas parcialmente queimadas, e a mudança da flora (Neary *et al.*, 1999; Cerdà & Doerr, 2008).

As mudanças diretas podem ser vistas pelas modificações na sustentabilidade dos solos, na sua estrutura e funcionalidade, logo, proporcionam mudanças nas suas propriedades físicas, como a estabilidade dos agregados, a textura, a permeabilidade e a

densidade do solo (Neary *et al.*, 1999; Freitas & Gonçalves, 2004). Em fogos de movimento rápido e alta transferência de calor, como é o caso do fogo controlado, a transferência de energia para o solo é baixa, sendo limitada a camada superficial. Entretanto, é até camada de 10 a 15 cm que se encontra a maior parte dos nutrientes e a atividades de organismos, e mesmo com este ligeiro e breve aquecimento, por si só, já é capaz de causar mudanças diretas nas propriedades do solo (Castro *et al.*, 2010b).

A estabilidade dos agregados altera-se com o fogo, uma temperatura entre 200°C e 300°C já é o suficiente para promover alterações na estabilidade e no diâmetro dos agregados. Os mesmo autores constatam que em temperatura baixas (100°C-150°C), facilmente alcançadas em um fogo controlado, também é possível notar modificações, possivelmente pela quebra dos agentes agregadores, como a matéria orgânica. Com uma baixa estabilidade dos agregados, a porosidade diminui, logo a taxa de infiltração é reduzida (Guerra & Cunha, 1994; Thomaz, 2011).

Após o fogo, uma camada hidrofóbica surge sobre o solo, devido a liberação de constituintes de natureza lipídica presente no material vegetal ardido, que no solo se misturam com as partículas minerais, obstruindo os poros, afetando diretamente a permeabilidade (Imeson *et al.*, 1992; Are *et al.*, 2009; Woods & Balfour, 2010; Figueiredo *et al.*, 2013).

O colapso dos agregados somado com a obstrução dos poros por cinzas, elevam a densidade aparente do solo e diminuem sua porosidade, logo, as taxas de infiltração e a permeabilidade reduzem, intensificando assim, os processos erosivos (Pereira, 2018; Hubbert *et al.*, 2006). A supressão da vegetação também intensifica os agentes erosivos e de degradação, pois é através dela que se constitui um dos principais agentes de proteção do solo, e expõe o solo a fatores que facilitam a remoção e arraste de partículas, em especial em áreas com declives acentuados (Guerra e Cunha, 1994; Caria, 2011; Leitão *et al.*, 2011).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e Caracterização da área de estudo

O estudo desenvolvido neste trabalho foi realizado em uma área dentro do Parque Natural de Montesinho, próximo da aldeia de Aveleda ($41^{\circ}53'57.06''\text{N}$, $6^{\circ}40'55.39''\text{O}$), sendo uma área protegida no nordeste de Portugal com aproximadamente 750 km^2 (Fonseca *et al.*, 2017) (figura 8). A área apresenta um relevo ondulado, com cumeadas aplanadas a arredondadas, de declive suave a cotas superiores a 800 metros de altitude, cortado por vales profundos, que drenam uma rede hidrográfica de caracter temporário. A temperatura média anual é de 12°C e a precipitação média anual é de 850 mm, concentrada de outubro a março. O substrato geológico é derivado de xistos do Silúrico, formando Leptosolos úmbricos, com características pedregosas, de textura mediana, ácidos e com médio a alto teor de matéria orgânica na camada superficial (Agroconsultores e Coba, 1991; FAO/ UNESCO, 1988; Fonseca *et al.*, 2017).

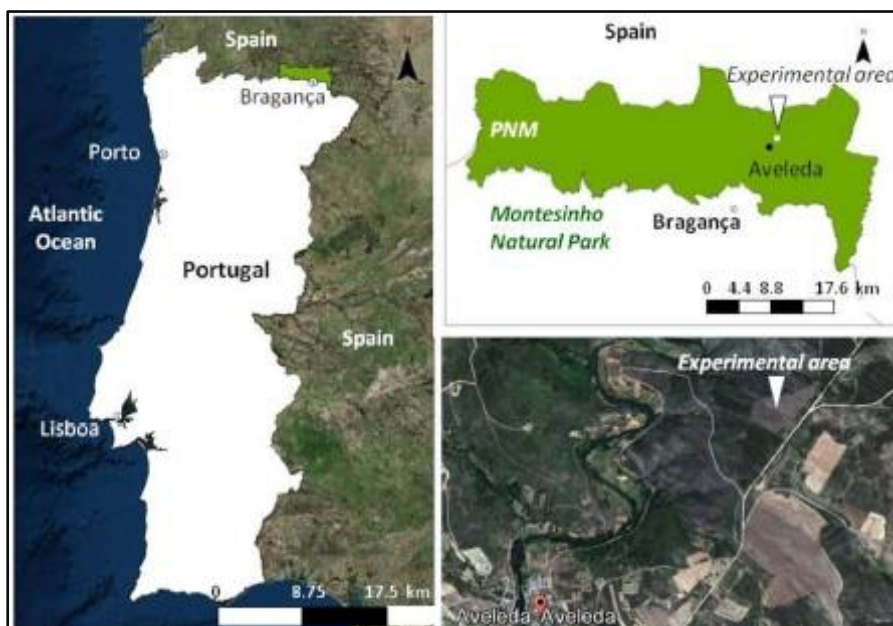


Figura 8: Localização da área de estudo no Parque Natural de Montesinho, NE de Portugal
Fonte: (Fonseca *et al.*, 2017)

A escolha do local, se deu ao fato, da área ser antigamente ocupada por espécies de pinheiros-bravos, que em agosto de 1998 sofreram com um incêndio, destruindo boa parte da floresta, e desde então, a área foi invadida pela vegetação arbustiva espontânea (matos). Em março de 2011, um fogo controlado foi aplicado na mesma área, com o intuito de controlar a vegetação e assim reduzir o risco de propagação do fogo a uma

parcela adjacente florestada com pinheiros (Fonseca *et al*, 2017). Após 10 anos do primeiro fogo controlado, em março de 2021, um novo fogo foi aplicado na mesma área e com o mesmo intuito: reduzir a vegetação arbustiva (matos) e o risco de incêndios nas áreas florestais vizinhas.

3.2 Fogo Controlado

Embora o Outono seja considerado o período mais propícios para a aplicação do fogo controlado, devido ao fato de não apresentar tantas espécies em fase de desenvolvimento quanto a primavera, a aplicação do fogo deste estudo ocorreu no dia 22 de março de 2021, início da primavera (Fernandes & Botelho, 2004). Realizada em conjunto das equipas de sapadores florestais do ICNF e dos bombeiros, acompanhado por equipas do MORE (Laboratório Colaborativo Montanhas de Investigação), e de alguns docentes e alunos do Instituto Politécnico de Bragança, da Universidade do Minho e do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Durante a aplicação do fogo, as equipas de bombeiros e sapadores estavam atentas para que nenhum fogo remanescente na vegetação fora da área delimitada fosse aceso. Foi também monitorada a temperatura das chamas, através de uma câmara térmica de infravermelho, a velocidade e direção do vento, com um medidor digital portátil. Além disso, a equipa do MORE (Laboratório Colaborativo Montanhas de Investigação) foi responsável pela quantificação do índice de intensidade do fogo (FWI), assim como, do relatório descritivo da aplicação deste fogo controlado (MORE, 2021).



Figura 9: Aplicação do Fogo Controlado

3.3 Avaliações de Campo

3.3.1 Parcelas e plano de amostragem

O estudo experimental contou com três momentos de amostragem, antes da aplicação do fogo controlado, imediatamente após o fogo e dois meses após o fogo, a fim de avaliar os efeitos a curto prazo produzidos em processos e propriedades do solo, resultantes desse tipo de gestão da vegetação. Nos três momentos, em 11 parcelas distribuídas em duas linhas retas, com uma distância aproximada de 15 metros entre elas, efetuaram-se observações de campo e colheitas de amostras para o estudo da vegetação, do horizonte orgânico e das propriedades físicas do solo (figura 10).

As coletas do solo antes, imediatamente e dois meses depois do fogo controlado, foram realizadas seguindo a mesma metodologia. As amostras recolhidas imediatamente após o fogo e dois meses depois foram realizadas ao entorno das parcelas delimitadas na situação pré fogo. A vegetação só foi avaliada antes do fogo e o horizonte orgânico foi avaliado nos momentos antes e imediatamente após o fogo.

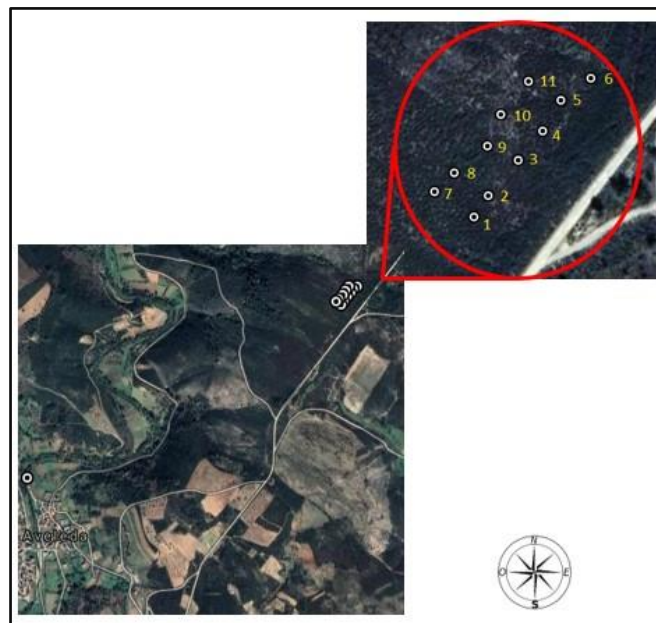


Figura 10: Localização das parcelas de amostragem na área de estudo
Fonte: Adaptado do Google Earth (2021)

Além das parcelas anteriores, após a queima, foram delimitadas outras 8 microparcels para a avaliação da perda de solo por erosão, sendo 4 delas instaladas em declive suave e 4 em declive acentuado, dentro da área queimada.

3.3.2 Recolha das amostras de solo e vegetação

A delimitação de cada uma das 11 parcelas se deu através da inserção de um quadrado metálico de $0,49\text{m}^2$ (70×70 cm) (figura 11). Em cada ponto, foram identificadas as espécies arbustivas presentes e determinada a altura (cm) da vegetação através de 9 medições em linhas paralelas, na parte superior, central e inferior do quadrado. Posteriormente, fez-se um corte raso de toda a vegetação com um alicate de corte ou serrote (dependendo do diâmetro do caule), havendo o cuidado de separar por espécies, e obtido o peso fresco no campo. Foram transportadas para o laboratório subamostras de cada espécie com vista à determinação da percentagem de humidade e quantidade de matéria seca. Após o corte da vegetação, avaliou-se a espessura do horizonte orgânico, realizando também 9 medições em linhas paralelas, na parte superior, central e inferior de cada parcela, e procedeu-se à recolha total do material orgânico, sendo posteriormente transportado para o laboratório.

A vegetação foi avaliada apenas antes da aplicação do fogo controlado, pois a medição após a queima apresentou dificuldades metodológicas devido as ocorrência de áreas não ardidadas ou mal ardidadas, o que impediu a recolha de amostras representativas.



Figura 11: Quadrado metálico utilizado como molde para as amostragens.



Figura 12: Recolha das amostras de solo não perturbadas

No seguimento, para a determinação da permeabilidade e da densidade aparente, recolheu-se em cada parcela, com um cilindro metálico de 100cm^3 , uma amostra não perturbada de solo na camada 0 – 5cm (figura 12). Já para análise granulométrica (textura) e determinação do teor em elementos grosseiros, fizeram-se buracos até 20 cm de profundidade, recolhendo-se amostras perturbadas para sacos de plástico em quatro profundidades, 0 – 3cm, 3 – 6cm, 6 – 10cm e 10 – 20cm.

3.3.3 Instalação das microparcelas de erosão

Para a determinação da perda de solo, foram instaladas nos dias subsequentes ao fogo, 8 microparcelas de erosão de 4 metros de comprimento por 1 metro de largura, em dois declives diferentes. Foram 4 parcelas na parte mais elevada e aplanada do terreno (cumeada), com declive médio de 6,93% (Declive 1) e 4 na parte mais baixa e íngreme (encosta), com declive médio de 16,51% (Declive 2), dispostas de forma a seguir o padrão natural do escoamento.

Cada microparcela foi limitada por chapas metálicas enterradas, para formar um retângulo de área conhecida, e na parte inferior, foi inserida uma peça triangular de metal, dotada de um orifício acoplado a uma mangueira, através da qual a água de escoamento e os sedimentos são armazenados em um reservatório de 10L de capacidade, disposto a jusante do triângulo (figura 13). O reservatório foi enterrado e coberto a fim de permitir um escoamento favorável e evitar perturbações.



Figura 13: Recolha do escoamento superficial e de solo por erosão

3.4 Métodos analíticos

3.4.1 Análises físicas do solo

As análises das características físicas foram realizadas nas amostras colhidas nos três momentos: antes, imediatamente após o fogo e dois meses após o fogo controlado. Todas as propriedades foram avaliadas na camada de 0 – 5cm, através da recolha de amostras de solo, não perturbadas, com um cilindro de 100 cm³, a exceção se deu para os elementos grosseiros e a textura, que foram avaliados até 20cm de profundidade, com a recolha de amostras perturbadas (0-3, 3-6, 6-10 e 10-20cm).

3.4.1.1 Elementos Grosseiros

Para a determinação dos elementos grosseiros (partículas com dimensões > 2mm), as amostras de solo foram previamente secas a 45°C durante 48h em estufa.

Posteriormente, cada amostra foi colocada num crivo de malha de 2 mm e sujeita a um movimento vibratório (figura 14) para a separação da terra fina dos elementos grosseiros. A fração que fica retida no crivo (partículas >2mm) constitui o lote de elementos grosseiros, o a que passa o crivo, constitui o lote de terra fina.



Figura 14: Equipamento para a determinação do teor de elementos grosseiros.

3.4.1.2 Textura

A análise granulométrica e a determinação da classe de textura do solo, foram realizadas na Universidade do Minho, pelo grupo da Professora Teresa Valente, no âmbito de colaboração científica com o IPB. Foi utilizado um equipamento sofisticado dessa Universidade (granulómetro laser) para analisar as amostras colhidas em cada uma das 11 parcelas, nas profundidades 0-3, 3-6, 6-10 e 10-20cm. Os resultados da análise granulométrica disponibilizados pela professora Teresa Valente, permitem a determinação das curvas granulométricas e da classe de textura do solo, de acordo com a escala granulométrica internacional.

3.4.1.3 Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade saturada do solo (K), foram coletadas 11 amostras não perturbadas em um cilindro de 100 cm³, esses cilindros foram dispostos em um permeâmetro de circuito fechado e carga constante (figura 15). Foram realizadas para cada momento, quatro determinações de K, em quatro dias consecutivos de medição, a

primeira medição corresponde a permeabilidade inicial (K_i) e a média das três subsequentes, correspondem a permeabilidade final (K_f).



Figura 15: Permeômetro de circuito fechado e carga constante

Com isso, para a determinação do valor do coeficiente de permeabilidade (K) foi utilizado o método da medição com nível de água constante, calculado por meio da lei de Darcy (equação 1). Posteriormente, foi classificado cada permeabilidade do solo através do quadro 1.

$$V = k * i * A * t \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

V – Volume de água que flui através da amostra (cm^3);

k – Coeficiente de permeabilidade (cm/h);

i – Gradiente de carga hidráulica (razão entre altura desde a superfície da lâmina de água até a base e o comprimento da amostra atravessada pelo fluxo);

A – Superfície da secção transversal da amostra (cm^2);

t – Tempo utilizado para o fluxo de água através da amostra (s).

Essa equação anteriormente citada é a aplicação operacional da lei de Darcy, que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso (Hillel, 1988).

Quadro 1: Classificação da permeabilidade dos solos (Figueiredo, 2011)

Classificação de permeabilidade (designação)	K (cm/h)
Muito rápida	>25,4
Rápida	12,7 – 25,4
Moderada	6,35 – 12,7
Moderadamente lenta	2,00 – 6,35
Lenta	0,50 – 2,00
Muito lenta	< 0,13

3.4.1.4 Densidade aparente

As mesmas amostras não perturbadas coletadas para o ensaio de permeabilidade foram utilizadas também para a determinação da densidade aparente. Tais amostras possuem volume conhecido de 100cm³, e foram secas a 105°C e pesadas, para a determinação da densidade aparente, como expresso na equação 2 (Figueiredo, 2011).

$$Dap = \frac{Msolo\ seco}{Vt} \quad (Equação\ 2)$$

Sendo:

Dap: Densidade aparente (g/cm³);

Psolo seco: Peso da amostra de solo seco a 105 °C (g);

Vt: Volume total da amostra, que corresponde ao volume do cilindro utilizado (cm³).

3.4.1.5 Capacidade de campo, Capacidade máxima para a água e Porosidade do solo

Ao final do ensaio de permeabilidade, as amostras foram deixadas a drenar durante dois dias, e posteriormente, removidas e pesadas (Psolo saturado). Após a pesagem, as amostras foram deixadas descansar por 24 horas (Psolo 24h), e por fim secas na estufa a 105°C por mais 24 horas, para a determinação do peso do solo seco (Psolo seco). Com esses valores, foi possível determinar a capacidade máxima para água (CMA) e a capacidade de campo (CC), através das seguintes equações (Figueiredo, 2011):

$$CMA(\%) = \frac{Psolo\ saturado}{Psolo\ seco - 1} \quad (Equação\ 3)$$

$$CC(\%) = \frac{Psolo\ 24h}{Msolo\ seco - 1} \quad (Equação\ 4)$$

E através da determinação do CMA, foi possível determinar a porosidade total, pela seguinte expressão:

$$P(\%) = Dap * CMA \quad (Equação\ 5)$$

Com isso, segue-se para a análise da microporosidade (MicroP) e o da macroporosidade (MacroP), utilizando-se as seguintes expressões:

$$MicroP(\%) = Dap * \%CC \quad (Equação\ 6)$$

$$MacroP = Porosidade\ total - MicroP \quad (Equação\ 7)$$

3.4.2 Capacidade de armazenamento de água no solo

Com os resultados obtidos anteriormente sobre as propriedades físicas do solo, foi possível calcular a capacidade de armazenamento de água no solo nos três momentos estudados, através da seguinte expressão:

$$\text{Armazenamento de água (mm)} = z * \frac{CC}{100} * Dap * \frac{(100-EGv)}{100} \quad (\text{Equação 8})$$

Z: Espessura do solo (mm);

CC: Capacidade de Campo (%);

Dap: Densidade aparente (g/cm³);

EGv: Elementos Grosseiros em volume (%);

Como os valores de elementos grosseiros se encontravam em unidade de massa, foi necessário corrigi-los para unidade de volume, através da equação 9. Através da sua multiplicação densidade real dos elementos grosseiros, que é o produto da densidade aparente pelo valor de correção (2,65) (Sampaio & Silva, 2007).

$$\%EGv = \%EGm * \frac{Dap}{2,65} \quad (\text{Equação 9})$$

3.4.3 Análises da vegetação e horizonte orgânico

Para a avaliação da biomassa seca e o teor de humidade presente na vegetação e no horizonte orgânico, as amostras foram secas na estufa a 65°C por 48h. Com o peso das amostras húmidas e secas, foi possível determinar o teor de humidade e biomassa seca das amostras, através das seguintes expressões:

$$\text{Teor de humidade (100\%)} = \frac{a-b}{b} * 100 \quad (\text{Equação 10})$$

$$\text{Teor de biomassa Seca (\%)} = 100 - \text{teor de humidade} \quad (\text{Equação 11})$$

Em que:

a: Peso antes da amostra ir à estufa;

b: Peso da amostra depois de ir à estufa a 65°C;

E então para a determinação da biomassa seca em kg.m⁻², foi efetuada a partir das seguintes expressões:

$$\text{Biomassa seca} \left(\frac{g}{0,49 \text{ m}^2} \right) = \text{Biomassa Total} * \frac{\text{Teor de biomassa seca (\%)}}{100} \quad (\text{Equação 12})$$

$$Biomassa\ seca\left(\frac{kg}{m^2}\right) = \frac{Biomassa\ seca\left(\frac{g}{0,49\ cm^2}\right)}{0,49*1000} \quad (Equação\ 13)$$

A vegetação antes do fogo também foi avaliada quanto à percentagem de cobertura vegetal em cada parcela. Que se sucedeu através da determinação visual de imagens capturadas em vista superior das parcelas delimitadas, e tendo como base um guia de cobertura percentual (Anexo II - iv). Com isso, a percentagem de cobertura do solo por tipo de vegetação e a respetiva percentagem de solo nu, foram determinadas.

3.4.4 Perda de solo por erosão

Para a determinação da taxa de erosão no local após o fogo controlado foram instaladas 8 microparcels, que permitiram a colheita da água de escoamento superficial e dos sedimentos arrastados. Foram realizadas duas coletas, cada uma após um evento de precipitação, que implicavam a troca dos reservatórios que continham a água de escoamento e sedimento e da remoção do material retido nas frentes das parcelas, para serem levadas a laboratório.

Em laboratório, o volume de água e a massa dos sedimentos em suspensão foram pesados. Os reservatórios com água e sedimentos foram, posteriormente, deixados para sedimentar, e assim que as partículas não estavam mais suspensas, parte da água foi removida e o restante, com a presença dos sedimentos, levado a estufa a 105°C, para eliminar o restante da humidade. Os sedimentos retidos nas frentes foram colhidos, levados a laboratório e pesados. A partir da determinação dos valores de sedimentos acumulados na peça da frente da microparcela de erosão, dos sedimentos suspensos na água de escoamento e no volume de água de escoamento, foi possível realizar o cálculo da perda de solo e do escoamento resultante, através das seguintes expressões (Fonseca *et al.*, 2011):

$$PS = \frac{(SedFrte + Sed\ susp)}{A} \quad (Equação\ 14)$$

$$E = \frac{V}{A} \quad (Equação\ 15)$$

Em que:

PS: Perda de solo (g.m⁻²);

SedFrt: Massa seca do sedimento recolhido nas frentes (g);

SedSusp: Massa seca do sedimento amostrado na água do reservatório (g);

E: Escoamento (mm);

V: Volume de água no reservatório (L);

A: área da parcela (m²);

Além da perda de solo e do escoamento, foram calculados complementarmente, o coeficiente de escoamento em percentagem (Coef. Esc), a concentração de sedimentos (Conc. Sed) e a perda de solo unitária (PS unitária), através das seguintes expressões:

$$\text{Coef. esc}(\%) = \frac{E(mm)}{P(mm)} * 100 \quad (\text{Equação 16})$$

$$\text{Conc. Sed} \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{\text{Sed.susp}(g)}{V(L)} \quad (\text{Equação 17})$$

$$\text{PS unitária} \left(\frac{g}{m^2 * mm}\right) = \frac{PS\left(\frac{g}{m^2}\right)}{P(mm)} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que o P é a precipitação total ocorrida durante o período entre a inserção dos bidões e a sua coleta.

3.5 Tratamento estatístico de dados

O conjunto de dados obtidos foi tratado utilizando o software Excel, tal como o teste dos *outliers*, a estatística descritiva e a análise de variância. A exceção se sucedeu com teste de normalidade, que foi tratado através do calculador disponível em <https://www.socscistatistics.com/tests/kolmogorov/> e do teste de Tukey, que foi tratado através do calculador disponível em https://astatsa.com/OneWay_Anova_with_TukeyHSD/. Os gráficos foram desenvolvidos utilizando os softwares Excel e MatLab.

3.5.1 Teste dos Outliers

O teste dos *outliers* retirou da análise os valores considerados extremos, por meio da avaliação dos intervalos interquartis (IQR). Mais especificamente, foram removidos os valores que não se encontravam no intervalo interquartil, ou seja, acima do terceiro quartil (Q3= 75° percentil) e abaixo do primeiro quartil (Q1= 25° percentil). Sendo uma

medida de tendência central robusta a valores extremos. Foram aplicadas as seguintes fórmulas:

$$\text{IQR} = \text{Q3} - \text{Q1} \quad (\text{Equação 19})$$

$$\text{Outlier inferior} = \text{Q1} - 1,5(\text{IQR}) \quad (\text{Equação 20})$$

$$\text{Outlier Superior} = \text{Q3} + 1,5(\text{IQR}) \quad (\text{Equação 21})$$

Por conta disso, os valores de permeabilidade foram calculados utilizando apenas 6 amostras, as propriedades físicas, assim como o armazenamento de água, com 8 parcelas e o horizonte orgânico com 9 parcelas. Os elementos grosseiros e vegetação, não possuíram *outliers*, sendo avaliados então, com 11 parcelas.

3.5.2 Teste de Normalidade Kolmogorov-Smirnov

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov. Ao fim do teste é informado o *P-value* (Valor-P) que se refere ao nível de significância de normalidade dos dados de entrada. Os resultados que apresentarem o P maior que o nível de significância ($P > 0,05$) são considerados normais e podendo assim, seguir para a análise de variância. (Anexo I - iii)

3.5.3 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância a um fator (ANOVA) foi aplicada para cada parâmetro do horizonte orgânico e das propriedades físicas, com exceção aos elementos grosseiros, que foi aplicado a ANOVA a dois fatores, assim como com as parcelas de erosão. Neste teste, é indicado se as diferenças entre as médias dos grupos observados são relacionadas a uma variabilidade real do experimento, ou se são meros produtos do acaso. Os valores que apresentaram o *valor-p* menor que o nível de significância 5% ($p < 0,05$), representam que neste conjunto de dados o tratamento experimental refletiu em uma diferença significativa.

3.5.4 Teste de Tukey da Diferença Honestamente Significativa (HSD)

Para os valores que apresentaram variância significativa, foi aplicado o teste de Tukey da Diferença Honestamente Significativa (HSD - *Honestly significant difference*), a 5% de probabilidade. Que compara em qual conjunto de grupos ocorreu uma variação significativa nos parâmetros analisados (Anexo I – v).

3.5.5 Teste de Correlação e Regressão

Na análise dos dados de vegetação, realizada apenas no momento antes do fogo, foi aplicada a análise de regressão e correlação. Esta analisa os dados amostrais para entender se, e como, duas ou mais variáveis estão relacionadas uma com a outra. Através do coeficiente de correlação, R , é possível avaliar o grau de correlação entre as variáveis analisadas, e, através da equação de regressão, avaliar a forma como se relacionam.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fogo controlado

A área queimada foi de aproximadamente 5 ha, com declividade média de 5,9%. As condições meteorológicas naquele dia foram favoráveis para o controle do fogo, apresentando temperatura mínima de $-1,7^{\circ}\text{C}$ e máxima de $16,9^{\circ}\text{C}$, com zero de precipitação, ventos partindo do Leste a 7,2 km/h e chegando a 27km/h a Oeste, a humidade relativa média ficou em 64%, apresentando mínima de 21% e máxima de 93%.



Figura 16: Aplicação do fogo controlado no Parque Natural de Montesinho

O primeiro parâmetro do índice de intensidade do fogo é o próprio FWI, que situava-se na classe de perigo Alto, entretanto, foram obtidos os seguintes resultados para os demais parâmetros: a humidade dos Combustíveis Finos (FFMC) estava na faixa de 50 – 75%, correspondendo a uma taxa de ignição difícil, com o perímetro do fogo a apresentar quebras e a propagação do fogo requeria vento; o índice de seca (DC) apresentou em termos de valor absoluto 17,2, indicando que a ação foi executada dentro da janela de valores adequados; o índice de húmus (DMC) ficou situado na classe entre 25 a 50, indicando que era de baixo a médio o potencial das chamas reascenderem e da possibilidade de ocorrência de fogo subterrâneo, bem como do impacto na qualidade do ar e visibilidade; a propagação inicial do fogo (ISI) apresentou um valor de 4,79, sendo considerada uma evolução inicial lenta; já a disponibilidade do combustível, apresentou valor de 17,10, indicando que a disponibilidade era baixa. Ademais, a progressão do fogo apresentou dificuldades, não permitiu que o combustível fosse totalmente consumido.

Além dos índices de intensidade, foi medida a temperatura das chamas. A temperatura mais alta encontrada foi de 670 °C e a mínima foi de 39,1 °C, apresentando variações conforme a localidade (figura 17).

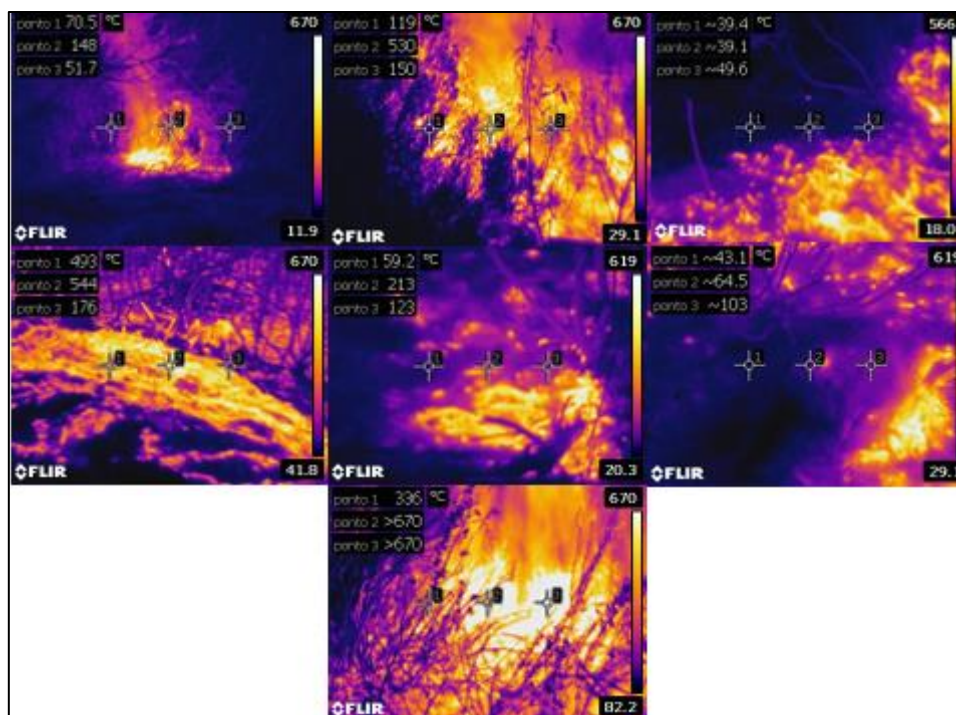


Figura 17: Imagens térmicas do fogo controlado

Analisando de forma global os índices anteriormente descritos e as características do dia da ocorrência do fogo controlado, pode-se considerar que a queimada da área de matos não foi intensa, apresentando condições favoráveis a uma aplicação contida. O grau de intensidade do fogo está relacionado com a forma como o ecossistema irá responder ao seu impacto. Por isso, a queima deverá ser considerada de baixa severidade.

4.2 Vegetação e Horizonte Orgânico

4.2.1 Vegetação e percentagem de cobertura

Na avaliação da vegetação, foram encontradas nas 11 parcelas de amostragem as seguintes espécies: Esteva (*Cistus ladanifer*), Carqueja (*Chamaespartium tridentatum*), Urze (*Erica australis ssp. aragonensis*), Sargaço (*Cistus psilosepalus*) e Rosmaninho (*Lavandula stoechas*), conforme identificadas em trabalhos anteriores na mesma área de estudo (Fonseca *et al.*, 2017) e na carta de vegetação do PNM (IPB/ICN, 2007).

As espécies de maior representatividade por número de parcelas e biomassa, foram a Carqueja (61,75%), a Urze (26,53%) e a Esteva (6,05%), respectivamente, as

espécies com menor representatividade foram a Rosmaninho (3,43%) e o Sargaço (2,22%). A biomassa em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ de cada espécie por parcela é apresentada na figura 18.

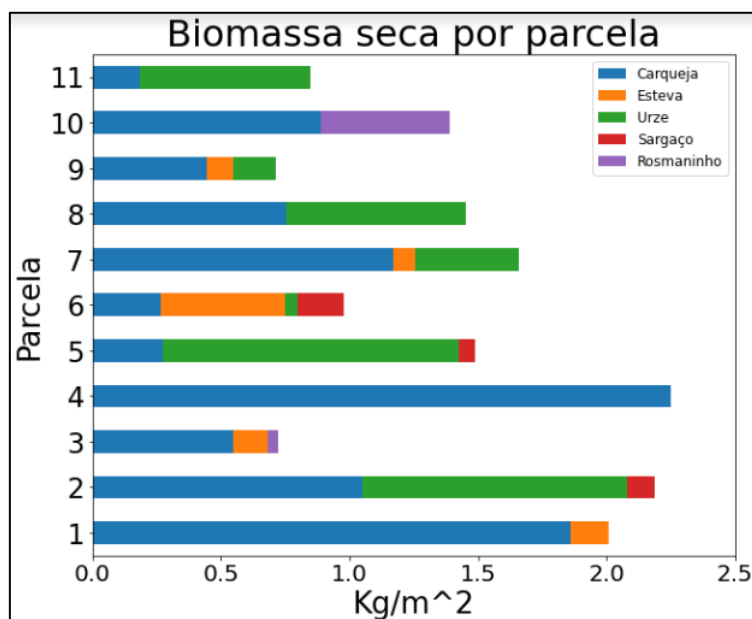


Figura 18: Biomassa das espécies vegetais por parcelas

Além de maior incidência e biomassa, a Carqueja é dentre as cinco, a que apresentou menor teor médio de humidade, com 49,08%, como indicado na figura 19, seguida pelo Rosmaninho (50,83%), Urze (64,62%), Sargaço (71,11%) e finalmente a Esteva (75,26%). Estes teores de humidade afetaram o fator de combustão de cada espécie, atingindo os valores mais elevados para a Carqueja (cerca de 80%) e os mais baixos para a Esteva (cerca de 50%).

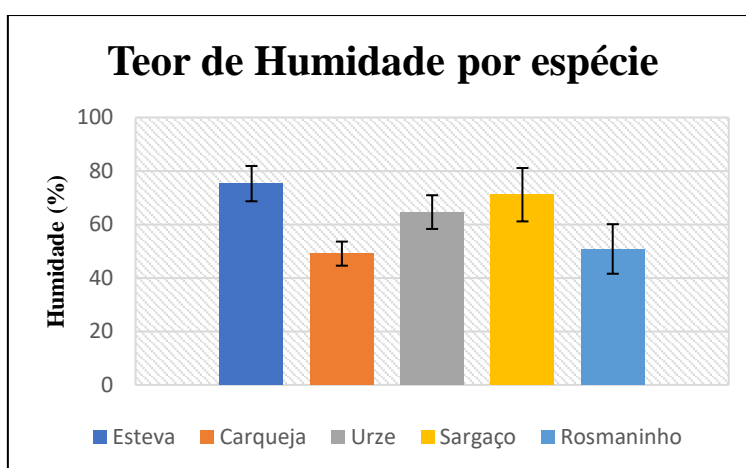


Figura 19: Médias de teor de Humidade por espécie vegetal

A cobertura vegetal de cada parcela por espécie, pode ser vista através da figura 20. A média de cobertura vegetal total ficou na casa dos 78,18% e o solo nu uma média de 21,81%.

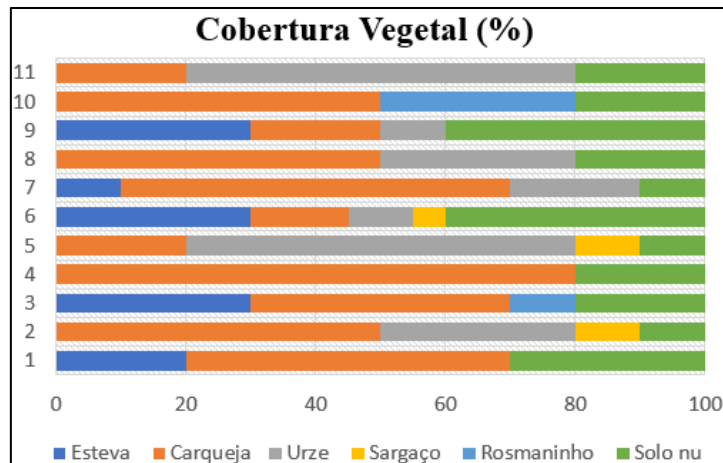


Figura 20: Cobertura Vegetal por espécie

O Quadro 2 apresenta os dados extraídos quanto a percentagem de cobertura vegetal e solo nu, a média de altura da vegetação e a biomassa total, por parcela. Esses resultados foram correlacionados, mas não foram significativas ($p > 0,05$). As variáveis que apresentaram correlação mais elevada foram a percentagem de cobertura vegetal pela biomassa, com um $R^2 = 0,31$. Já a correlação entre a biomassa pela altura e a percentagem cobertura vegetal pela altura, apresentaram $R^2 = 0,034$ e $R^2 = 0,030$, respetivamente. Isso quer dizer que, estatisticamente, nenhuma variável apresentou correlação significativa, ou quando interfere, é pouco expressiva.

Quadro 2: Características da vegetação quanto a % de cobertura, altura e biomassa

Parcela	Solo Nu (%)	Cobertura Vegetal (%)	Média altura (cm)	Biomassa Total (kg.m^{-2})
1	30	70	65	2,01
2	10	90	69,11	2,19
3	30	70	62,12	0,72
4	20	80	50,56	2,25
5	10	90	89,48	1,49
6	40	60	69,78	0,98
7	10	90	64,33	1,67
8	20	80	67,22	1,45
9	40	60	59,78	0,71
10	20	80	61,72	1,39
11	20	80	34,56	0,85

Em um estudo realizado por Bompastor (2008), correlações idênticas às apresentadas neste trabalho foram realizadas, mostrando que a correlação entre a percentagem de cobertura vegetal e a altura da vegetação são inversamente proporcionais, e a percentagem de cobertura vegetal e a biomassa aérea são diretamente proporcionais. Comparando os estudos, a correlação entre percentagem de cobertura vegetal e a altura

da vegetação, foram dispares, não sendo conclusivo se a altura está relacionada com a percentagem de coberto vegetal.

Após a aplicação do fogo, a vegetação e horizonte orgânico se encontraram parcialmente queimados, e foi possível notar que algumas raízes permaneceram (figura 21). A resposta que cada planta apresenta sobre a presença do fogo se dá, principalmente a sua morfologia, altura, percentagem de cobertura e formação de biomassa.



Figura 21: Vegetação antes e depois do fogo controlado no Parque Natural de Montesinho

As diferentes respostas das vegetações para com o fogo decorrem das suas morfologias, por apresentem características que as tornam mais adaptadas a esse fenómeno, e denominadas de plantas pirófitas. As espécies em sua maioria são resistentes a ação do fogo ou se tornam mais sensíveis na sua ausência, sendo um aspeto chave para viabilidade dessas populações vegetais. Como por exemplo, apresentam a sua germinação estritamente ligada ao fogo (e.g. germinação pirogénica) (Ojeda 2003; Ojeda *et al.*, 2010).

A urze, por exemplo, apresenta um sistema radical bastante superficial formado de raízes grossas, denominadas por alguns de ‘toros’ (Bompastor, 2008). Raízes mais profundas e grossas, provavelmente resistem mais ao fogo, em comparação com raízes mais superficiais e finas.

4.2.2 Horizonte Orgânico

Dentre as características já citadas que afetam o ambiente, o horizonte orgânico também é uma delas. Espécies que produzem maior quantidade de resíduos orgânicos protegem mais o solo contra os processos erosivos, entretanto, conforme a intensidade do fogo, o horizonte orgânico é afetado pelas chamas, conduzindo à redução da biomassa e a produção de cinzas (figura 22).



Figura 22: Horizonte Orgânico antes e depois do fogo controlado

A média de umidade e biomassa seca do horizonte orgânico antes do fogo foi de 39,27% e 0,568 kg.m⁻², e pós fogo ficou em 5,33% e 0,456 kg.m⁻² (figura 23 e 24). Dentre esses resultados, apenas o teor de umidade apresentou uma diminuição significativa. A espessura do horizonte orgânico reduziu significativamente, passando de uma média de 1,38 cm para 0,95 cm, e a densidade passou de 85,34 kg.m⁻³ para 65,28 kg.m⁻³, não sendo significativa a redução (figuras 25 e 26).

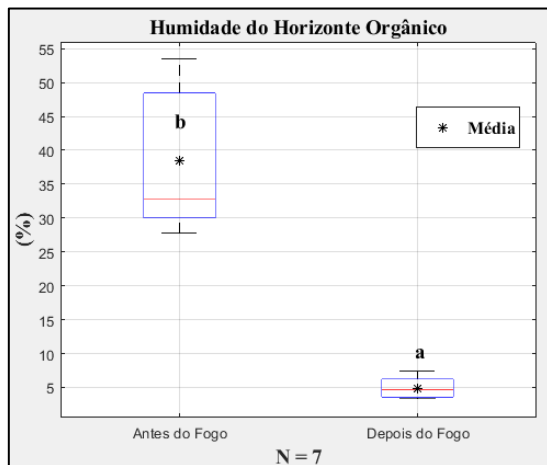


Figura 23: Umidade do horizonte orgânico antes e pós fogo

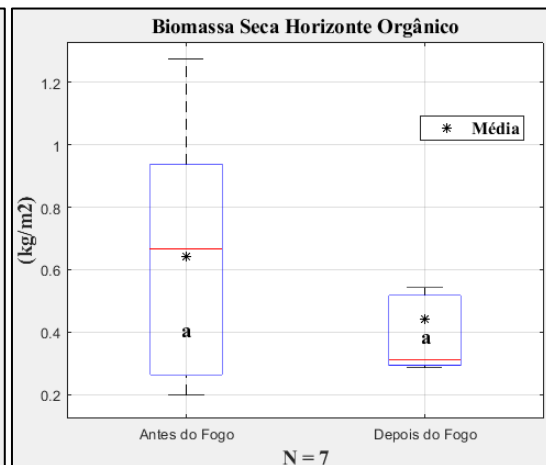


Figura 24: Biomassa seca do horizonte orgânico antes e pós fogo

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, P < 0,05)

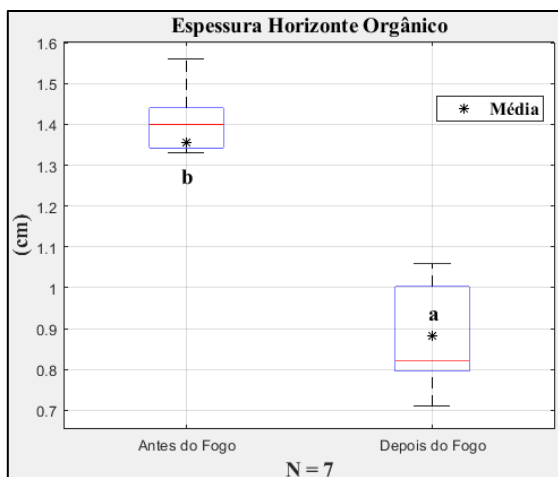


Figura 25: Espessura do horizonte orgânico antes e pós fogo

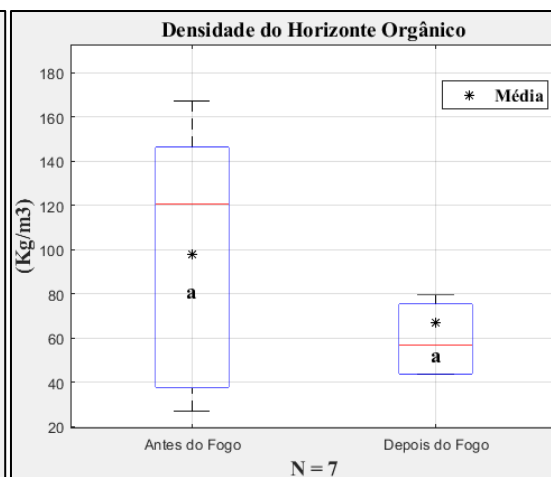


Figura 26: Densidade do horizonte orgânico antes e pós fogo

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, $P < 0,05$)

Além da diminuição significativa da humidade, a espessura do horizonte orgânico também se alterou, isso possivelmente se deu, pela queima parcial e redução do tamanho das partículas que constituem o horizonte orgânico. Segundo Thomaz (2011), o horizonte orgânico é a camada que primeiro protege o solo e é onde estão presentes a matéria orgânica transiente, os filamentos de fungos e outros importantes agentes cimentantes de macro agregados, que ajudam na estruturação e manutenção do solo. Conforme a intensidade do fogo, essa camada orgânica pode ser suprimida e acarretar a diminuição dos agregados do solo, e o preenchimento da camada superficial do solo por uma biomassa carburada, denominada de cinzas e carvão (Mehdi *et al.*, 2012). Contudo, como visto na figura 24, a redução da biomassa não foi significativa, constatando que o horizonte orgânico não foi totalmente consumido, provavelmente devido à baixa intensidade do fogo, aprestando uma mistura de vegetação parcialmente carburada e cinzas.

Essas cinzas são uma mistura complexa de materiais orgânicos e inorgânicos, que podem afetar de diferentes maneiras o solo, em especial sua hidrologia (Brook & Wittenberg, 2016). Segundo Bodí *et al.* (2011), se produzidas em baixas temperaturas/severidades, apresentam características mais hidrofóbicas, do que as produzidas em queimas de alta temperatura e severidade. Logo, um fogo de baixa severidade pode não afetar a hidrofobicidade do solo, mas pode produzir uma camada de cinzas hidrofóbicas. Essas são incorporadas no solo diminuindo assim, a permeabilidade na superfície ou a alguns centímetros de profundidade, favorecendo a desagregação e

erosão do solo, sobretudo em locais com declives acentuados (González-Pelayo *et al.*, 2015; Pinto, 2009). Brook & Wittenberg (2016) discutiram também que as cinzas apresentam na sua composição óxidos (CaO, KO, MgO), que por sua vez, podem elevar o pH acima do ponto de carga zero dos mineiras e promover a dispersão do solo e posteriormente, promover a perda de solo por erosão.

4.3 Propriedades Físicas do Solo

Neste estudo, as propriedades físicas do solo, em função da determinação da permeabilidade, foram analisadas apenas na camada 0 - 5 cm, com exceção dos elementos grosseiros. Devido ao facto de as modificações provocadas pelos incêndios serem mais significativas na superfície do solo, diminuindo em profundidade (Macedo & Sardinha, 1993; Are *et al.*, 2009).

4.3.1 Estatística dos Parâmetros analisados

No conjunto de dados todos os parâmetros apresentaram um nível de significância de normalidade de $P > 0,05$, com exceção de um valor, que não foi considerado, devido ao fato que após a remoção de seus *outliers*, este valor tendeu a normalidade. Devido também ao teste dos *outliers*, o número de amostras analisadas em cada parâmetro variou. No Quadro 3, é possível verificar as médias e os coeficientes de variação (CV) por número de amostras (N).

Quadro 3: Estatística descritiva dos parâmetros em cada período de amostragem

Parâmetros	N	Antes do Fogo		Imediatamente pós Fogo		2 Meses pós Fogo	
		Média	CV	Média	CV	Média	CV
Kinicial (cm.h⁻¹)	6	67,07	0,951	84,90	0,850	40,53	0,703
Kfinal (cm.h⁻¹)	6	49,28	0,995	20,14	0,533	19,86	0,486
Dap (g.cm⁻³)	8	0,781	0,246	1,02	0,107	1,04	0,115
CMA (%)	8	0,818	0,333	0,584	0,176	0,576	0,155
CC (5)	8	0,792	0,337	0,511	0,192	0,505	0,160
P (%)	8	0,598	0,122	0,586	0,070	0,595	0,060
MicroP (%)	8	0,579	0,127	0,512	0,088	0,521	0,039
MacroP (%)	8	0,019	0,043	0,074	0,297	0,0739	0,119
EG 0 – 3cm	11	0,258	0,408	0,265	0,265	0,286	0,300
EG 3 – 6cm	11	0,321	0,382	0,334	0,420	0,300	0,338
EG 6 – 10cm	11	0,399	0,386	0,437	0,414	0,395	0,295
EG 10 – 20cm	11	0,493	0,360	0,539	0,395	0,471	0,332
Armaz. Água (mm)	8	26,48	3,41	22,21	2,16	22,99	1,78

N: número de amostras; CV: Coeficiente de variação; K: Permeabilidade; Dap: Densidade aparente; CMA: Capacidade máxima para água; CC: Capacidade de Campo; P: Porosidade Total; MicroP: Microporosidade; MacroP: Macroporosidade; EG: Elementos Grosseiros; Armaz. Água: Armazenamento de água.

Cada parâmetro foi submetido a uma análise de variância a um fator, comparando a variação dos dados nos três momentos de análise (antes, imediatamente e dois meses pós fogo). Os resultados que apresentaram um valor $p < 0,05$ expressam que houve uma diferença significativa nas parcelas de amostragem (Quadro 4). Os parâmetros que apresentaram diferenças significativas foram a densidade aparente (Dap), a capacidade máxima de água (CMA), a capacidade de campo (CC), microporosidade (MicroP), a macroporosidade (MacroP) e o armazenamento de água no solo (Armaz.água).

Quadro 4: Análise de variância a um fator testando o efeito dos momentos de amostragem (Antes do fogo, imediatamente pós fogo, dois meses pós fogo)

Parâmetros	N	Valor- p		
		Antes	Imediatamente após	2 Meses
Ki (cm.h⁻¹)	6	0,431		
Kf	6	0,174		
Dap	8	0,002		
CMA	8	0,018		
CC	8	0,003		
P	8	0,894		
Micro P	8	0,047		
Macro P	8	4,09E-08		
Armaz. Água	8	0,0125		

N: número de amostras

Para os elementos grosseiros, foi utilizada a ANOVA a dois factores. Comparou-se as variações eram significativas entre os três momentos amostrados, entre as profundidades e/ou entre a interação de ambas. Dentre as relações citadas, a variação só foi significativa entre as profundidades, apresentando um valor- $p < 0,05$, como expresso no Quadro 5.

Quadro 5: Análise de variância a dois factores

Fonte de Variação	Valor - p
Entre os momentos	0,546
Entre as profundidades	2,26E-09
Interação	0,971

Os parâmetros que estão em negrito nos quadros 4 e 5, foram submetidos a uma análise complementar para encontrar em qual momento houve a fonte significativa de variação. O teste complementar foi o de Tukey (HSD).

4.3.2 Elementos Grosseiros

Os valores relativos aos elementos grosseiros em cada profundidade não obtiveram diferenças consideradas significativas entre os três momentos (antes, imediatamente pós fogo e dois meses após o fogo). Já as diferentes profundidades apresentaram diferenças significativas, entre a de 0 – 3cm e 3 - 6cm com relação a de 10 – 20cm, o que é de se esperar, pois os elementos grosseiros aumentam conforme aumenta a profundidade, tal fator não está relacionado com a presença do fogo, sendo algo irrelevante para o estudo. Mesmo não sendo significativo, os elementos grosseiros aumentaram ligeiramente nas quatro camadas logo após o fogo, e tenderam a diminuir no momento 2 meses depois do fogo, com exceção da profundidade 0 – 3cm.

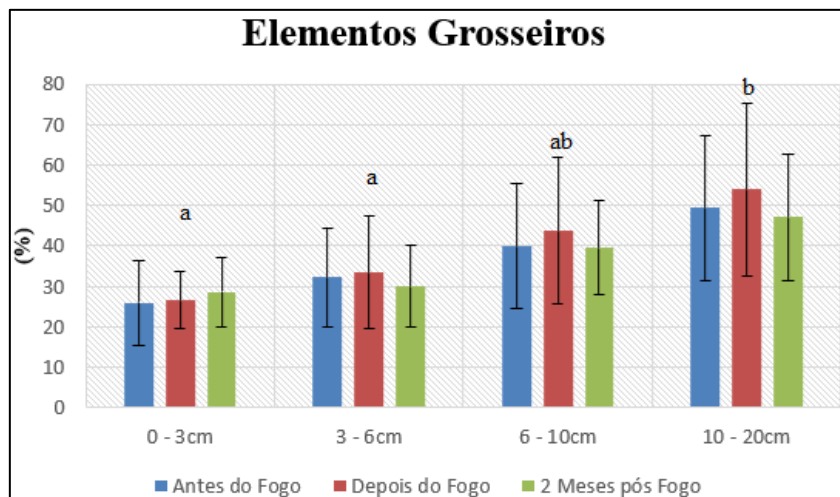


Figura 27: Elementos Grosseiros nas quatro camadas amostradas

Nota: As profundidades representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, $P < 0,05$)

O aumento dos elementos grosseiros após o fogo, pode-se dar ao aquecimento do solo pelo fogo, aumentando a meteorização. Porém, contradiz ao estudo realizado por Leite (2011), que expressa uma redução dos elementos grosseiros após o fogo, que se dá ao fato da superfície estar mais exposta à erosão, pois com o solo nu, sem qualquer proteção, as partículas finas são facilmente arrastadas por erosão (Costa, 1991). Neste estudo a redução se deu apenas após dois meses do fogo, o que pode ser devido ao solo estar se reestabelecendo as condições anteriores ao fogo ou condizer com o apresentado por Costa (1991), visto que a remoção o arraste das partículas demanda tempo para que sofra com os efeitos da erosão.

4.3.3 Textura

A textura foi analisada antes (figuras 28 e 29) e imediatamente após o fogo controlado (figuras 30 e 31), em relação a 4 frações do solo: argila, limo, areia fina e areia grossa. É possível perceber que dentre as frações, o limo é o que apresenta maior representatividade, seguido pela areia fina, areia grossa e argila.

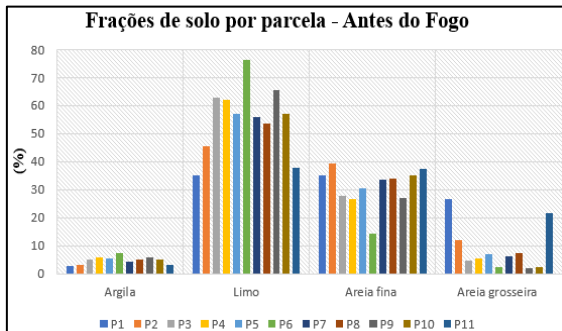


Figura 28: Frações do solo por parcela no antes do fogo

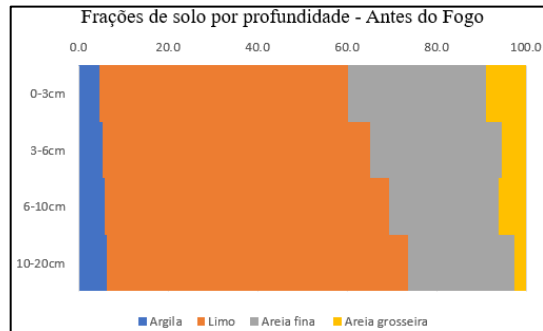


Figura 29: Frações do solo por profundidade antes do fogo

A textura antes e imediatamente após o fogo variou pouco, apresentando na camada de 0 – 3cm para o momento antes do fogo, uma média de 4,8% de argila, 55,4% de limo, 30,9% de areia fina e 8,9% de areia grossa. Para o momento imediatamente após o fogo, na camada de 0 – 3cm, a média de argila ficou em 5,08%, o limo em 56,11%, a areia fina em 31,22% e a areia grossa em 7,16%.

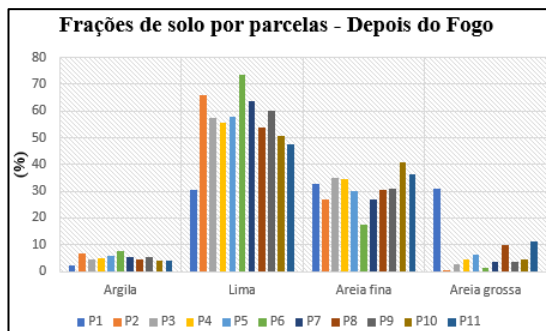


Figura 30: Frações do solo por parcel depois do fogo

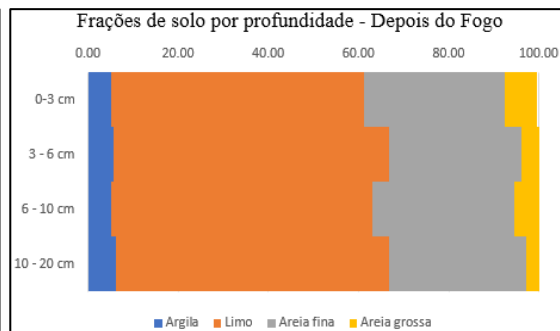


Figura 31: Frações do solo profundidade depois do fogo

Em todas as profundidades o solo apresentou uma textura limosa, devido à alta percentagem de limo e uma fração baixa de argila. A classe de textura não sofreu alterações entre os momentos antes e imediatamente pós fogo.

Nas figuras 32 e 33, se encontram as curvas granulométricas relativas aos momentos antes e imediatamente após o fogo. A única diferença notável entre os casos, é que a curva do antes do fogo apresentou maior variação entre as profundidades, se comparada com a curva do imediatamente pós fogo, indicando que a granulometria após

o fogo é mais homogênea entre as profundidades. Segundo González-Pérez *et al.* (2004), a textura do solo pós-fogo têm a tendência a ser mais grosseiras, o que contradiz com o exposto neste estudo, já que a textura apresentou pouca variação.

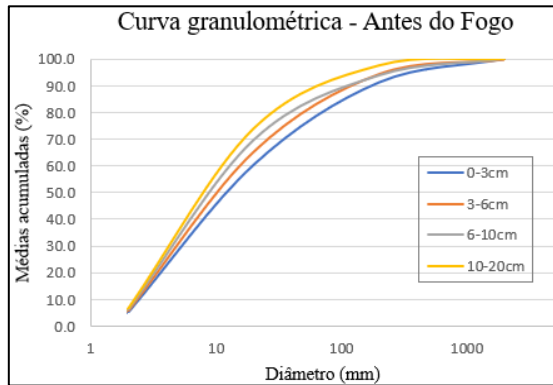


Figura 32: Curva granulométrica do momento antes do fogo

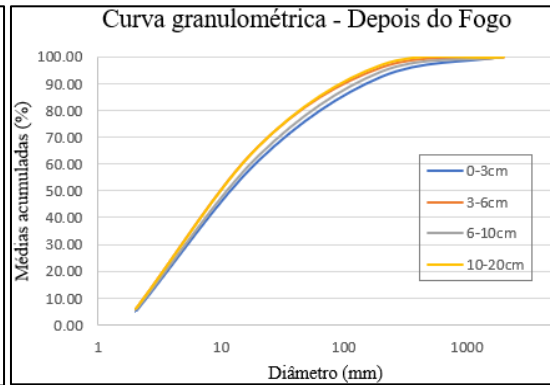


Figura 33: Curva granulométrica imediatamente pós fogo

4.3.4 Densidade Aparente

A média da densidade aparente (dap) apresentou um aumento significativo entre os momentos antes ($0,781 \text{ g.cm}^{-3}$) e imediatamente pós fogo ($1,02 \text{ g.cm}^{-3}$), mostrando um valor de $1,04 \text{ g.cm}^{-3}$ dois meses após fogo. O acréscimo entre os dois momentos pós fogo não é significativo, como representando na Figura 34.

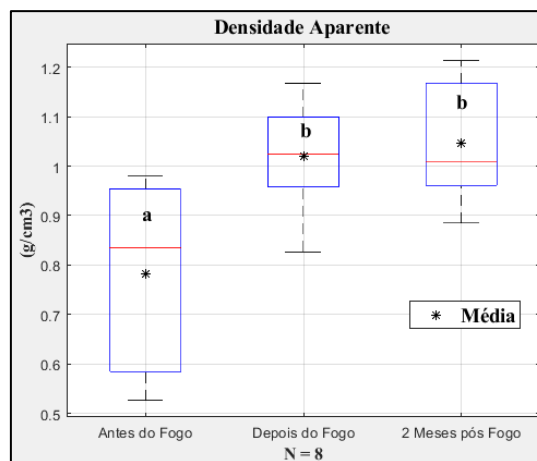


Figura 34: Densidade aparente na camada de 0 - 5cm

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes, diferem significativamente entre si (Teste HSD, $P < 0,05$)

Segundo Neary *et al.*, (2005), a densidade aparente é a massa de solo seco por unidade de volume total, representando o volume de poros presente nas amostras de solo. Após o fogo, ocorreu um aumento significativo da densidade aparente, assim como em pesquisas semelhantes como a de Leite (2011) e Pereira (2018), em que resultados

análogos foram obtidos, citando que após a ocorrência de um fogo, a densidade aparente do solo tendeu a aumentar.

Hubbert *et al.*, (2006), afirma que o aumento da densidade aparente está relacionado com uma diminuição da permeabilidade e da porosidade. DeBano (1998), afirma que a presença do fogo, devido ao aquecimento do solo proporcionado, pode destruir a estrutura do solo, afetando tanto a porosidade total quanto o tamanho dos poros. Segundo Giovannini *et al.*, (1988), a destruição da agregação do solo e a perda de matéria orgânica pelo fogo, contribuem para o aumento da densidade aparente.

4.3.5 Porosidade do solo

A porosidade total é uma relação dos microporos e dos macroporos presentes no solo e representa uma função da densidade aparente. Tal propriedade não apresentou uma variação significativa, entre os três momentos de análise (antes, imediatamente e dois meses após o fogo). Essa variação não significativa, entretanto, representou uma diminuição, de 59,87% do antes do fogo para 58,65 %, imediatamente pós fogo, voltando para 59,5% no momento dois meses depois do fogo.

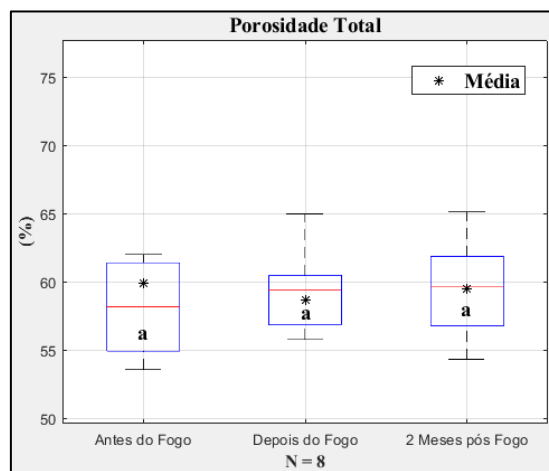


Figura 35: Porosidade Total na camada 0 - 5cm

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, $P < 0,05$)

Os valores encontrados de microporosidade e macroporosidade nos dois momentos após o fogo, apresentaram uma diminuição e um aumento, respectivamente. A microporosidade correspondeu a uma diminuição de 57,96% para 51,25%, no momento imediatamente após o fogo, e 52,11% dois meses após o fogo. A macroporosidade apresentou um aumento de 1,91% do momento antes do fogo para 7,40%, imediatamente após o fogo, e 7,39% dois meses após o fogo. Apenas os valores da macroporosidade

expressaram variações significativas entre os três momentos de amostragem, mediante o teste HSD.

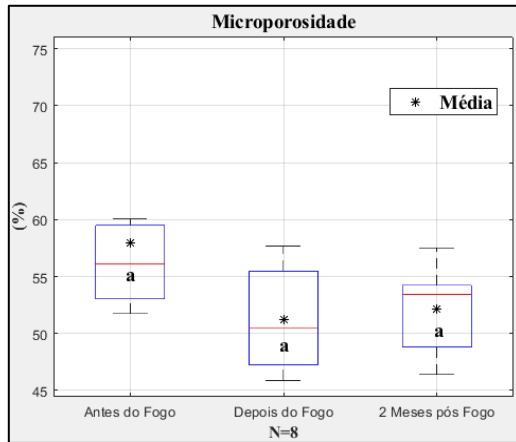


Figura 36: Microporosidade na camada 0 - 5cm

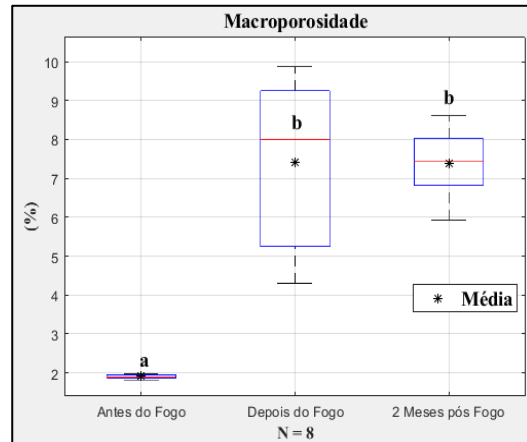


Figura 37: Macroporosidade na camada 0 - 5cm

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, $P < 0,05$)

No estudo de Leite (2011), a porosidade total do solo apresentou diminuição após a presença do fogo. Segundo Neary *et al.*, (2005), a porosidade do solo diminui em função do colapso da estrutura do solo pelo fogo, em especial a macroporosidade. Batista (1995) afirma que, a porosidade do solo também pode ser afetada em áreas ardidas, em decorrência da redução da presença dos microorganismos e outros organismos da fauna do solo pelo efeito do fogo. Além disso, com a remoção da vegetação pelo incêndio e a manta morta subjacente, expõe o solo, e a porosidade do solo pode diminuir devido ao impacto das gotas de chuva sobre o solo, podendo aumentar as quantidades de escorrência (Moreira *et al.*, 2010).

A ligeira redução da porosidade total e o aumento da macroporosidade contradizem os autores citados anteriormente. Entretanto, uma outra hipótese pode ser dita sobre os macroporos, é que devido ao aquecimento do solo, os poros podem sofrer um colapso e então aumentar.

4.3.6 Capacidade Máxima para Água e Capacidade de Campo

Tanto a capacidade máxima para a água (CMA), quanto a capacidade de campo (CC), apresentaram uma diminuição significativa nos valores pós fogo. A CMA apresentou uma diminuição de 81,79 % para 58,46% (imediatamente pós fogo) e 57,68% (2 meses pós fogo). Já a CC apresentou uma redução de 79,20% para 51,15% (imediatamente pós fogo) e 50,51 % (2 meses pós o fogo). O que indica que logo após o

fogo tanto a CMA e a CC apresentam uma redução significativa e que com o passar de um período de dois meses tenderam a aumentar ligeiramente (figuras 38 e 39).

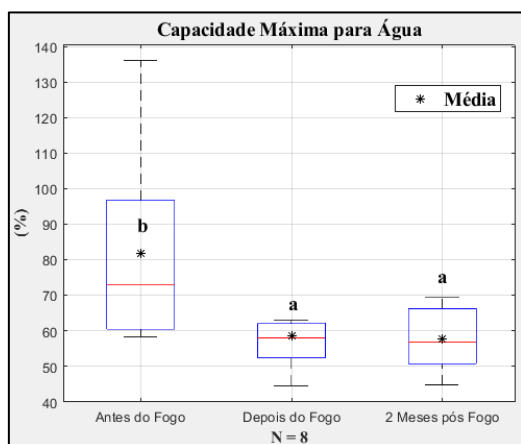


Figura 38: Capacidade máxima de água na camada 0 - 5cm

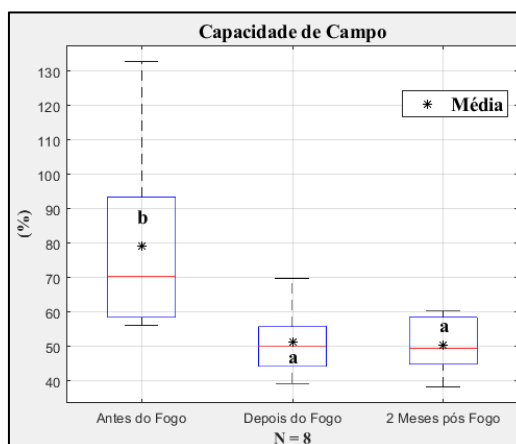


Figura 39: Capacidade de Campo na camada 0 - 5cm

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, $P < 0,05$)

No estudo de Pereira (2018), a capacidade de campo e a capacidade máxima para a água, apresentaram valores maiores nas áreas não ardidas, com relação às ardidas. A capacidade máxima para a água tende a aumentar à medida que o nível de matéria orgânica no solo aumenta, entre outras razões devido à afinidade da matéria orgânica pela água. Após o fogo, a matéria orgânica foi parcialmente consumida, podendo ser um dos fatores da diminuição da capacidade máxima para água e da capacidade de campo.

4.3.7 Permeabilidade

A permeabilidade tanto inicial (K inicial) quanto final (K final) apresentaram variações não significativas do antes para os dois momentos pós fogo. Na permeabilidade inicial, o valor imediatamente após o fogo apresentou um pequeno aumento ($84,90 \text{ cm.h}^{-1}$), quando comparado com a situação antes do fogo ($67,07 \text{ cm.h}^{-1}$), voltando a diminuir dois meses após o fogo ($40,52 \text{ cm.h}^{-1}$). Com relação à permeabilidade final, ocorreu uma diminuição de $49,28 \text{ cm.h}^{-1}$ do antes do fogo para $20,14 \text{ cm.h}^{-1}$ e $19,86 \text{ cm.h}^{-1}$ imediatamente e dois meses pós fogo, respectivamente (figura 40). Em ambos os casos, a velocidade de escoamento foi classificada de rápida a muito rápida. Como o K final são os valores da permeabilidade do solo em uma situação mais estável da análise, sendo calculada pela média das três últimas medições, são resultados mais fiáveis do que os de K inicial.

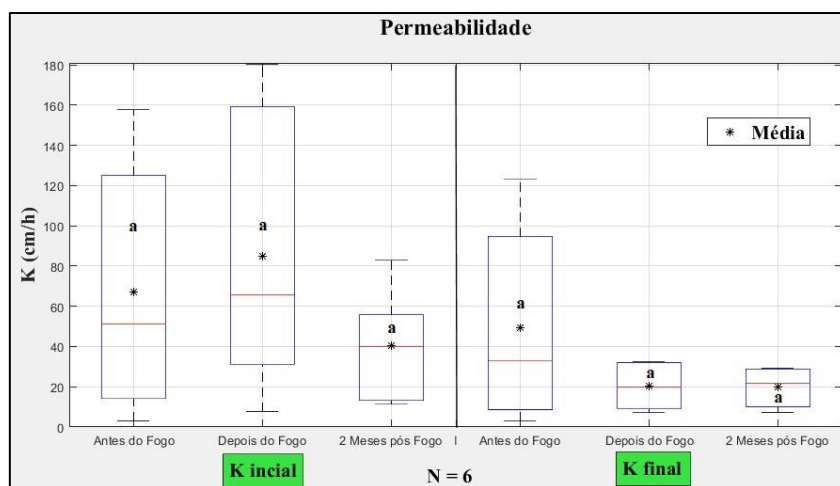


Figura 40: Permeabilidade na camada de 0 - 5cm

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, $P < 0,05$)

No estudo de Fonseca *et al.* (2017), a média dos valores de permeabilidade decresceu de 22 cm h^{-1} , na condição antes do fogo, para 14 cm h^{-1} imediatamente após o fogo, e apresentou um aumento no dois meses depois do fogo para 113 cm h^{-1} . O resultado obtido neste estudo no momento imediatamente após o fogo é similar ao de Fonseca *et al.* (2017), entretanto, o restabelecimento da permeabilidade após dois meses não ocorreu.

Os resultados obtidos de macroporos contradizem também ao obtido pela permeabilidade, que deveria aumentar conforme o aumento dos poros, facilitando a passagem de água, entretanto, a permeabilidade diminui após o fogo. Isso pode se dar devido a pouca representatividade dos macroporos, sendo quantidades muito pequenas para interferirem neste aspeto.

A diminuição da permeabilidade na presença do fogo, em regra é atribuído à formação de cinzas depositadas na camada superficial, criando uma película hidrofóbica, que diminui a infiltração de água, e facilita o escoamento superficial e a perda de solo (Hubbert *et al.*, 2006; Pinto, 2009).

4.3.8 Armazenamento de água no solo

A avaliação de armazenamento de água no solo nos 3 momentos de análise, resultou em uma diminuição média de 26,48 mm no antes do fogo, para 22,71 mm no subsequente ao fogo e subiu ligeiramente para 23,0 mm no dois meses após o fogo. Sendo que a diminuição foi significativa entre o momento antes do fogo e os dois momentos pós fogo.

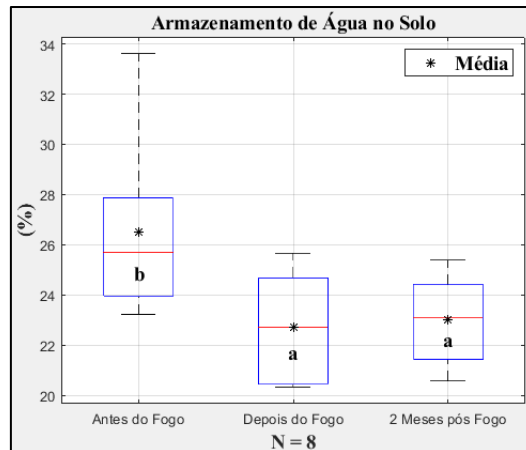


Figura 41: Armazenamento de água no solo na profundidade de 0 - 5cm

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, $P < 0,05$)

Dentre as razões citadas para a diminuição da permeabilidade, o mesmo pode ser aplicado no armazenamento de água, reforçando o aspecto da camada hidrofóbica, que impede com que o solo retenha a água e logo, armazene-a. Um estudo realizado por Humbert (2006), apresentou uma diferença significativa de absorção da água no momento após o fogo, principalmente na camada de 4cm, havendo um aumento na repelência da água na profundidade de 0 – 4cm.

Além disso, segundo Rawls *et al.* (2003), o armazenamento de água no solo, está relacionado com a formação da sua estrutura do solo pela matéria orgânica, que propicia uma maior retenção de água. Devido a isso, como a matéria orgânica reduzida após o fogo, a diminuição do armazenamento de água do solo, pode ser notado.

4.4 Perdas de solo por erosão

O período de ensaio realizado foi de aproximadamente três meses, as recolhas dos materiais ocorreram após a ocorrência de chuvas maiores. Contudo, ocorreram apenas duas grandes chuvadas, que foram possíveis extrair água e sedimentos para contabilizar as perdas de solo e escoamento. Durante esse período, foi registado aproximadamente 80,2 mm de precipitação, distribuídos em 32,8 mm na primeira colheita e 47,4 mm na segunda.

A avaliação de perda de solo e escoamento foram avaliadas em dois declives. O primeiro declive, menos acentuado com uma média de 6,93%, e o segundo, mais acentuado com média de 16,51%. A média acumulada de perda de solo e escoamento para o declive 1 foi de 19,51 g m⁻² e 0,616 mm, já para o declive 2, a média foi de 22,95

g m⁻² e 2,39 mm, respetivamente. Os demais parâmetros de perda de solo e escoamento estão dispostos no quadro 6, em que apresenta a média e desvio padrão de cada colheita e a média acumulada do seu respectivo declive.

Quadro 6: Parâmetros de perda de solo e escoamento por declive

Parâmetro	Colheita 1		Colheita 2		Acumulado	
Declive 1	Média	Dv	Média	Dv	Média	Dv
Precipitação (mm)	32,8		47,4		80,2	
Escoamento (mm)	0,064	0,077	0,552	0,44	0,616	0,503
Perda de Solo (g.m ⁻²)	5,08	1,45	14,43	9,03	19,51	9,10
Coef. De Escoamento (%)	0,195	0,235	1,16	0,92	1,36	1,12
Conc. De Sedimentos (g.L ⁻¹)	1,41	1,73	4,22	7,56	5,63	6,80
PS unitária (g.m ⁻² .mm ⁻¹)	0,154	0,044	0,304	0,190	0,459	0,194
Declive 2	Média	Dv	Média	Dv	Acumulado	
Precipitação (mm)	32,8		47,4		80,2	
Escoamento (mm)	0,711	0,633	1,67	1,19	2,38	1,77
Perda de Solo (g.m ⁻²)	4,18	2,38	18,77	7,32	22,95	8,89
Coef. De Escoamento (%)	2,16	1,93	3,53	2,51	5,59	4,31
Conc. De Sedimentos (g.L ⁻¹)	0,252	1,11	0,432	0,171	0,684	0,242
PS unitária (g.m ⁻² .mm ⁻¹)	0,127	0,072	0,396	0,155	0,523	0,204

Dv: Desvio Padrão

Posteriormente, foi realizado a análise de variância de todos os conjuntos de amostras, comparando declives e colheitas (ANOVA a dois fatores). A perda de solo (g.m⁻²) entre a primeira colheita e a segunda colheita apresentou variação significativa, e o escoamento apresentou variação significativa entre os declives (figura 42 e 43).

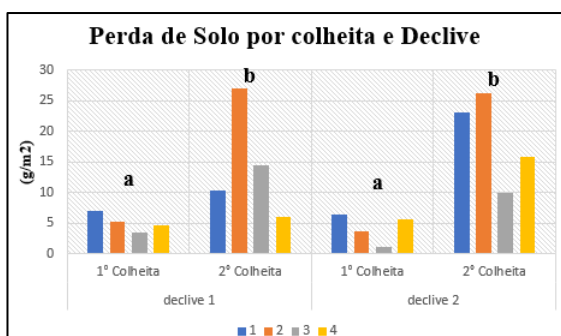


Figura 42: Perda de solo por declive e colheita

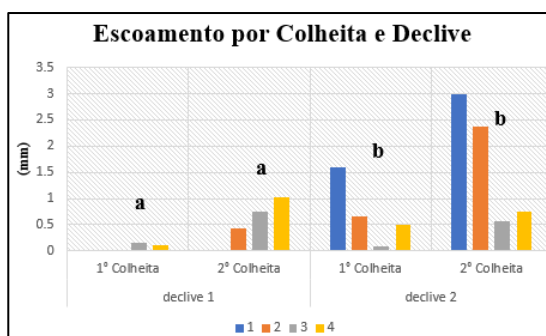


Figura 43: Escoamento por declive e colheita

Nota: Médias representadas por pares de colunas com letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste HSD, P < 0,05)

A variação significativa entre colheitas pode ser justificada devido ao aumento da precipitação entre uma amostragem e outra, aumentando o arraste da camada superficial

do solo. A análise de variância realizada entre os declives apenas apresentou diferenças significativas para o escoamento, haja vista que a perda de solo pouco se alterou de um declive para o outro, ressaltando que a diferença de declive de nada acrescentou na perda de solo, apenas quanto ao escoamento. A figura 44, mostra a perda de solo (g.m^{-2}) e escoamento (mm), com relação a precipitação acumulada desde a instalação das microparcelas de erosão (a significar desde a aplicação do fogo controlado), nos dois declives analisados.

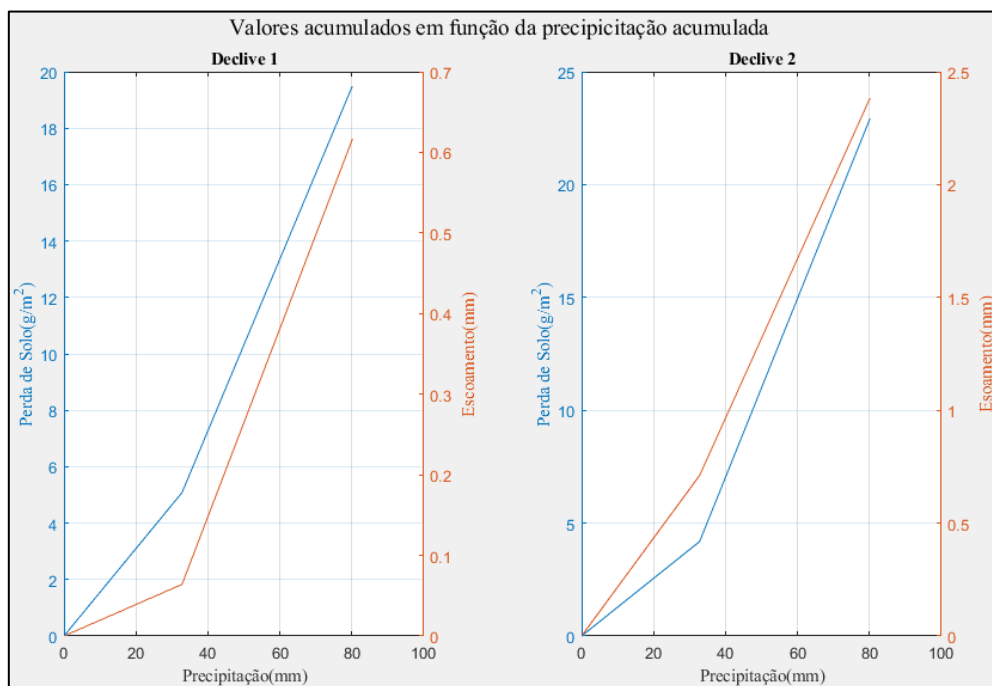


Figura 44: Perda de solo e escoamento para o declive 1 e declive 2

Através dos gráficos previamente expostos, é perceptível o aumento significativo do escoamento entre os declives, sendo o declive de maior acentuação apresentando um escoamento maior, o que é de se esperar, visto que a acentuação do declive favorece tal acontecimento. Entretanto, a perda de solo não apresentou grandes variações entre declives, pois só variou significativamente entre colheitas, que pode ser relativo ao aumento da precipitação entre as duas, o que favoreceu o arraste das partículas de solo.

A perda de solo após o fogo não se alterou entre um declive e outro, o que não era o esperado, visto que o aumento da declividade tende a aumentar a perda de solo. Entretanto, a pouca interferência da declividade pode-se dar devido ao elevado teor de pedregosidade presente neste solo (figura 27), visto que o teor em massa de elementos grosseiros é de cerca de 28%, o que é considerado um teor elevado (Figueiredo, 2013). Pela figura 45 é possível visualizar essa pedregosidade, e pode-se dizer que a perda de

solo não é significativa entre declives devido a presença de pedras, que barram o solo de escorrer, já quanto ao escoamento, é diminuída a infiltração, facilitado assim o movimento horizontal da água.



Figura 45: Pedregosidade nas microparcelas de perda de solo e escoamento

Em um estudo semelhante realizado por Fonseca *et al.*, (2017) na mesma área de estudo, apresentou em aproximadamente 80 mm de precipitação, cerca de 20 g.m⁻² de perda de solo e 1 mm de escoamento, sendo valores muito próximos dos encontrados para o declive 1 e 2, quanto a perda de solo, entretanto, o escoamento apresentou variações, sendo os valores obtidos para o declive 1 menores, e maiores quanto ao declive 2. Sendo possível notar que o escoamento no declive 2 apresentou valores muito superiores ao declive 1 e estudo citado, sendo nítida que há uma menor infiltração da água em decorrência do declive acentuado.

A perda de solo e escoamento registrado após a aplicação do fogo, pode ser ocasionada devido, além da redução da proteção do solo pela vegetação, também pela presença de uma camada de cinzas hidrofóbicas formada a partir da supressão da vegetação e do horizonte orgânico pelo fogo (Mehdi *et al.*, 2012). Estas cinzas também podem apresentar na sua composição óxidos (CaO, KO, MgO), que por sua vez, elevam o pH acima do ponto de carga zero dos mineiras e promovem a dispersão do solo e posteriormente, podem promover a perda de solo por erosão (Brook & Wittenberg, 2016).

As alterações sofridas nas propriedades físicas pelo fogo, já apresentam características que afetam o escoamento e a perda de solo por si só, complementando, com a supressão da cobertura protetora (vegetação) e a formação de uma camada hidrofóbica de cinzas, podem acarretar perdas muito maiores. Perdas essas afetam adversamente o solo e o ecossistema.

5. CONCLUSÕES

A avaliação do fogo controlado aplicado apresentou uma baixa intensidade, com temperaturas máximas de 670°C no topo da vegetação e sendo muito menor na camada superficial do solo, por volta de 39°C. Devido a isso, a vegetação não foi consumida uniformemente, apresentando falhas, removendo e destruindo parte do horizonte orgânico e da estrutura dos agregados. Esses sendo substituídos por uma camada superficial de uma vegetação não consumida por completo, e de cinzas e carvão.

O fogo, mesmo que de baixa intensidade apresentou mudanças nas propriedades e processos físicos do solo. Depois de arder, a densidade aparente e os macroporos do solo aumentaram significativamente, assim como a capacidade máxima para água, a capacidade de campo, e o armazenamento de água, sofreram uma diminuição. Para além disso, a porosidade total e a permeabilidade diminuíram, mesmo que não significativamente, sendo possível constatar que as alterações nessas propriedades, acarretaram efeitos na dinâmica hidrológica do solo.

As alterações na dinâmica hidrológica do solo diminuíram as taxas de infiltração e drenagem, aumentando a possibilidade do escoamento superficial. Essas alterações, em combinação com a supressão parcial da vegetação e do horizonte orgânico, formaram uma camada de cinzas hidrofóbicas favoreceram ainda, o aumento da perda de solo, pois quando é reduzido a infiltração de água, ela tende a se movimentar horizontalmente, levando consigo a camada mais superficial do solo e seus nutrientes associados. Mesmo que as modificações no solo foram analisadas em um curto período, foi possível notar a tendência de regresso ao estágio anterior do fogo, ressaltando o efeito de curto prazo dessas modificações.

Com isso, o trabalho apresentou uma contribuição para a investigação dos impactos do fogo controlado nas propriedades e processos físicos do solo em áreas ardidas de matos. Permitindo um conhecimento mais amplo dos efeitos a curto prazo nesta região do Parque Natural de Montesinho, NE Portugal, no que diz respeito às propriedades físicas do solo e à magnitude dos processos de erosão hídrica após a supressão da vegetação, estimando as perdas potenciais de solo nas áreas ardidas e suas consequências para a degradação do recurso solo na região.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, C., (2001). Flora e vegetação de Serra de Nogueira e do Parque Natural de Montesinho. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia.
- Agroconsultores & Coba, (1991). Carta dos Solos, Carta do Uso Actual da Terra e Carta de Aptidão da Terra do Nordeste de Portugal. UTAD/PDRITM, Vila Real.
- Are, K.S., Oluwatosin, G.A., Adeyolanu, O.D., Oke, A.O., (2009). *Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil physical properties*. Soil and Tillage Research 103, p. 4-10.
- Bastos, C. A. B., (1999). Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Tese de doutoramento em Engenharia. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Batista, A.C., (1995). Avaliação da queima controlada em povoamentos de Pinus taeda. Curitiba/Brasil (Tese de doutorado).
- Blanco, H. & Lal, R., (2008). *Principles of Soil Conservation and Management*. 1st ed., The Netherlands: Springer, p. 617.
- Bermudéz, F. L., (2012). *La erosión entre la naturaleza y el hombre*. Boletín de la Academia Malagueña de Ciencias, p. 87-105.
- Bento-Gonçalves, A.; Vieira, A.; Úbeda, X., Martín, D., (2011). *Fire and soils: Key concepts and recent advances*. Geoderma: v.191, p. 3-13.
- Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Leite, F.F. (2013). Erosão dos solos após incêndios florestais: avaliação de medidas de mitigação aplicadas em vertentes e em canais, no NW de Portugal. Grandes incêndios florestais, erosão, degradação e medidas de recuperação dos solos, p. 187-205.
- Bertoni, J. & Lombardi-Neto, F. (1990). *Conservação do solo*. Ícone, São Paulo, p.355.
- Blum, W. E., (2008). *Characterization of soil degradation risk: an overview*. Threats to Soil Quality in Europe.
- Boardman, J., & Poesen, J. (2006). *Soil Erosion in Europe*. Editors: John Wiley and Sons. England.
- Bodí MB., Mataix-Solera J., Doerr SH., Cerdà A., (2011). *The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon*. Geoderma.
- Bompastor, A., (2008). Erosão Hídrica e dinâmica do Carbono: Um estudo à micro-escala com simulação de chuva. Tese de mestrado, Instituto politécnico de Bragança.
- Bompastor, A., Figueiredo, T. de & Fonseca, F. (2009). Matos do Parque Natural de Montesinho, NE de Portugal – Produção de serviços ecossistémicos. Cabo Verde – Redes e Desenvolvimento Regional.

- Brook, A., Wittenberg, L., (2016). *Ash-soil interface: Mineralogical composition and physical structure*. Science Direct
- Brown, A.A. & Davis, K.P. (1973). *Forest fire: control and use*. New York: McGraw-Hill Book Company., p.584.
- Butt, C. R. M & Zeegers, H., (1992). Soil formation in tropically weathered terrains. C. 4: Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Suptropical Terrains, p. 57-77. Elsevier.
- 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: p. 376-387.
- Carvalho, L. C. O., (2014). *Prevenção e detecção de incêndios*. Tese de doutoramento em Física, pelas Universidades do Minho, Aveiro e Porto – MAPFIS.
- Caria M. M. P. F., (2011). *Erosão e exportação de matéria orgânica do solo em áreas ardidas*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro.
- Castro, J., Figueiredo, T., Fonseca, F., Castro, J. P., Nobre, S., Pires, L. C., (2010). *Montesinho Natural Park: General Description and Natural Values*. In Natural Heritage from East to West, p.119-131.
- Castro, A. C. M., Meixedo, J. P., Vivas, A., (2010b). *Avaliação do impacto do fogo controlado na vulnerabilidade dos solos florestais – uma contribuição*. Centro de Investigação Em Geo-Ambiente e Recursos, CIGAR FEUP, Faculdade de Engenharia Da Universidade Do Porto.
- CIMO – Centro de Investigação de Montanha (2009). *Novos sistemas para os espaços de montanha – projeto transversal do CIMO*. Centro de Investigação de Montanha, Bragança.
- Caputo, H. P., (1998). *Mecânica do solos e suas aplicações*. Fundamentos, 6ª edição, vol.1. p. 14-36.
- Catry, F., Bugalho, M. & Silva, J. (2007). *Recuperação da Floresta após o Fogo - O caso da Tapada Nacional de Mafra*. CEABN-ISA, Lisboa.
- Cavalli, A., (2017). *Áreas ardidas e risco potencial de erosão: estudo realizado em zonas do NE Portugal*. Tese de mestrado, IPB.
- Cavalli, A.; Neta, M. C.C., Figueiredo, T.; Fonseca, F. Hernández Z. (2017). *Solos e Risco de Erosão nas áreas ardidas no último quarto de século no Distrito de Bragança, NE de Portugal: abordagem cartográfica*. III Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Ambiente e Tecnologia.
- Celis, R., Jordán, A., Zavala, L.M., (2013). *Efectos del fuego en las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo*. Grandes incêndios florestais, erosão, degradação e medidas de recuperação dos solos, p.145-160.

- Chandler, C.P.; Cheney, P.; Thomas, P.; Trabaud, L.; Williams, D., (1991). *Fire in forestry - Volume I: Forest fire behavior and effects*. New York: John Wiley & Sons, Inc. p.450.
- Coelho, C., Ferreira, A., Boulet, A.E., Keizer, J., (2004). *Overland flow Generation processes, erosion yields and solute loss following different intensity fires*. Quarterly Journal of Engineering geology and hydrogeology, n°37, vol. 3, p. 233-240.
- Costa, J.B. (1991). *Caracterização e Constituição do Solo*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 4ª Ed. Lencastre e Franco (1984).
- DeBano, L.F.; Neary, D.G.; Ffolliott, P.F., (1998). *Fire's effects on ecosystems*. New York: John Wiley & Sons, Inc. p. 333.
- De Groot, W. J., (1998). *Interpreting the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System*. Proc. of Fourth Central Region Fire Weather Committee Scientific and Technical Seminar, Edmonton, Canada.
- Dexter, A. R., (1988). *Advances in characterization of soil structure*. Soil Tillage Res., vol. 11., p. 199-238.
- Diyabalanage, S., Samarakoon, K. K., Adikari, S. B., & Hewawasam, T. (2017). *Impact of soil and water conservation measures on soil erosion rate and sediment yields in a tropical watershed in the Central Highlands of Sri Lanka*. Applied Geography, 79, p. 103–114.
- DGRF (2006). *Resultados IFN – Inventário Florestal Nacional 2005/2006*, Lisboa, p.70.
- Doerr, S.H.; Shakesby, R.A.; Walsh, R.P.D. (2000). *Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance*. Earth Science Reviews. 51(1-4): p. 33–65.
- Espinoza, I., Norman, R., Slaton, N., Daniels, M., (2013). *The Nitrogen and Phosphorous Cycle in Soils*. University of Arkansas, United States Department of Agriculture and County Governments Cooperating.
- FAO (Food and Agriculture Organization), (2001). *Global forest fire assessment 1990-2000*. FAO/Forestry Department, Roma. [Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/006/AD653E/AD653E00.HTM>]. Acesso em: 10 de março, 2021.
- FAO (Food and Agriculture Organization), (2021). *Chemical properties*. FAO Soil Portal. [Disponível em: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/numerical-systems/chemical-properties/en/>]. Acesso em: 18 de outubro de 2021.
- FAO/UNESCO, (1988). *Soil Map of the World, Revised Legend, Amended 4th Draft*. FAO, Roma.
- Fernandes, P. & Botelho, H., (2004). *Analysis of the prescribed burning practice in the pine forest of northwestern Portugal*. J. Environ. Manag. 70, 15 – 26.

Fernandes, R. C., Cordovil, C. M., De Varennes, A. (2009). *Use of Organic Residues to recover Nutrients and Organic Matter Pools in burned soils*. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa, Portugal.

Figueiredo, T., (2011). Determinação laboratorial da condutividade hidráulica do solo e Realização de exercícios sobre exploração de aquíferos. Escola Superior Agrária de Bragança.

Figueiredo, T., (2012). Erosão hídrica dos solos em Portugal: contributo para uma revisão. V Congresso Ibérico da Ciência do Solo. Angra do Heroísmo.

Figueiredo, T., (2013). Uma panorâmica sobre os recursos pedológicos do Nordeste Transmontano. Bragança: Escola Superior Agrária. (Série Estudos; 84).

Figueiredo, T. de, Fonseca, F., Queirós, A., (2013). Efeitos do fogo na erosão do solo em áreas de matos: resultados de um ano de ensaio no Parque Natural de Montesinho. Grandes Incêndios Florestais, Erosão, Degradação e Medidas de Recuperação dos Solos. Braga: Universidade do Minho. p. 267-277.

Figueiredo, T., Fonseca, F., & Hernández, Z. (2015a). Uso da terra e riscos de degradação do solo no Nordeste de Portugal: mudanças nas últimas décadas. Proteger as funções do solo, assegurar a vida da Terra.

Fisher, R. F., Blinkey, D., Pritchett, W. L. (2000): *Ecology and management of forest soils*. John Wiley and Sons, p. 241-260.

Fonseca, F., (2005). Técnicas de preparação do terreno em sistemas florestais: Implicações no solo e no comportamento das plantas. Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro Vila Real.

Fonseca, F., Leite, M., Figueiredo, T., (2011). *Soil properties in burned and unburned Mediterranean shrublands of Montesinho Natural Park, Northeast Portugal*. Fire Effects on Soil Properties. University of Minho, Guimarães, Portugal.

Fonseca, F., Figueiredo, T., Nogueira, C., Queirós, A., (2017). *Effect of prescribed fire on soil properties and soil erosion in a Mediterranean mountain area*. Geoderma.

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

Gonçalves, D. A., (1991) *Terra Quente-Terra Fria (1ª aproximação)*. Inst. Pol. Bragança.

Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., (1988). *Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility*. Soil Science 146, p. 255– 261.

González-Pelayo, O., Gimeno-García, E., Ferreira, C. S. S., Ferreira, A. J., Keizer, J. J., Andreu, V., . Rubio, J. L., (2015). *Water repellency of air-dried and sieved samples from limestone soils in central Portugal collected before and after prescribed fire*. Springer Land and Soil, 394 (1-2), p. 199-214.

- 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), p. 855-870.
- Guerra, A.J.T & Cunha, S.B., (1994). *Processos Erosivos nas Encostas*. Cap.4. *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos*.
- Hernani L. C.,Freitas P. L., Falco Pruski F. F., Maria I. C., Filho C.C. & Landers J. N., (2002). *A erosão e seu impacto*. Infoteca Embrapa. Cap.5
- Hillel, D., (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic press, an imprint of Elsevier. Cap. 7, p. 173-198.
- Hubbert, K.R., Preisler, H.K., Wohlgemuth, P.M., Graham, R.C., Narog, M.G., (2006). *Prescribed burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA*. *Geoderma* 130, p. 284–298.
- Imeson, A. C., Verstrate, J.M., van Mulligen, E. J, Sevink, J., (1992). *The effects of fire and water repellence on infiltration and runoff under Mediterranean type forest*. *Catena* 19, p. 345 – 361.
- IPB; ICN. (Instituto Politécnico de Bragança; Instituto da Conservação da Natureza), (2007). *Plano de Ordenamento do Parque Natural de Montesinho*. Caracterização. Bragança.
- IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera, (2021). Risco de incêndio rural. [Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/riscoincendio/fwi/>]. Acesso em: 18 de Agosto de 2021.
- Jenny, H. (1986) *The Soil Resource: Origin and Behavior*. 3rd reimp. Ecological Studies 37. Springer-Verlag, New York.
- Jungerius, P. D. & DeJong, J. H. (1989). *Variability of water repellency in the dunes along Dutch coasr*. *Catena*, nº16, p.491-497.
- Lavorel, S., Flannigan, M.D., Lambin, E.F., Scholes, M.C., (2007). *Vulnerability of land systems to fire: interactions among humans, climate, the atmosphere, and ecosystems*. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12 (1), p. 33–55.
- Leite, M. M., (2011). *Impacto dos incêndios nas propriedades dos solos em áreas de montanha sob coberto de matos*. Dissertação de mestrado em Ciência e tecnologia ambiental. Instituto politécnico de Bragança.
- Lepsch, I. (2010). *Formação e conservação dos solos*. 2. Ed – São Paulo: Oficina de Textos.
- Lima, V.C., Lima, M. R., Melo, V. F., (2007). *O solo no meio ambiente*. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola.
- Lopes, A.S.; Silva, M.C. e Guilherme, L.R.G. (1991) *Boletim técnico nº 1: acidez do solo e calagem*. 3 ed. São Paulo: ANDA.

- Lopes, A., S. (1978). *Manual do Solo*. São Paulo. Potafos.
- Lourenço, L., Fernandes, S., Gonçalves, A. B., Castro, A. M., Nunes, A., Vieira, A., (2001). Causas de incêndios florestais em Portugal continental. Análise estatística da investigação efetuada no último quinquénio (1996 a 2010). Caderno de geografia p.30 – 31, 61-80.
- Lloret, F., Piñol, J., Castellnou, M. (2009). *Wildfires*. The Physical Geography of the Mediterranean, p. 541–560.
- Macedo, F.W. & Sardinha, A.M. (1993). Fogos Florestais. Vol. nº 1. Lisboa. Publicações Ciência e Vida Lda.
- Marques, S., Borges, J. G., Garcia-Gonzalo, J., Moreira, F., Carreiras, J. M. B., Oliveira, M. M., Cantarina, A., Botequim, B., Pereira, J. M. C., (2011). *Characterization of wildfires in Portugal*. Eur J Forest Res, 130: p.775–784
- Mehdi, H.; Ali, S.; Ali, M.; Mistafa, A., (2012). *Effects of different fire severity levels on soil chemical and physical properties in Zagros forest of western Iran*. Folia Forestalia Polonia, Cracóvia.
- Miranda, A., I., C., N., S. (1998). Efeito dos incêndios florestais na qualidade do ar. Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal.
- Molina, M. J., & Sanroque, P. (1996). *Impact of fires on desertification processes: a review in relation to soil erodibility*. Soil Degradation and Desertification in Mediterranean Environments, p. 143-163. Geofoma Ediciones, Logroño.
- Moreira, F., Vaz, P., Catry, F., Silva, J. S., (2009). *Regional variations in wildfire preference for land cover types in Portugal: implications for landscape management to minimise fire hazard*. Int J Wildland Fire 18: p. 563–574
- Moreira, F., Catry, F.X.; Silva, J.S.; Rego, F., (2010). Ecologia do fogo e gestão de áreas ardidas. Isapress, Lisboa., p.323.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation*. Blackwell publishing, 3 ed., p.11-42.
- MORE – Laboratório Colaborativo Montanhas de Investigação, (2021). Acompanhamento duma ação de fogo controlado no Nordeste de Portugal. Parte II: Execução do fogo.
- Neary, D. G.; Ryan, K. C.; DeBano, L. F., eds. (2005). *Wildland Fire in Ecosystems, effects of fire on soil and water*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Neary, D.G.; Klopatek, C.C.; DeBano, L.F.; Ffolliott, P.F. (1999). *Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis*. Forest Ecology and Management. 122: p. 51–71.

- Netto, A.L.C., (1995). Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos. Editora Bertrand Brasil S.A. Rio de Janeiro.
- Nunes, A., Lourenço, L., Bento-Gonçalves, A., & Vieira, A. (2013). Três décadas de incêndios florestais em Portugal: incidência regional e principais 52 fatores responsáveis. Cadernos de Geografia, NICIF, Vol. 32, p. 133–143.
- Ojeda F., (2003). *El brezal mediterráneo o herriza*. Investigación y Ciencia: La antartida sin hielo, nº 317.
- Ojeda F, Pausas JG, Verdú M., (2010). *Soil shapes community structure through fire*. Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry. Fourth edition. Elsevier. Oecologia 163: p. 729-735.
- Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A., Vallejo, R., (2008). *Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? - a review*. Int. J. Wildland Fire 17, p. 713 – 723.
- Pereira, A. X. (2018). Propriedades Físico-químicas dos Solos em Áreas Ardidas de Montanha do Nordeste de Portugal em Diferentes Fases de Evolução Pós-fogo. Tese de mestrado, IPB.
- Pereira, E. & Arrobas, M., (2010). Preparação do Solo. Capítulo 2.2. Manual de Boas Práticas em Espaços Verde. Câmara Municipal de Bragança, p.23-28.
- Pinto, R.M.D.S., (2009). Recuperação de um solo florestal queimado por aplicação de resíduos orgânicos: Respiração induzida por substrato dos microrganismos do solo. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa.
- Ramiro, J. (2019). *Tipos de solo: saiba quais são e os tipos existentes no Brasil*. Fonte: Boas práticas agrícolas. Disponível em: [<https://boaspraticasagronicas.com.br/artigos/tipos-de-solo/>]. Acesso em: 02 de março de 2021.
- Rawls, W.J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J.C., Sobecki, T.M., Bloodworth, H., (2003). *Effect of soil organic carbon on soil water retention*. Science Direct, Geoderma 116, p. 61-73.
- Reinert, D. J. & Reichert, J. M. (2006). Propriedades físicas do solo. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, p.18.
- Ritsema, C. J. & Dekker, L.W., (1994). *How water moves in a water-repellent sandy soil*. Dynamics of fingered flow. Water Resources Research, nº30, p. 2519-2531.
- Rosário, L. P., (2011). Serviços do ecossistema em espaços florestais – grupo de trabalho: 2º Relatório de progresso. Autoridade Florestal Nacional, Lisboa, p.75.
- Sampaio, J. A. & Silva, F. A. N. G., (2007). Determinação das densidades de sólido e de polpa. Tratamento de minérios: Práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM, 2007, p. 35-51.

- Simard, A.J. (1991). *Fire severity, changing scales, and how things hang together*. International Journal of Wildland Fire. 1: 23–34.
- Schaetzl, R. J. & Thompson, M. L., (2015). *Soils: Genesis and Geomorphology*. 2nd ed. Cambridge University Press, p. 8-24.
- Shakesby, R. A. (2011). *Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions*. Earth-Science Reviews, 105, pp. 71–100.
- Thomaz, E.L., (2011). Influência da temperatura no diâmetro e na estabilidade de agregados em chernossolo, Saskatchewan, Canadá. Ciencia del suelo 2 (2), p. 277-284.
- Varenes, A.D., (2003). Produtividade dos Solos e Ambiente. Editora Escolar, Lisboa. Cap.2, p. 19-64.
- Brady, N.C. & Weil, R.R., (2008). *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Macmillan Publishing Company. New York.
- Woods, S. & V. Balfour (2010). *The effects of soil texture and ash thickness on the post-fire hydrological response from ash-covered soils*. Journal of Hydrology 393, p. 274-286.
- Zachar, D., (1982). *Soil Erosion: Developments in Soil Science 10*. Bratislava: Veda, Publishing of house of the Slovak Academy of Sciences, p.27-45.
- Zedler, P. H. & Rego, F. C. 2006 Regimes do Fogo e Biodiversidade: Respostas dos Ecossistemas e Alternativas de Gestão. Incêndios Florestais em Portugal: Caracterização, Impactes e Prevenção. ISAPress, Lisboa. p. 200-227.

ANEXOS

Anexo I – Caracterização das Propriedades físicas do Solo

i – Parâmetros das propriedades físicas do solo

Propriedades Físicas		Antes do Fogo									
Permeâmetro N°	Kinicial (cm/h)	Ki Classe	Kfinal (cm/h)	Kf Classe	Dap	CMA (%)	CC (%)	P (%)	MicroP (%)	MacroP (%)	Armaz. Água
1	25,26	Rápida	23,13	Rápida	0,5621	136%	133%	76%	75%	2%	1,32
2	14,03	Rápida	8,63	Moderadamente rápida	0,9729	63%	61%	61%	59%	2%	0,605
3	17,93	Rápida	-	Rápida	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	198,98	Muito rápida	0,6067	88%	85%	54%	52%	2%	0,852
5	157,75	Muito rápida	123,0	Muito rápida	0,98	58%	56%	57%	55%	2%	0,563
6	2,96	Moderada	2,93	Moderada	0,9064	68%	66%	62%	60%	2%	0,663
7	-	Muito rápida	-	Muito rápida	0,9353	58%	56%	54%	53%	2%	0,561
8	125	Muito rápida	94,84	Muito rápida	0,7644	77%	75%	59%	57%	2%	0,745
9	-	Rápida	-	Rápida	-	-	-	-	-	-	-
10	77,41	Muito rápida	43,11	Muito rápida	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	115,18	Muito rápida	0,5267	105%	102%	55%	54%	2%	1,016
Propriedades Físicas		Depois do Fogo									
Permeâmetro N°	Kinicial (cm/h)	Ki Classe	Kfinal (cm/h)	Kf Classe	Dap	CMA (%)	CC (%)	P (%)	MicroP (%)	MacroP (%)	Armaz. Água
1	96,25	Muito rápida	32,0	Muito rápida	0,8265	79%	70%	65%	58%	7%	0,697
2	180,18	Muito rápida	20,17	Rápida	1,1439	44%	40%	51%	46%	5%	0,402395
3	83,21	Muito rápida	-	Muito rápida	-	-	-	-	-	-	-
4	-	Muito rápida	52,29	Muito rápida	1,008	58%	48%	58%	49%	9%	0,481
5	7,65	Moderadamente rápida	7,13	Moderadamente rápida	1,0402	58%	53%	61%	55%	6%	0,529
6	159,15	Muito rápida	9,29	Moderadamente rápida	0,9619	61%	52%	59%	50%	9%	0,518
7	-	Moderadamente rápida	-	Moderadamente rápida	1,0549	57%	48%	60%	51%	9%	0,484
8	31,30	Muito rápida	19,84	Rápida	0,9552	63%	59%	60%	56%	4%	0,585
9	-	Muito rápida	-	Rápida	-	-	-	-	-	-	-

10	34,88	Muito rápida	32,41	Muito rápida	-	-	-	-	-	-	-
11	-	Muito rápida	66,78	Muito rápida	1,1676	48%	39%	56%	46%	10%	0,392
Propriedades Físicas		2 Meses após o Fogo									
Permeâmetro N°	Kinicial (cm/h)	Ki Classe	Kfinal (cm/h)	Kf Classe	Dap	CMA (%)	CC (%)	P (%)	MicroP (%)	MacroP (%)	Armaz. Água
1	54,96	Muito rápida	25,88	Muito rápida	0,987	56%	47%	55%	46%	9%	0,469
2	13,16	Rápida	10,13	Moderadamente rápida	0,886	70%	60%	62%	53%	8%	0,602
3	0,096	Muito Lenta	-	Muito Lenta	-	-	-	-	-	-	-
4	-	Rápida	13,64	Rápida	0,961	65%	57%	62%	55%	7%	0,570
5	24,75	Rápida	17,81	Rápida	1,21	45%	38%	54%	46%	8%	0,382
6	11,67	Moderadamente rápida	7,17	Moderadamente rápida	1,17	50%	44%	59%	51%	7%	0,435
7	-	Muito rápida	-	Muito rápida	1,16	52%	46%	60%	53%	6%	0,460
8	55,78	Muito rápida	29,28	Muito rápida	1,02	58%	52%	59%	54%	6%	0,520
9	-	Muito rápida	-	Muito rápida	-	-	-	-	-	-	-
10	82,81	Muito rápida	28,89	Muito rápida	-	-	-	-	-	-	-
11	-	Rápida	10,66	Moderadamente rápida	0,960	68%	60%	65%	58%	8%	0,598

(-)Conjunto de valores removidos pelos outliers

ii – Elementos Grosseiros

Elementos Grosseiros (%)												
Parcela	Antes do Fogo				Depois do Fogo				2 meses depois do Fogo			
	0 - 3cm	3 - 6cm	6 - 10cm	10 - 20cm	0 - 3cm	3 - 6cm	6 - 10cm	10 - 20cm	0 - 3cm	3 - 6cm	6 - 10cm	10 - 20cm
1	42%	54%	58%	65%	31%	42%	49%	61%	31%	29%	41%	51%
2	20%	28%	32%	28%	28%	23%	26%	31%	29%	15%	26%	29%
3	26%	13%	19%	26%	13%	13%	24%	23%	17%	19%	19%	25%
4	40%	39%	68%	69%	37%	48%	63%	61%	25%	44%	51%	71%
5	35%	27%	50%	67%	24%	23%	33%	53%	25%	25%	48%	43%
6	10%	16%	22%	20%	21%	19%	22%	27%	18%	21%	22%	28%
7	23%	48%	43%	58%	26%	41%	66%	76%	42%	32%	43%	43%
8	29%	29%	40%	45%	39%	31%	38%	58%	43%	31%	45%	63%
9	10%	29%	24%	60%	25%	44%	65%	87%	27%	43%	53%	64%
10	27%	36%	37%	44%	24%	58%	65%	77%	24%	44%	43%	57%
11	24%	35%	47%	61%	25%	26%	30%	41%	35%	28%	43%	44%

iii - Teste de Normalidade

Parâmetros Físicas	Antes do Fogo			Depois do Fogo			2 Meses pós Fogo		
	Série original	Série sem outliers		Série original	Série sem outliers		Série original	Série sem outliers	
	Valor-p	N	Valor-p	Valor-p	N	Valor-p	Valor-p	N	Valor-p
K inicial	0,8456	6	0,7129	0,9184	6	0,6589	0,1707	6	0,8525
K final	0,4033	6	0,8740	0,5018	6	0,8790	0,0287*	6	0,7581
Dap	0,6790	8	0,5870	0,5281	8	0,9910	0,8651	8	0,7741
CMA	0,7299	8	0,8471	0,2115	8	0,8726	0,5585	8	0,9477
CC	0,7495	8	0,8556	0,3457	8	0,9375	0,3592	8	0,9129
P	0,6405	8	0,5939	0,6385	8	0,9160	0,8561	8	0,9682
Micro P	0,6674	8	0,5985	0,8037	8	0,8825	0,7687	8	0,5482
Macro P	0,6121	8	0,7880	0,8350	8	0,6708	0,9826	8	0,9758
EG 0 - 3	0,9869	11	0,9869	0,8674	11	0,8674	0,9566	11	0,9566
EG 3 -6	0,9516	11	0,9517	0,9105	11	0,9105	0,7980	11	0,7980
EG 6 - 10	0,9612	11	0,9613	0,5364	11	0,5364	0,3500	11	0,3500
EG 10 - 20	0,4590	11	0,4591	0,9567	11	0,9567	0,9117	11	0,9117

N: Número de amostras

(*): Valor que não passou no teste de normalidade, apresentando $P < 0,5$

EG: Elementos Grosseiros

iv – Análise estatística Propriedades Físicas

Parâmetros	N	Antes do Fogo		Depois do Fogo		2 Meses pós Fogo	
		Média	CV	Média	CV	Média	CV
K inicial	6	67,07	0,951	84,90	0,850	40,53	0,703
K final	6	49,28	0,995	20,14	0,533	19,86	0,486
Dap	8	0,781	0,246	1,02	0,107	1,04	0,115
CMA	8	0,818	0,333	0,584	0,176	0,576	0,155
CC	8	0,792	0,337	0,511	0,192	0,505	0,160
P	8	0,598	0,122	0,586	0,070	0,595	0,060
MicroP	8	0,579	0,127	0,512	0,088	0,521	0,039
MacroP	8	0,019	0,043	0,074	0,297	0,074	0,119
EG 0 – 3cm	11	0,258	0,408	0,265	0,265	0,286	0,300
EG 3 – 6cm	11	0,321	0,382	0,334	0,420	0,300	0,338
EG 6 – 10cm	11	0,399	0,386	0,437	0,414	0,395	0,295
EG 10 – 20cm	11	0,493	0,360	0,539	0,395	0,471	0,332

N: número de amostras

CV: Coeficiente de variação

EG: Elementos Grosseiros

v – Teste de Tukey

Propriedade	Pares de tratamento	Estatística Q tukey HSD	Tukey HSD p-value	Tukey HSD inference
Densidade aparente	A vs B	4,6242	0,00979	p<0.01
	A vs C	5,1528	0,004145	p<0.01
	B vs C	0,5286	0,8999947	*
CMA	A vs B	3,7464	0,0382323	p<0.05
	A vs C	3,8714	0,0317037	p<0.05
	B vs C	0,125	0,8999947	*
CC	A vs B	4,6407	0,0095331	p<0.01
	A vs C	4,746	0,0080467	p<0.01
	B vs C	0,1054	0,8999947	*
Micro P	A vs B	3,4592	0,0581328	*
	A vs C	3,0179	0,1069027	*
	B vs C	0,4413	0,8999947	*
MacroP	A vs B	11,309	0,0010053	p<0.01
	A vs C	11,2927	0,0010053	p<0.01
	B vs C	0,0162	0,8999947	*
Armaz. Água	A vs B	4,1836	0,0196431	p<0.05
	A vs C	3,8713	0,0317064	p<0.05
	B vs C	0,3123	0,8999947	*

A: Antes do Fogo B: Depois do Fogo C: 2Meses pós Fogo
 (*) THS <0,05 não sendo significante

Anexo II – Caracterização da Vegetação e do Horizonte Orgânico

i – Matéria Seca da Vegetação por parcela e espécie

Parcela	Espécie	P campo (g)	P húm (g)	P seco 65°C (g)	Humidade (0-65°C) (%)	Matéria seca (%)	Matéria seca (g/0,49m ²)	Matéria seca (g.m ⁻²)	MS Global (kg.m ⁻²)
1	Esteva	310	191,93	44,64	76,74	23,26	72,11	147,16	2,01
	Carqueja	1905	279,12	133,63	52,12	47,88	912,07	1861,36	
2	Carqueja	940	296,63	161,97	45,40	54,60	513,27	1047,49	2,18
	Urze	1065	295,63	140,66	52,42	47,58	506,74	1034,17	
	Sargaço	300	174,53	30,37	82,60	17,40	52,21	106,55	
3	Esteva	205	94,96	30,34	68,04	31,96	65,52	133,71	0,721
	Carqueja	600	215,8	96,49	55,28	44,72	268,29	547,53	
	Rosmaninho	35	13,98	7,79	44,28	55,72	19,50	39,80	
4	Carqueja	2240	266,94	131,54	50,72	49,28	1103,86	2252,77	2,25
5	Carqueja	255	188,19	99,82	46,95	53,05	135,27	276,06	1,49
	Urze	1470	256,35	98,11	61,73	38,27	562,61	1148,18	
	Sargaço	95	82,3	27,73	66,30	33,70	32,02	65,34	
6	Esteva	790	354,72	105,86	70,16	29,84	235,77	481,16	0,976
	Carqueja	255	141,98	72,77	48,74	51,26	130,71	266,76	
	Urze	80	69,02	21,40	68,99	31,01	24,81	50,63	
	Sargaço	245	92,61	32,91	64,46	35,54	87,08	177,71	
7	Esteva	285	168,1	25,43	84,87	15,13	43,13	88,01	1,66
	Carqueja	985	219,83	128,37	41,60	58,40	575,21	1173,90	
	Urze	545	247,97	89,93	63,73	36,27	197,66	403,39	
8	Carqueja	655	220,64	124,07	43,77	56,23	368,32	751,67	1,45
	Urze	1070	235,03	75,63	67,82	32,18	344,32	702,69	
9	Esteva	210	218,45	51,27	76,53	23,47	49,29	100,58	0,714
	Carqueja	465	289,56	136,10	52,99	47,01	218,57	446,07	
	Urze	290	222,67	63,15	71,64	28,36	82,25	167,85	

10	Carqueja	965	270,81	122,41	54,80	45,20	436,20	890,20	1,39
	Rosmaninho	575	289,38	123,32	57,38	42,62	245,05	500,10	
11	Carqueja	175	153,94	80,817	47,50	52,50	91,87	187,50	0,85
	Urze	955	258,05	87,65	66,03	33,97	324,38	662,00	

ii - Altura Vegetação

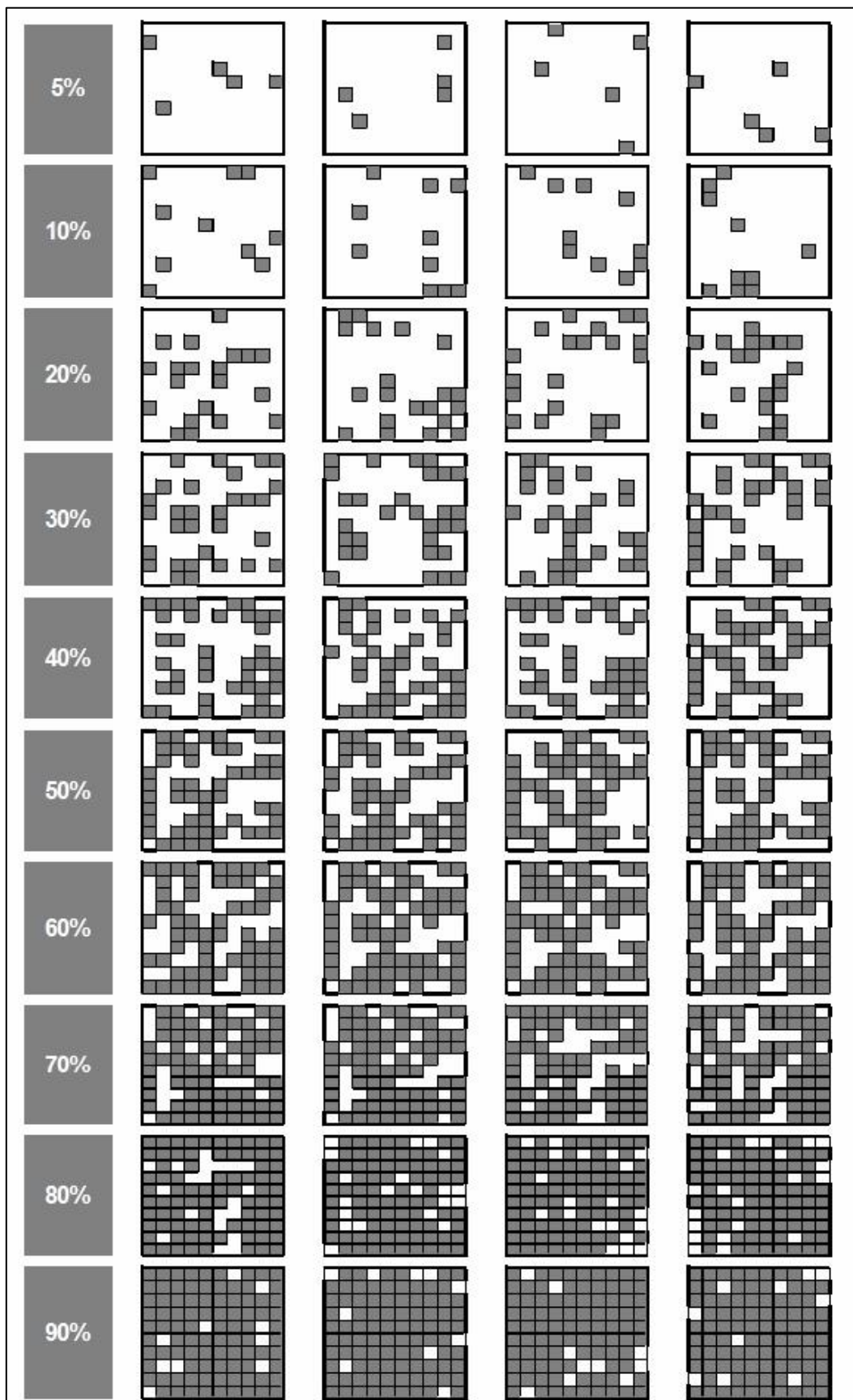
Parcela	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Altura Média (cm)
1	55	45	40	64	62	107	75	67	70	65
2	53	73	77	66	68	65	69	80	71	69,11
3	69.3	65.1	33	54	58	48.2	66.2	101.2	64.1	62,12
4	54	50	44	58	50	57	48	50	44	50,56
5	100	93.8	97.5	70	114	99.5	64	76.5	90	89,48
6	108	108	0	110	83	43	77	47	52	69,78
7	72	49	47	80	58	59	77	95	42	64,33
8	59	73	78	98	76	76	46.5	57	41.5	67,22
9	56.5	50	70	80	83	64	0	73	61.5	59,78
10	46	60	72.5	41	69	77	73	66	51	61,72
11	35	56	0	41	34	0	134	11	0	34,56

iii – Horizonte Orgânico antes e depois do fogo

Antes do FOGO								
Parcela	Peso de Campo (g)	P húm (g)	P seco (g)	Hum (0-65°C) (%)	Matseca (%)	Matseca (kg.m ⁻²)	Espessura (cm)	Densidade (kg.m ⁻³)
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	772	361,32	180,49	50,04	787,02	0,787	1,4	120,46
3	671	331,56	239,48	27,76	989,10	0,989	1,33	146,1
4	1108	380,91	214,68	43,63	1274,47	1,27	1,38	167,20
5	146	124,5	83,56	32,87	199,99	0,199	1,56	27,01
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	702	384,7	178,98	53,47	666,55	0,666	1,44	145,75
8	166	148,95	105,25	29,33	239,39	0,239	0,93	36,34
9	225	192,42	120,68	37,27	288,00	0,288	1,34	40,69
10	243	192,58	131,06	31,94	337,51	0,337	1,44	42,17
11	311	233,05	123,25	47,11	335,68	0,335	1,63	41,94
Depois do FOGO								
Parcela	Peso de Campo	P húm (g)	P seco (g)	Hum (0-65°C) (%)	Matseca (%)	Matseca (kg.m ⁻²)	Altura Méd (cm)	Densidade (kg.m ⁻³)
1	276,04	276,04	250,23	5,73	531,03	0,531	1,22	55,73
2	279,95	279,95	258,97	4,63	544,84	0,544	0,98	79,42
3	150,1	150,1	133,58	6,59	286,12	0,286	0,79	43,79
4	479,88	479,88	441,73	5,06	929,72	0,929	0,81	137,71
5	229,77	229,77	201,60	7,43	434,04	0,434	1,01	56,94
6	249,94	249,94	217,92	7,99	469,30	0,469	1,22	63,38
7	158,06	158,06	148,27	3,64	310,81	0,310	0,71	43,91
8	146,32	146,32	138,11	3,31	288,70	0,288	0,82	63,12
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	156,62	156,62	147,32	3,55	308,27	0,308	1,06	43,55
11	-	-	-	-	-	-	-	-

(-) Valores removidos pelos outliers

iv – Guia de Cobertura



v – Cobertura Vegetal por espécie

<i>Parcela</i>	<i>Esteva (%)</i>	<i>Carqueja (%)</i>	<i>Urze (%)</i>	<i>Sergaço (%)</i>	<i>Rosmaninho (%)</i>	<i>Solo nu (%)</i>	<i>Coberto Vegetal (%)</i>
1	20	50	0	0	0	30	70
2	0	50	30	10	0	10	90
3	30	40	0	0	10	20	80
4	0	80	0	0	0	20	80
5	0	20	60	10	0	10	90
6	30	15	10	5	0	40	60
7	10	60	20	0	0	10	90
8	0	50	30	0	0	20	80
9	30	20	10	0	0	40	60
10	0	50	0	0	30	20	80
11	0	20	60	0	0	20	80

Anexo III – Caracterização da Perda de Solo e Escoamento

i – Perda de solo e escoamento por parcelas, colheitas e declives

1° Colheita										
Parcela		Sed. Frent (g)	Sed. Susp. (g)	A (m ²)	V (m ³)	PS (g/m ²)	E (mm)	Conc. Sed - g/L	PS total (g.m-2.mm-1)	Coef. esc (%)
Declive 1	1	28,0	0	4	0	6,99	0	0	0.213	0
	2	21,0	0	4	0	5,24	0	0	0.159	0
	3	11,9	2,2	4	0,62	3,52	0.155	3,54	0.107	0,472
	4	17,4	0,85	4	0,405	4,56	0.101	2,09	0.139	0,308
Declive 2	5	24,1	1,18	4	6,36	6,33	1.59	0,185	0.193	4,84
	6	14,1	0,43	4	2,66	3,64	0.665	0,161	0.111	2,02
	7	4,0	0,15	4	0,355	1,05	0.088	0,422	0.032	0,270
	8	22,4	0,48	4	2,01	5,72	0.502	0,238	0.174	1,53
2° Colheita										
Parcela		Sed. Frent (g)	Sed. Susp. (g)	A (m ²)	V (m ³)	PS (g/m ²)	E (mm)	Conc. Sed - g/L	PS total (g.m-2.mm-1)	Coef. esc (%)
Declive 1	1	38,51	3,25	4	0	10,44	0	0	0,220	0
	2	81,10	26,73	4	1,72	26,95	0,43	15,54	0,568	0,90
	3	57,01	0,57	4	3,03	14,39	0,757	0,188	0,303	1,59
	4	18,99	4,82	4	4,09	5,95	1,022	1,178	0,125	2,15
Declive 2	5	90,50	2,16	4	11,98	23,16	2,99	0,180	0,488	6,31
	6	99,82	5,16	4	9,45	26,24	2,362	0,546	0,553	4,98
	7	38,30	1,23	4	2,31	9,88	0,577	0,532	0,208	1,21
	8	61,73	1,43	4	3,03	15,79	0,758	0,471	0,333	1,60