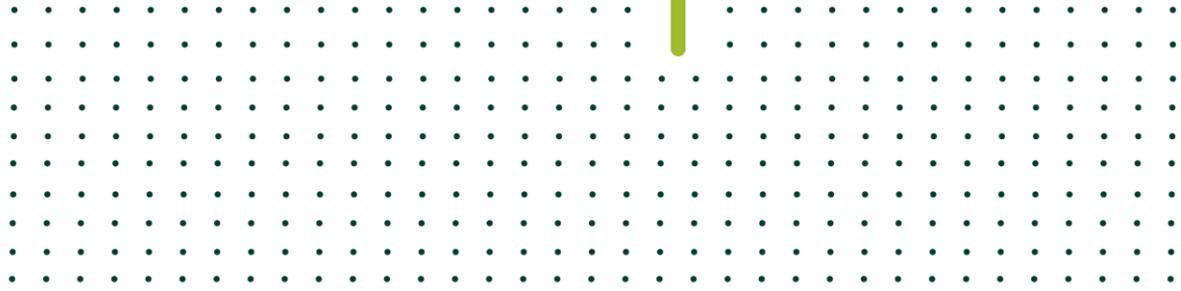


# rePLANT



## Dinâmica do combustível e do comportamento potencial do fogo nas faixas de proteção à infraestrutura de distribuição de energia elétrica

PPS 2 | Atividade 2.3 | Entregável E2.3.2

versão 1.0 | junho de 2023



[www.replant.pt](http://www.replant.pt)

*grounding collaborative strategies for integrated mngt of forests & fire*



## Índice

<b>1. Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2. Metodologia</b>	<b>3</b>
2.1. Processamento dos dados	3
2.2. Modelação da dinâmica do combustível	4
2.3. Modelação do comportamento potencial do fogo	4
2.3.1. Comparação entre a FGC e o seu exterior	4
2.3.2. Simulação do comportamento do fogo nas FGC	5
<b>3. Resultados</b>	<b>5</b>
3.1. Dinâmica do combustível	5
3.1.1. Coberto da vegetação	5
3.1.2. Altura da vegetação	6
3.1.3. Fitovolume	7
3.1.4. Carga de combustível fino	9
3.2. Comportamento potencial do fogo	11
3.2.1. Comparação entre a FGC e o seu exterior	11
3.2.2. Variabilidade da intensidade da frente de chamas	12
<b>4. Discussão</b>	<b>14</b>
<b>5. Referências bibliográficas</b>	<b>16</b>
<b>Anexo 1</b>	<b>17</b>

---

### Autoria e aprovação

Autores:

UTAD: Paulo Fernandes, Dalila Lopes

### Histórico do documento

v1.0 – 02/06/2023 – primeira versão do documento

## Sumário

O desenvolvimento da vegetação em ocupação (coberto) do solo, altura, volume e carga de combustível nas faixas de gestão de combustível (FGC) das infraestruturas lineares de transporte e distribuição de energia é analisado e modelado. Além do tempo desde a intervenção, detectaram-se efeitos significativos da estratégia de regeneração (vegetativa versus germinação obrigatória ou facultativa) da vegetação após tratamento e, com menor importância, da litologia (siliciosa-ligeira ou siliciosa-franca versus siliciosa-pesada ou básica-pesada), mas não do clima. A recuperação pode ser considerada rápida, ainda que muito variável, correspondendo a regeneração vegetativa e os solos siliciosos ligeiros ou francos a reconstituição mais rápida da estrutura e carga de combustível. De acordo com os dados disponíveis para comparação, o desenvolvimento da vegetação é mais lento após gradagem comparativamente às operações de corte; a primeira é particularmente eficaz onde a vegetação seja dominada por arbustos de resposta vegetativa.

As FGC foram comparadas com as áreas circundantes no contexto do comportamento potencial do fogo, indicando que aos 5-7 anos após intervenção não há diferença na classe de perigo atribuída à FGC e à sua envolvente. Em seguida, simulou-se o comportamento do fogo nas FGC dos vários locais amostrados para os dias do período 2002-2021, considerando a intensidade da frente de chamas como o descritor relevante. As simulações evidenciaram a ampla variação possível face às condições ambientais, mas indicam que em condições meteorológicas desfavoráveis um incêndio impossível de controlar em FGC será um evento excepcional, possível e provável, respetivamente ao segundo, terceiro e quarto ano após tratamento.

O desempenho estatístico dos modelos desenvolvidos foi apenas moderado, tal como invariavelmente sucede quando por imperativos práticos a abordagem de amostragem da dinâmica do combustível substitui o espaço pelo tempo. Tal não retira relevância aos resultados, cujas implicações operacionais serão subseqüentemente apresentadas num manual técnico.

## 1. Introdução

O entregável 2.3.1 descreveu as metodologias utilizadas no inventário das características estruturais da vegetação em faixas de gestão de combustível (FGC) associadas às linhas de distribuição de energia elétrica; na avaliação qualitativa do comportamento potencial do fogo; e no processamento dos dados obtidos para obtenção de estimativas da biomassa (na sua componente combustível). Do entregável 2.3.1 consta também uma apresentação exploratória dos resultados, nomeadamente uma avaliação preliminar dos padrões temporais dos descritores do combustível após intervenção de corte.

No presente entregável, e na sequência do trabalho anterior, procede-se à análise estatística dos dados de campo para fins de modelação da dinâmica temporal do combustível e à simulação do comportamento do fogo. Os resultados fornecerão a base de conhecimento para subsequentemente desenvolver um manual técnico relativo à periodicidade da gestão de combustíveis sob linhas elétricas.

## 2. Metodologia

### 2.1. Processamento dos dados

A análise estatística da dinâmica temporal dos descritores do combustível nas FGC e seu entorno foi antecedida do processamento dos dados de campo – ocupação (a partir do registo de presença/ausência) e espessura/altura dos vários estratos – e das variáveis determinadas a partir desses dados (fitovolumes e cargas de combustível). Assim, calcularam-se as médias por local (n=97) na FGC e no seu exterior de todas as variáveis de interesse, ou seja, as variáveis a modelar e as variáveis independentes potencialmente capazes de explicar a variabilidade observada.

Uma análise exploratória foi utilizada para reclassificar as influências da litologia e do clima por agrupamento das classes originais (ver entregável E2.3.1) de acordo com várias opções.

A composição florística condiciona a estrutura e carga do complexo combustível, bem como a dinâmica da resposta após uma perturbação. É expectável que as espécies de plantas com capacidade de regeneração vegetativa recuperem mais rapidamente que as plantas que dependem obrigatoriamente da germinação de sementes, uma vez que a rebentação é assegurada pelas reservas de amido armazenadas nos órgãos subterrâneos. Considerando a estratégia das várias espécies, obtida por consulta da base de dados BROT 2.0 (Tavşanoğlu & Pausas, 2018) e a dominância de cada estratégia relativa em termos de volume ocupado, atribuiu-se a cada local uma das seguintes possibilidades:

1. Estratégia vegetativa (R), incluindo espécies como a carqueja (*Pterospartum tridentatum*); silvas (*Rubus*); fetos (*Pteridium aquilinum*); carrasco (*Quercus coccifera*) e outras quercíneas; e espécies mediterrânicas típicas de solos calcáreos e argilosos, como o medronheiro (*Arbutus unedo*), a aroeira (*Pistacia lentiscus*) e outras (*Phyllirea*, *Olea*, *Ceratonia*, *Daphne*, *Myrtus*).
  2. Estratégia de germinação obrigatória (*Cistus*, *Lavandula*, *Rosmarinus*, *Thymus*, *Halimium*, *Helychrisium*, *Calluna*, *Pinus*, *Juniperus*) ou facultativa, mas com alguma predominância da germinação ou equilíbrio entre a germinação e a resposta vegetativa (*Eucalyptus*, *Acacia*, *Cytisus*, *Ulex*, *Erica*).
- Herbáceas, que não foram identificadas até ao nível da espécie e cuja estratégia é geralmente desconhecida.

## 2.2. Modelação da dinâmica do combustível

O processo de modelação procurou quantificar a evolução dos descritores do combustível em função do tempo decorrido desde a última intervenção (em anos) e de covariáveis categóricas expressando o efeito do clima, da litologia e da estratégia de regeneração vegetativa, incluindo testes para interações entre variáveis. O modelo ajustado aos dados dependeu da natureza da variável dependente:

1. A fração do solo coberto por vegetação foi modelada através de um modelo linear generalizado com distribuição binomial e ligação logit.
2. A altura e volume da vegetação e a carga de combustível foram modelados de acordo com uma função potência ( $y=ax^b$ ) para o efeito do tempo, linearizada, ou seja, após transformação logarítmica, também aplicada ao tempo desde a intervenção. Da análise exploratória constatou-se que esta forma funcional (com  $b<1$ ) descreve adequadamente as tendências de modificação da estrutura e acumulação do combustível ao longo do tempo, sendo mais realista que a função exponencial assintótica usualmente adotada, provavelmente devido à concentração de dados nas “idades” jovens após intervenção, tal como descrito no entregável E2.3.1.

Os dados colhidos no campo refletem a prática generalizada da E-REDES, ou seja, corte mecânico eventualmente complementado com corte motomanual. A fim de estender a análise à dinâmica de combustíveis após gradagem – a prática predominante nas faixas de muito alta tensão da REN – recorremos a uma base de dados preexistente. Esta informação respeita a plantações de eucalipto geridas pela TNC (The Navigator Company), nas quais a recuperação da vegetação é parcialmente estrangida pelo ensombramento e competição com o arvoredo, ainda que haja atenuação desse efeito pela plantação em linhas e copa relativamente esparsa do eucalipto. Em todo o caso, para melhor aproximação às condições de uma FGC, excluíram-se da análise os povoamentos com coberto de copas superior a 30%.

O processo de ajuste das equações e seleção entre modelos alternativos com base nas variáveis independentes a incluir privilegiou a minimização do erro de predição, adotando como indicador o Critério de Informação de Akaike corrigido para amostras pequenas (AICc).

Quando relevante efetuaram-se análises de tendência recorrendo ao ajuste de funções polinomiais de alisamento (*splines*).

## 2.3. Modelação do comportamento potencial do fogo

### 2.3.1. Comparação entre a FGC e o seu exterior

A classificação do perigo de incêndio (Hines et al., 2010), entendido como o comportamento potencial do fogo tal como determinado pela componente vegetação e resultante das pontuações atribuídas pela metodologia de Gould et al. (2008) foi utilizada para avaliar a diferença entre a FGC e a vegetação adjacente para perceber a duração da intervenção deste ponto de vista.

Através de uma análise de contingência examinou-se a distribuição das várias combinações de níveis de perigo de incêndio na FGC e no seu exterior. Considerando apenas as situações adjacentes à FGC que configuravam perigo elevado a extremo, e exprimindo a pontuação da FGC em percentagem da pontuação no seu exterior, determinou-se o tempo médio necessário para a FGC e o seu exterior convergirem no nível de perigo após uma intervenção.

### 2.3.2. Simulação do comportamento do fogo nas FGC

A intensidade da frente de chamas foi adotada como o descritor do comportamento do fogo mais relevante no contexto da gestão das infraestruturas de transporte e distribuição de energia, uma vez que representa a energia libertada por unidade de tempo e, conseqüentemente, o impacto do incêndio e a sua dificuldade de controlo. O comportamento do fogo varia ao longo do seu perímetro em função do alinhamento com a direção do vento e/ou declive. As simulações representam o máximo possível num determinado incêndio, pois respeitam às características de propagação do fogo na sua “cabeça”, a secção mais rápida e intensa.

A intensidade do fogo calcula-se como o produto da sua velocidade de propagação, consumo de combustível na frente de chamas (assumido frequentemente como o consumo do combustível fino) e calor de combustão, frequentemente assumido como constante,  $18.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ . O modelo de Rothermel tal como implementado numa das várias aplicações informáticas disponíveis constitui a opção mais óbvia e universal de simulação do comportamento do fogo. Contudo, exigiria a atribuição a cada local de um modelo de combustível, o que é impraticável e dificilmente conciliável com o propósito de analisar a dinâmica do fogo ao longo de um gradiente de variação da estrutura do combustível. Adicionalmente, os resultados de simulações do comportamento do fogo com o modelo de Rothermel após gestão do combustível facilmente originam estimativas irrealistas e conclusões erróneas (Fernandes, 2010; Cruz et al., 2014). Por estes motivos, estimou-se a velocidade de propagação com as equações de Anderson et al. (2015) e Cheney et al. (1998), respetivamente para formações arbustivas e formações herbáceas. Esta abordagem também não é isenta de crítica, nomeadamente pela sua aplicação a situações de descontinuidade do complexo combustível. A fim de minimizar esse efeito, que sobrestima a propagação do fogo, ajustou-se a altura média da vegetação pela sua % de coberto sempre que esta era inferior a 50%. Nas situações em que o complexo combustível era repartido entre arbustos e ervas ponderaram-se as respetivas estimativas em função do fitovolume de cada estrato.

Pontualmente, em caso de dominância por folhada e resíduos lenhosos, a simulação recorreu ao BehavePlus (Andrews, 2004) e ao modelo de combustível mais indicado para a situação em causa.

Os resultados das simulações do comportamento do fogo variam num intervalo muito amplo em função da velocidade do vento, humidade do combustível e consumo de combustível. Espera-se, portanto, variabilidade regional na distribuição dos resultados das simulações, em que será muito variável a probabilidade de excedência de um dado nível de intensidade do fogo correspondendo a um determinado tempo desde intervenção ou, mais geralmente, a um determinado complexo combustível. A fim de considerar esta variabilidade utilizaram-se os índices de perigo meteorológico de incêndio (FWI) produzidos pelo ECMWF (reanálise ERA-5 Land) para seis dos municípios amostrados, simulando nessa base o comportamento potencial do fogo para todos os dias do período 2002-2021 e seguindo essencialmente a metodologia de Aparício et al. (2022) para o efeito. A partir das simulações efetuaram-se análises da variação da intensidade da frente de chamas em função do município, FWI e tempo desde intervenção.

## 3. Resultados

### 3.1. Dinâmica do combustível

#### 3.1.1. Coberto da vegetação

Os vários modelos que descrevem a dinâmica do combustível são apresentados no Anexo 1. A recuperação da cobertura do solo pela vegetação viva é tendencialmente bastante rápida após a

intervenção de gestão do combustível, mas também extremamente variável, como é notório pela dispersão dos valores observados (Figura 1, painel esquerdo).

A estratégia de regeneração tem um efeito notório na dinâmica da cobertura vegetal: ao terceiro ano após o tratamento o coberto é estimado pelo modelo em cerca de 80% caso haja dominância de arbustos com resposta vegetativa (R) ou herbáceas (Herb), e em cerca de 60% caso se trate de arbustos com estratégia de germinação obrigatória ou facultativa (G ou Mx). A diferença vai-se atenuando com o decorrer do tempo e por volta dos 10 anos após intervenção verifica-se convergência entre as duas modalidades de regeneração. O revestimento do solo pela vegetação é praticamente total a partir dos 12 anos.

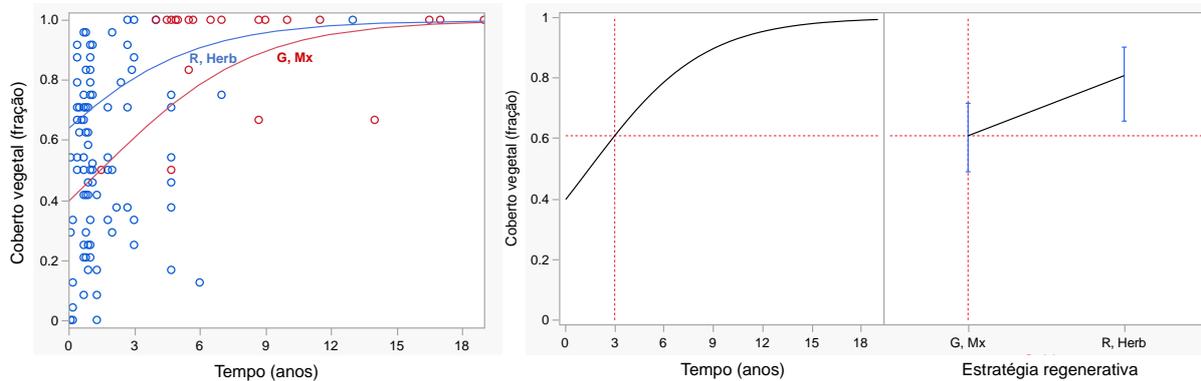


Figura 1. Modelo para a fração de coberto da vegetação, discriminando as observações em FGC (o) e na vegetação adjacente (o). O painel direito mostra a cobertura por vegetação estimada pelo modelo para a combinação de 3 anos após tratamento e estratégia regenerativa por germinação obrigatória (G) ou facultativa (Mx).

### 3.1.2. Altura da vegetação

A recuperação após intervenção da altura da vegetação nas FGC é mais prolongada no tempo do que a da cobertura do solo (Figuras 2 e 3). Contudo, as maiores alturas de vegetação observadas na envolvente das FGC verificaram-se antes dos seis anos após perturbação.

O tempo pesa bastante mais na explicação da variabilidade do que a estratégia de regeneração (Anexo 1). Contudo, após considerar o efeito do tempo, a estratégia vegetativa corresponde a uma altura que supera em 31% a altura correspondente à regeneração seminal. Opostamente ao que sucede com o coberto da vegetação, verifica-se algum aumento da divergência entre estratégias ao longo do tempo, ou seja, a altura associada à estratégia vegetativa é progressivamente maior relativamente à estratégia de germinação. Note-se que neste caso a estratégia selecionada estatisticamente respeita apenas aos estratos arbustivos e de fetos e não à vegetação como um todo, provavelmente porque a altura do estrato herbáceo varia pouco com o tempo.

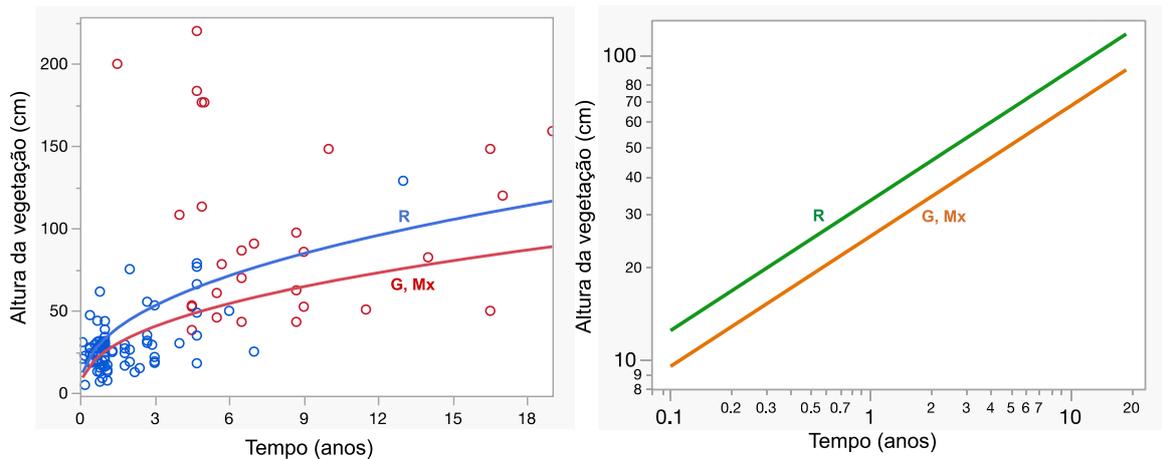


Figura 2. Modelo para a altura da vegetação, distinguindo as observações em FGC (o) e na vegetação adjacente (o). Para melhor percepção, o painel direito mostra a tendência temporal como uma reta para cada estratégia, ou seja, resultando da transformação logarítmica das variáveis dependente e independente. Neste modelo as estratégias regenerativas são relativas aos estratos arbustivo e de fetos.

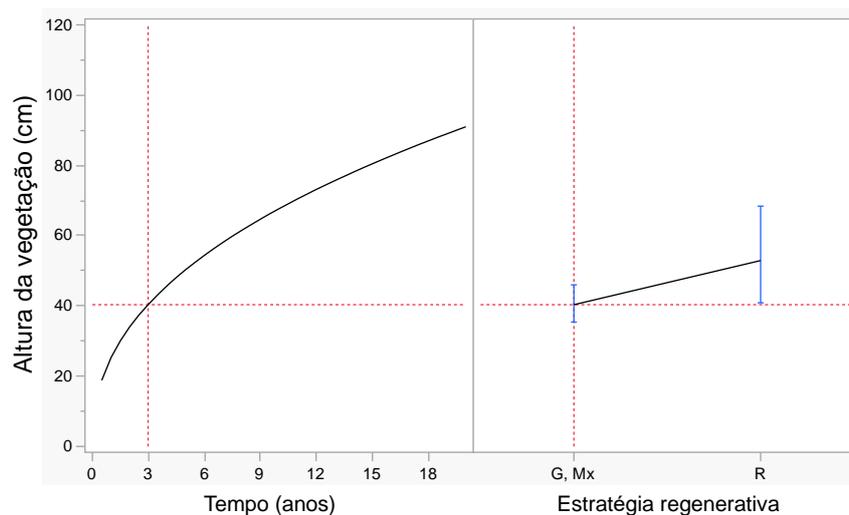


Figura 3. Modelo para a altura da vegetação, mostrando a estimativa para a combinação de 3 anos após tratamento e estratégia regenerativa por germinação obrigatória (G) ou facultativa (Mx).

### 3.1.3. Fitovolume

A dinâmica do fitovolume após intervenção segue um padrão similar ao da altura da vegetação, mas com um afastamento progressivo entre estratégias de regeneração ainda mais marcado. Por exemplo, um fitovolume de  $2000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  é alcançado logo ao primeiro ano em caso de regeneração vegetativa, mas apenas no terceiro ano quando a revegetação decorre de germinação ou existe dominância herbácea (Figura 4).

A análise estatística indicou um efeito adicional da litologia (Figura 5), ainda que residual (Anexo 1), mas previamente não detetado no caso do coberto e da altura. Controlando para o efeito das outras variáveis no modelo verifica-se que a litologia siliciosa-ligeira ou siliciosa-franca corresponde a um fitovolume superior em 35% ao da litologia siliciosa-pesada ou básica-pesada. Da mesma forma, as

médias ajustadas para os efeitos do tempo e da litologia revelam que o fitovolume da estratégia vegetativa supera o da estratégia germinativa em 82%.

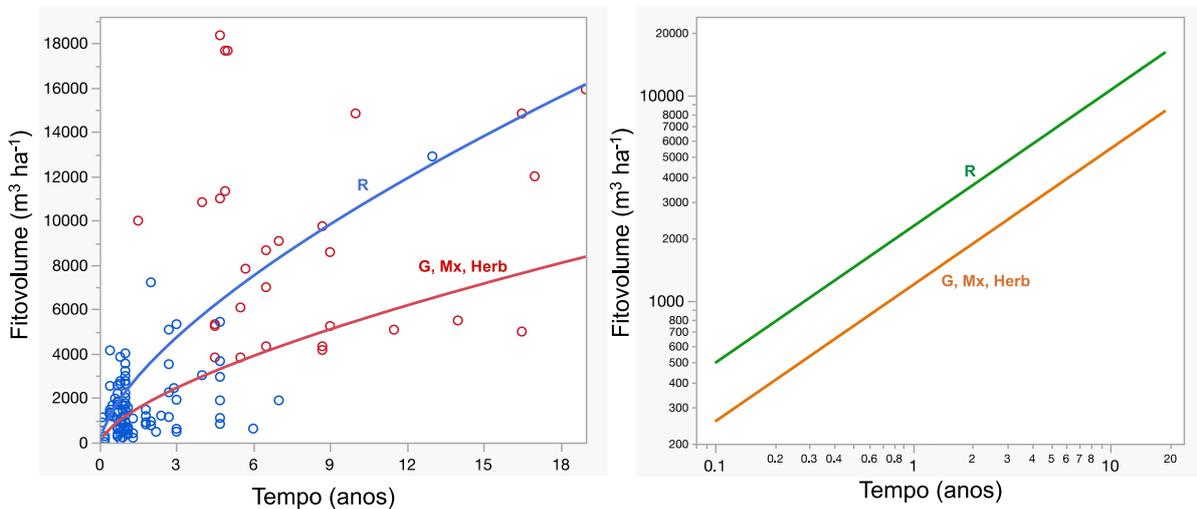


Figura 4. Modelo para o fitovolume sem considerar a influência da litologia, diferenciando as observações em FGC (o) e na vegetação adjacente (o). Para melhor percepção, o painel direito mostra a tendência temporal como uma reta para cada estratégia, ou seja, resultando da transformação logarítmica das variáveis dependente e independente.

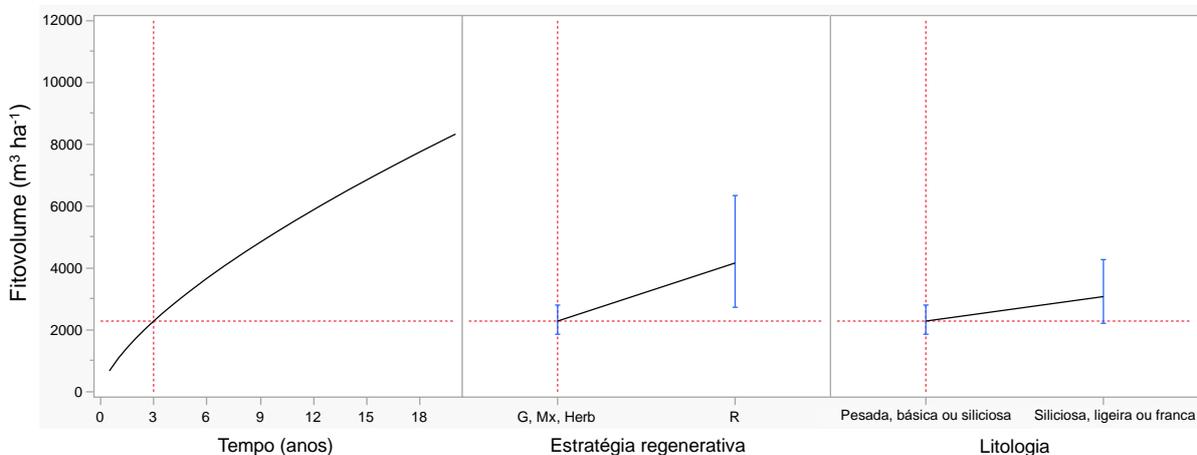


Figura 5. Modelo para o fitovolume integrando a influência da litologia, mostrando a estimativa para a combinação de 3 anos após tratamento, estratégia regenerativa por germinação obrigatória (G), facultativa (Mx) ou dominância por herbáceas, e litologia siliciosa-pesada ou básica-pesada.

Apesar da escassez dos dados disponíveis ( $n=45$ ), a análise do desenvolvimento do fitovolume após gradagem resultou num modelo consistente, ainda que com um maior grau de incerteza, o que é visível nos intervalos de confiança representados na Figura 6. Mantêm-se os efeitos da estratégia de regeneração e da litologia, que ganham peso relativamente ao tempo desde o tratamento (Anexo 1) e indicam um contraste maior na resposta. O acréscimo de fitovolume ao longo do tempo é mais achatado comparativamente ao do corte mecânico, ou seja, a recuperação é mais lenta. Uma diferença importante é a inversão dos efeitos das estratégias regenerativa: a resposta das espécies com regeneração vegetativa é substancialmente inferior à das espécies germinadoras, o que se

explicará pelo revolver do solo que a gradagem implica, danificando os órgãos subterrâneos das plantas responsáveis pela rebentação e eventualmente criando uma “cama” de solo mais favorável à germinação.

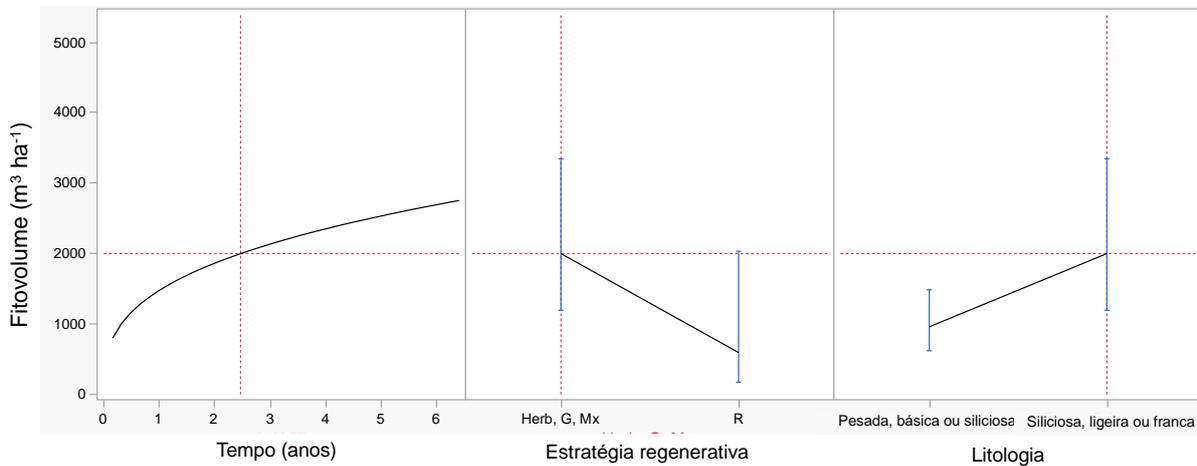


Figura 6. Modelo para o fitovolume após tratamento com gradagem. O menor tempo necessário para atingir um fitovolume de 2000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> corresponde à combinação da estratégia de germinação ou dominância herbácea com litologia siliciosa-ligeira ou siliciosa-franca.

Os estratos de combustível cuja orientação é essencialmente horizontal – folhada e resíduos lenhosos – praticamente não têm tendência temporal (Figura 7). Do corte da vegetação resultará deposição destes materiais. Se no caso da lenha a decomposição irá tendencialmente diminuir o volume ao longo do tempo, no caso da folhada essa decomposição é contrabalançada pelo acréscimo de material paralelamente à reconstituição dos estratos de vegetação.

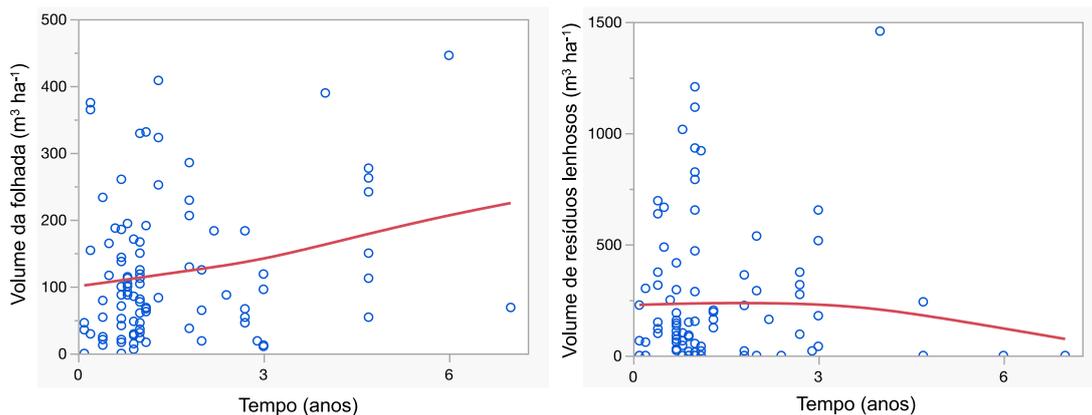


Figura 7. Tendências temporais no volume de folhada (esquerda) e de resíduos lenhosos (direita) nas FGC.

### 3.1.4. Carga de combustível fino

Há muita dispersão na relação entre a carga estimada de combustível fino e o fitovolume. O ajuste de uma regressão linear (Figura 8) apenas logrou explicar 36% da variabilidade na carga de combustível e a opção por funções lineares não melhorou o resultado. A carga de combustível fino inclui não só a

vegetação como também a folhada, e a estimação da carga de combustível em função do volume variou com a altura e composição da vegetação, pelo que a inconsistência seria expectável à partida. A implicação óbvia deste resultado é constatar que o fitovolume é um indicador grosseiro do perigo de incêndio e do comportamento potencial do fogo.

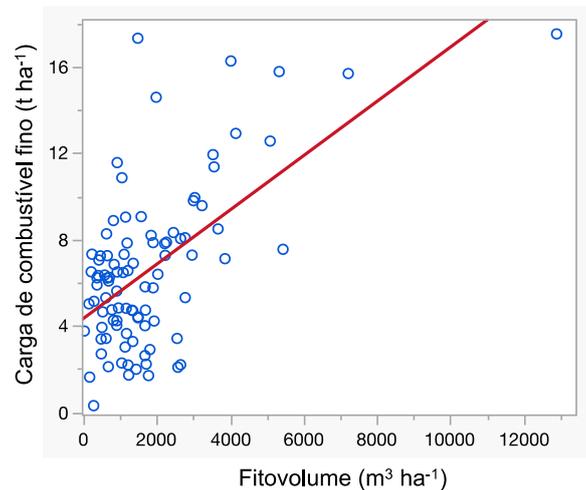


Figura 8. Relação linear entre a carga de combustível fino e o fitovolume da vegetação nas FGC.

Os diferentes patamares e ritmos de reacumulação do combustível fino após corte são bastante evidentes na Figura 9: tanto a carga como a taxa a que aumenta ao longo do tempo diminuem progressivamente no sentido da estratégia vegetativa, estratégia germinativa e dominância por herbáceas. No primeiro caso a recuperação é particularmente rápida nos dois primeiros anos, atingindo cerca de 10 t ha<sup>-1</sup> ao terceiro ano.

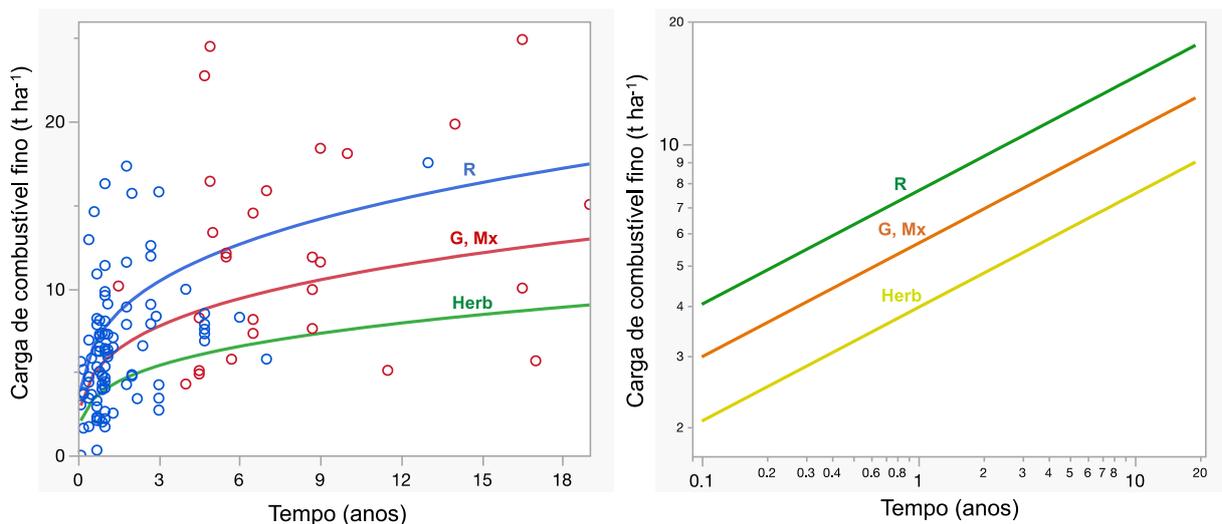


Figura 9. Modelo para a carga de combustível fino sem considerar o efeito da litologia, diferenciando as observações em FGC (o) e na vegetação adjacente (o). Para melhor percepção, o painel direito mostra a tendência temporal como uma reta para cada estratégia, ou seja, resultando da transformação logarítmica das variáveis dependente e independente.

Tal como no caso das análises do fitovolume, o modelo completo (integrando a litologia) para a evolução temporal da carga de combustível (Figura 10) indica maior carga de combustível em litologia siliciosa-ligeira ou siliciosa-franca, com um acréscimo de 18% após considerar as influências do tempo e estratégia da vegetação. No que a esta diz respeito, a carga de combustível relativa é de 1.9 : 1.5 : 1, respetivamente resposta vegetativa, germinação e herbáceas.

A fração de combustível morto fino relativamente ao combustível morto fino total pode ser um descritor relevante do perigo de incêndio. Varia sazonalmente no caso da vegetação herbácea, a qual transita totalmente para o estado morto no verão. Observou-se uma enorme variação neste descritor, com valores centrais de um terço a metade da carga de combustível fino e praticamente sem tendência temporal.

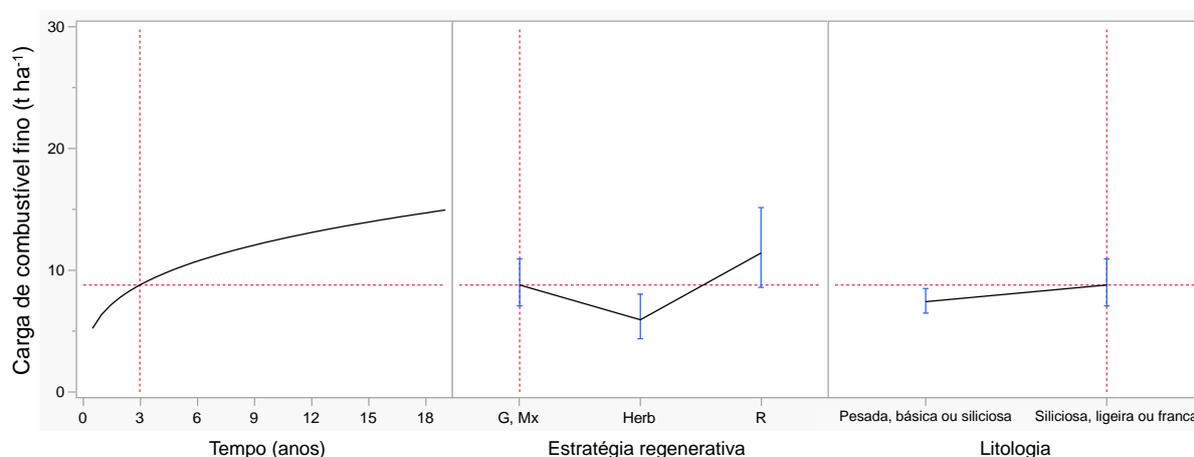


Figura 10. Modelo para a carga de combustível fino, mostrando a estimativa para a combinação de 3 anos após tratamento, estratégia regenerativa por germinação obrigatória (G) ou facultativa (Mx) e litologia siliciosa-ligeira ou siliciosa-franca.

Em média, a carga de combustível total nos locais amostrados era o dobro da carga de combustível fino. Optou-se por não a modelar, atendendo a que a sua estimativa é substancialmente mais incerta e ao facto da velocidade e intensidade do fogo serem dominadas pelo combustível fino.

## 3.2. Comportamento potencial do fogo

### 3.2.1. Comparação entre a FGC e o seu exterior

Uma matriz de confusão (Tabela 1) mostra que cerca de 89% das FGC amostradas foi classificada como tendo perigo de incêndio nulo a moderado. Tal é consistente com a distribuição do tempo desde a intervenção, mas, como já referido, dificultou a análise da dinâmica do combustível e, consequentemente, da dinâmica do comportamento do fogo. Comparativamente, 59% dos locais foram incluídos nas classes de perigo reduzido ou moderado na vegetação contígua à FGC. Esperar-se-ia talvez um contraste maior entre as FGC e a vegetação adjacente, mas foi amenizado pela existência de montado ou de vegetação herbácea em vários dos locais amostrados no sul do país. Pontualmente, o perigo de incêndio revelou-se mais elevado na FGC que na vegetação circundante, o que se deve à reorganização temporária da vegetação num complexo mais combustível na sequência de intervenção bastante recente.



ilustrativos de como a combinação entre condições meteorológicas, tempo desde a intervenção e dinâmica do desenvolvimento do combustível após intervenção (determinada pelo tipo de vegetação e produtividade local) condicionam o comportamento do fogo. É particularmente visível a grande variação intermunicipal no índice FWI a partir do qual a intensidade do fogo atinge um determinado nível médio (correspondente às curvas ajustadas aos dados).

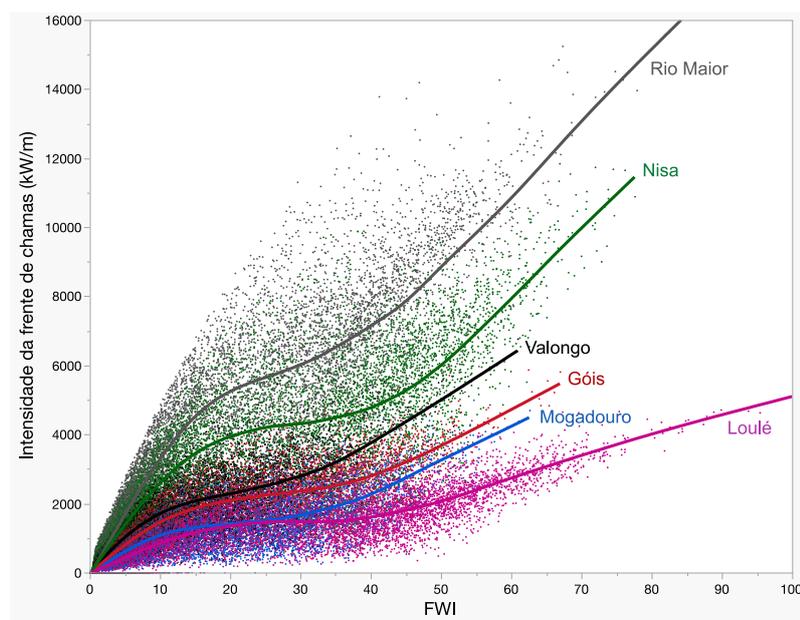


Figura 12. Simulações diárias da intensidade da frente de chamas para o FWI diário no período 2002-2021 em seis dos municípios alvo de amostragem.

O processamento dos dados representados na Figura 12 a fim de calcular a intensidade da frente de chamas média e percentagens de dias com fogo muito intenso ( $>4000 \text{ kW m}^{-1}$ ) e extremamente intenso ( $>10.000 \text{ kW m}^{-1}$ ) para cada um dos municípios e anos (um a seis) desde tratamento originou a Figura 13. São de novo evidentes as grandes diferenças entre municípios, mas é importante notar que estas diferenças não são generalizáveis, ou seja, apenas refletem as condições nos locais onde houve trabalho de campo.

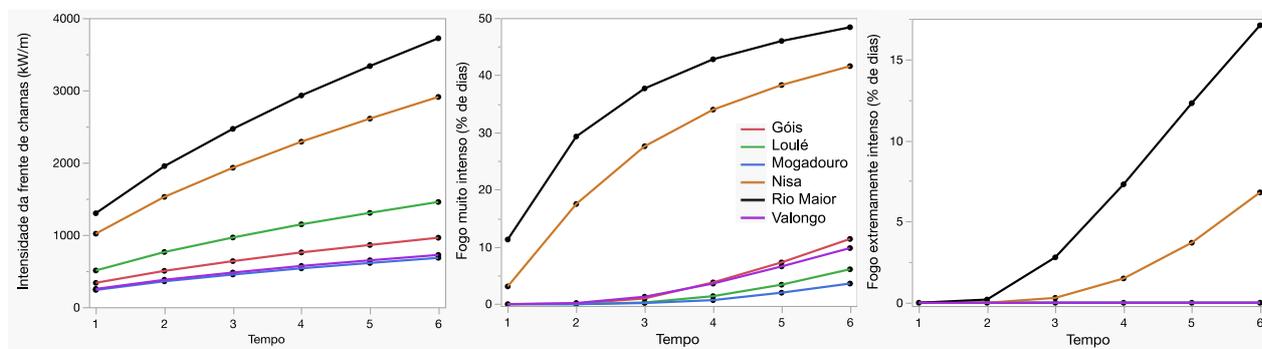


Figura 13. Análise das simulações diárias (dados na Figura 12) do comportamento do fogo no período 2002-2021: intensidade da frente de chamas média e percentagens de dias com fogo muito intenso ( $>4000 \text{ kW m}^{-1}$ ) e extremamente intenso ( $>10.000 \text{ kW m}^{-1}$ ) para vários tempos desde tratamento.

Enquanto a Figura 12 se refere à variação na intensidade do fogo resultante da combinação entre meteorologia e localização geográfica, a Figura 13 descreve o que resulta da combinação entre o tempo desde intervenção e a localização geográfica. Finalmente, tomando os vários municípios em conjunto, é possível determinar, para cada tempo desde tratamento, limiares pirometeorológicos médios correspondentes a incêndios cuja intensidade impede o seu controlo direto, usualmente classificados como “fora da capacidade de extinção”. A análise da distribuição do índice de perigo FWI no período 2002-2021 permite traduzir aqueles limiares em número de dias por ano em que um incêndio não será controlável numa FGC (Tabela 2).

No primeiro ano após intervenção não é possível que um incêndio alcance a intensidade de 4000 kW m<sup>-1</sup> numa FGC, sendo extremamente improvável que tal suceda no segundo ano. A partir do terceiro ano essa probabilidade vai aumentando, mas a variação é extremamente elevada, tal como a Figura 12 já indicava. De novo, assinala-se que estes resultados são específicos dos locais considerados nesta análise e não são generalizáveis.

Tabela 2. Média, por tempo desde a redução do combustível, do índice de perigo meteorológico de incêndio (FWI) correspondente a um incêndio incontrolável (intensidade >4000 kW m<sup>-1</sup>) numa FGC e número de dias por ano em que tal sucedeu (2002-2021) nos seis municípios exemplo. Os valores mínimos e máximos correspondem respetivamente aos municípios de Valongo e Loulé.

Tempo (anos)	FWI	Número de dias por ano		
		Mínimo	Médio	Máximo
1	-	0	0	0
2	72	0	0	2
3	55	0	6	20
4	45	1	21	57
5	40	2	34	81
6	35	6	51	105

## 4. Discussão

A dinâmica do combustível após uma intervenção de gestão sob as infraestruturas da rede de distribuição de energia é, em geral, rápida em termos de coberto, altura e volume da vegetação e de carga de combustível. Contudo, observou-se que a variabilidade é muito grande, dada a multiplicidade de influências envolvidas.

A análise pôde identificar efeitos da litologia e da estratégia de regeneração da vegetação na dinâmica do combustível: solos derivados de litologias siliciosas-ligeiras ou siliciosas-francas com comunidades de plantas dominadas por espécies que respondem vegetativamente após perturbação recuperam mais rapidamente a sua estrutura e biomassa, e essa recuperação tende para patamares mais elevados, comparativamente a comunidades de plantas dominadas por herbáceas ou por arbustos de germinação obrigatória ou facultativa em solos associados a litologia pesada, sejam siliciosos ou básicos. Contudo, o efeito da litologia pode ser considerado residual relativamente ao peso do tempo desde tratamento e estratégia de regeneração.

Ao contrário dos resultados de um estudo anterior também respeitante a operações de gestão do combustível (Mirra et al., 2017), não foi possível identificar a presumível influência climática. É provável que o facto do ombrótipo seco estar representado por apenas 14,4% dos locais amostrados explique essa ausência dos modelos desenvolvidos.

A amostragem incidu apenas em FGC mantidas por corte mecânico, eventualmente complementado por corte motomanual. Dados preexistentes mostram que técnicas que acarretam algum grau de mobilização do solo, como o uso de grade de discos, têm um impacto mais duradouro na vegetação e, portanto, permitem espaçar mais as intervenções. A gradagem será particularmente recomendada onde a vegetação é dominada por espécies de resposta vegetativa que, ao contrário do que sucede com o corte, recuperam mais lentamente que as comunidades dominadas por germinadoras obrigatórias ou facultativas.

A análise qualitativa do perigo de incêndio usada para comparar as FGC e a vegetação adjacente apontou para 5-7 anos como o período de tempo necessário para que a classificação atribuída às FGC iguale aquela atribuída à vegetação envolvente. É legítimo colocar reservas relativamente à interpretação deste resultado, nomeadamente por que se desconhece a relação das classes de perigo com o comportamento do fogo e porque se observaram alterações nos descritores do complexo combustível para lá daquele tempo.

O desempenho dos modelos que descrevem a dinâmica dos vários descritores do combustível, medido pela porção da variabilidade observada que conseguiram explicar ( $R^2$ ), foi apenas moderado, com o  $R^2$  a variar entre 0,30 e 0,46. Diversos fatores podem explicar este grau de desempenho, que indica que os modelos são adequados para descrever tendências, mas não para efetuar previsões: características edafoclimáticas específicas dos locais, variação no impacto das operações de gestão, incerteza na data de intervenção para uma parte dos locais ou, eventualmente, necessidade de maior intensidade de amostragem à escala do local. Na verdade, a capacidade preditiva das equações acompanha aquela alcançada em todos os restantes estudos de dinâmica de combustíveis empreendidos em Portugal (Rosa et al., 2011; Botequim et al., 2015; Mirra et al., 2017), exceto quando respeitantes a tipos de vegetação específicos em áreas limitadas (Fernandes e Rego, 1998; Fernandes et al., 2000). Neste projeto e nos trabalhos citados, à exceção de Fernandes et al. (2000), a metodologia de amostragem substituiu o tempo pelo espaço. Basear a modelação na monitorização ao longo do tempo do desenvolvimento da vegetação em locais específicos e representativos constitui a única forma de superar as limitações implícitas na abordagem adotada.

As simulações do comportamento do fogo basearam-se em modelos de propagação utilizados operacionalmente, ou recomendados para tal, e cujo desenvolvimento ou validação incluiu dados de incêndios. São, portanto, realistas, refletindo o pior cenário possível, o do comportamento de um incêndio cuja “cabeça” contacte com uma FGC; o comportamento do fogo será sobrestimado caso a interceção da FGC se dê por um flanco ou pela retaguarda do incêndio. A natureza do combustível nos anos iniciais após tratamento é de molde a que o comportamento potencial do fogo seja exagerado pelos modelos, quer devido à descontinuidade da vegetação, quer devido à relativamente elevada humidade da vegetação viva.

Este entregável não inclui recomendações e prescrições relativamente à periodicidade das intervenções, as quais constarão de um manual técnico elaborado para o efeito a partir dos resultados e dos modelos aqui obtidos.

## 5. Referências bibliográficas

- Andrews, P.L. 2014. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, 23(1), 21–33.
- Aparício, B.A., Santos, J.A., Freitas, T.R., Sá, A.C., Pereira, J.M., & Fernandes, P.M. 2022. Unravelling the effect of climate change on fire danger and fire behaviour in the Transboundary Biosphere Reserve of Meseta Ibérica (Portugal-Spain). *Climatic Change*, 173(1-2), 5.
- Botequim, B., Zubizarreta-Gerendiain, A., Garcia-Gonzalo, J., Silva, A., Marques, S., Fernandes, P.M., ... & Tome, M. 2015. A model of shrub biomass accumulation as a tool to support management of Portuguese forests. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 8(2), 114.
- Cruz, M.G., Alexander, M. E., & Dam, J.E. 2014. Using modeled surface and crown fire behavior characteristics to evaluate fuel treatment effectiveness: a caution. *Forest Science*, 60(5), 1000-1004.
- Fernandes, P.M. 2009. Examining fuel treatment longevity through experimental and simulated surface fire behaviour: a maritime pine case study. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(12), 2529-2535.
- Fernandes, P., & Rego, F.C. 1998. Changes in fuel structure and fire behaviour with heathland aging in Northern Portugal. Pp. 433-436 In Proc. 13th Conf. on Fire and Forest Meteorology, Oct. 1996, Lorne, Melbourne, Australia. International Association of Wildland Fire.
- Fernandes, P., Ruivo, L., Gonçalves, P., Rego, F., & Silveira, S. 2000. Dinâmica da combustibilidade nas comunidades vegetais da Reserva Natural da Serra da Malcata. In Livro de Actas do Congresso Ibérico de Fogos Florestais, 17-19 Dez. 2000, Escola Superior Agrária de Castelo Branco. pp. 177-186.
- Gould, J.S., McCaw, W.L., Cheney, N.P., Ellis, P.F., & Matthews, S. 2008. *Field guide: fire in dry eucalypt forest: fuel assessment and fire behaviour prediction in dry eucalypt forest*. CSIRO Publishing.
- Hines, F., Hines, F., Tolhurst, K.G., Wilson, A.A., & McCarthy, G.J. 2010. *Overall fuel hazard assessment guide*. Melbourne: Victorian Government, Department of Sustainability and Environment.
- Mirra, I.M., Oliveira, T.M., Barros, A.M., & Fernandes, P.M. 2017. Fuel dynamics following fire hazard reduction treatments in blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management*, 398, 185-195.
- Rosa, I.M.D., Pereira, J.M.C., & Tarantola, S. 2011. Atmospheric emissions from vegetation fires in Portugal (1990–2008): estimates, uncertainty analysis, and sensitivity analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(6), 2625-2640.
- Tavşanoğlu, Ç., & Pausas, J.G. 2018. A functional trait database for Mediterranean Basin plants. *Scientific Data*, 5(1), 1-18.

## Anexo 1

Tabela A1. Modelos descritivos da dinâmica do combustível.

Variáveis modeladas	Unidades*	Modelo	Variáveis independentes (efeito relativo)	R <sup>2</sup>
Coberto da vegetação	Adimensional (fração)	GLM, ligação logit	Tempo desde intervenção (0,741) <sup>1</sup> Estratégia de regeneração (0,303)	0,363
Log (Altura da vegetação)	cm	Linear	Tempo desde intervenção (0,935) <sup>2</sup> Estratégia de regeneração (0,066)	0,404
Log (Fitovolume+1)	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Linear	Tempo desde intervenção (0,893) <sup>3</sup> Estratégia de regeneração (0,148) Litologia (0,04)	0,463
Log (Fitovolume+1)	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Linear	Tempo desde intervenção (0,558) <sup>3</sup> Estratégia de regeneração (0,317) Litologia (0,199)	0,299
Log (Carga de combustível fino+0,01)	t ha <sup>-1</sup>	Linear	Tempo desde intervenção (0,721) <sup>4</sup> Estratégia de regeneração (0,241) Litologia (0,054)	0,357

\* Das variáveis dependentes não transformadas

<sup>1</sup> G, Mx ou R, Herb

<sup>2</sup> G, Mx ou R (referente ao estrato arbustivo apenas)

<sup>3</sup> G, Mx, Herb ou R

<sup>4</sup> G, Mx ou R, Herb

G = germinação obrigatória; Mx = germinação facultativa; R = rebentação (vegetativa); Herb = herbáceas.