

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/375989302>

Práticas para a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas com histórico de incêndios rurais em Portugal: Projeto FRISCO: gestão de riscos de contaminação da qualidade da...

Book · November 2023

CITATIONS

0

READS

123

8 authors, including:



J.P. Nunes

Wageningen University & Research

204 PUBLICATIONS 6,429 CITATIONS

SEE PROFILE



Joana Parente

FCiências

57 PUBLICATIONS 942 CITATIONS

SEE PROFILE



Akli Benali

University of Lisbon

52 PUBLICATIONS 1,086 CITATIONS

SEE PROFILE



Niels Nitzsche

University of Lisbon

6 PUBLICATIONS 1 CITATION

SEE PROFILE

PRÁTICAS PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS COM HISTÓRICO DE INCÊNDIOS RURAIS EM PORTUGAL

**Projeto FRISCO: gestão de riscos de
contaminação da qualidade da água induzidos pelo fogo**



FRISCO

Managing fire-induced risks
of water quality contamination

fct

Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

Declaração de exoneração de responsabilidade: Este guia foi criado no âmbito do Projeto FRISCO: gestão de riscos de contaminação da qualidade da água induzidos pelo fogo (referência PCIF/MPG/0044/2018) e foi baseado nos resultados do mesmo. A equipa do Projeto FRISCO demarca-se assim de qualquer responsabilidade que resulte de qualquer ação tomada com base nas informações presentes neste guia, nem por quaisquer erros ou emissões. Apesar de todos os esforços para assegurar a exatidão das informações contidas neste guia, a equipa do Projeto FRISCO não faz nenhuma reivindicação, expressa ou implícita, relativamente às mesmas.

Sobre o projeto FRISCO: O projeto FRISCO (gestão de riscos de contaminação da qualidade da água induzidos pelo fogo) foi financiado desde o ano 2020 pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, com referência PCIF/MPG/0044/2018. O projeto FRISCO teve como objetivo principal avaliar a vulnerabilidade dos recursos hídricos de superfície à contaminação induzida pelos incêndios. A equipa deste projeto foi constituída por investigadores das Universidades de Lisboa, Aveiro e Wageningen, bem como representantes dos gestores portugueses de água e floresta.

PDF ISBN 978-989-53724-7-8 DOI 10.13140/RG.2.2.10650.00969
Impresso ISBN 978-989-53724-8-5 DOI 10.13140/RG.2.2.29524.37761



Este guia utiliza uma licença *Creative Commons* CC-BY por: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pt>. Isto significa que é permitido copiar e redistribuir o material em qualquer suporte ou formato para qualquer fim, mesmo que comercial; remixar, transformar e criar a partir do material para qualquer finalidade, inclusive para fins comerciais. Desde que seja concedido o devido crédito, um link para a licença deve ser fornecido e deve ser indicado as alterações eventualmente realizadas. Além disso, não poderão ser aplicados termos jurídicos ou medidas de carácter tecnológico que restrinjam legalmente outros de fazerem algo que a licença permita.

Para qualquer utilização ou reprodução de fotografias ou outro material que não seja propriedade do FRISCO, deve ser pedida autorização diretamente aos detentores dos direitos de autor:

Imagem da Capa: © Myke Koopmans
Imagem dos Agradecimentos: © Jimmy Chang -Unsplash
Imagem do Índice: © Sippakorn Yamkasikorn - Pexels
Imagem das Abreviações e acrónimos: © U.S. Department of Agriculture - Wikimedia Commons
Imagem do Resumo: © Matt Palmer - Unsplash
Imagem do Capítulo 1: © Thayne Tuason - Wikimedia Commons
Imagem do Capítulo 2: © Malachi Brooks - Unsplash

Imagem do Capítulo 3: © U.S. Department of Agriculture - Wikimedia Commons
Imagem do Capítulo 4: © Czeva- Wikimedia Commons
Imagem da Figura 3: © Oscar González-Pelayo
Imagem da Figura 5: © João Pedro Nunes e Léonard Bernard-Jannin)
Imagem da Figura 8: © IPMA
Imagem da Figura 13: © Sergio Prats e Florian Ulm

Citação recomendada deste guia

Nunes, J. P., Parente, J., Benali, A., Nitzsche, N., Prats, S., Sá, A., Brito, C., Dias, L. F. - Práticas para a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas com histórico de incêndios rurais em Portugal: Projeto FRISCO: gestão de riscos de contaminação da qualidade da água induzidos pelo fogo, J. P. Nunes e J. Parente (editores), Projeto FRISCO, 2023, ISBN: 978-989-53724-7-8. DOI: 10.13140/RG.2.2.10650.00969.

Lista de autores e de contribuidores

João P. Nunes, Grupo Física do solo e gestão de terras, Universidade de Wageningen (WUR), cE3c - Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais & CHANGE - Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade; Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa (Coordenador do projeto FRISCO).

Joana Parente, cE3c - Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais & CHANGE - Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade; Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

Akli Benali, Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa.

Niels Nitzsche, cE3c - Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais & CHANGE - Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade, Universidade de Lisboa.

Sérgio Prats, MED&CHANGE | MED – Instituto Mediterrâneo de Agricultura, Ambiente e Desenvolvimento & CHANGE – Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade, Universidade de Évora

Ana Sá, Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa; ForestWISE - Laboratório Colaborativo para a Gestão Integrada da Floresta e do Fogo, Quinta de Prados, Vila Real 5001-801, Portugal

Carlos Brito, Águas de Portugal – Valor

Luís F. Dias, cE3c - Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais & CHANGE - Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa (Co-coordenador do projeto FRISCO).

Revisão científica

Domingos Xavier Viegas, Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais, Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, Universidade de Coimbra

Filipe Duarte Santos, cE3c - Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais & CHANGE - Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

Jacob Keizer, DAO - Departamento de Ambiente e Ordenamento, GeoBioTec - Unidade de Investigação de Geobiosciências, Geoengenharia e Geotecnologias, UAVR - Universidade de Aveiro

Editores

João P. Nunes, Grupo Física do solo e gestão de terras, Universidade de Wageningen (WUR), cE3c - Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais & CHANGE - Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade; Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa (Coordenador do projeto FRISCO).

Joana Parente, cE3c - Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais & CHANGE - Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade; Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

Layout

Joana Parente, cE3c - Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais & CHANGE - Instituto de Mudança Global e Sustentabilidade; Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

Design

Artur Lucas

Parceiros:



Ciências
ULisboa

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa



INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA
Universidade de Lisboa



UNIVERSIDADE
DE LISBOA



AdP VALOR
Grupo Águas de Portugal

Colaboradores:



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH



UNIVERSIDADE
DE ÉVORA

Financiamento:



Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia



REPÚBLICA
PORTUGUESA

Agradecimentos

A equipa do FRISCO agradece o financiamento recebido pela Fundação para a Ciência e para Tecnologia (FCT, referência: PCIF/MPG/0044/2018) para o desenvolvimento deste guia e da investigação subjacente, desenvolvido por uma parceria entre a Faculdade de Ciências (via associação FCIências.ID- Associação para a Investigação e Desenvolvimento de Ciências) e o Instituto de Agronomia da Universidade de Lisboa; a Universidade de Aveiro; a sociedade Águas de Portugal Valor – Serviços Ambientais (AdP-Valor); e a Universidade de Wageningen, nos Países Baixos (parceiro não financiado). Agradece-se em especial a Marta Carvalho da AdP-Valor por aceitar colaborar num projeto de investigação científica, o que permitiu que a experiência prática acompanhasse os estudos académicos desenvolvidos no projeto. Agradece-se ainda aos revisores do guia, Domingos Xavier Viegas da Universidade de Coimbra, Filipe Duarte Santos da Universidade de Lisboa, e Jan Jacob Keizer da Universidade de Aveiro, pela disponibilidade para colaborarem na validação científica do projeto.

Para além dos autores deste guia, é importante agradecer aos outros investigadores que colaboraram na execução do projeto e permitiram a obtenção dos dados de base para estes resultados; nomeadamente, Jantien Baartman da Universidade de Wageningen, Oscar González Pelayo da Universidade de Aveiro, Stefan Doerr da Universidade de Swansea, e Bruno Aparício da Universidade de Lisboa.

Finalmente, agradecemos a todos os estudantes de mestrado e doutoramento que desenvolveram as suas teses e dissertações enquadradas pelo projeto FRISCO: Dafni Petratou, Dante Föllmi e Stefan van der Grift da Universidade de Wageningen; Joost Schuurman da Universidade de Utrecht; Jinfeng Wu da Universidade Agrária da China; e Beatriz Faria, Dina Jahanianfard e Tomás Calheiros e Menezes da Universidade de Lisboa. Sem eles não teria sido possível concluir as diversas tarefas com o mesmo grau de profundidade.

Desejamos também agradecer às seguintes instituições a disponibilidade de dados de acesso aberto nos seus sítios de “internet”, que sem eles não teria sido possível avançar com este projeto:

- i) Sistema nacional de informação de recursos hídricos (SNIRH, <https://snirh.apambiente.pt/>);
- ii) Instituto da Conservação da Natureza e Florestas (ICNF, <https://icnf.pt/>);
- iii) Direção-Geral do Território (DGT, <https://www.dgterritorio.gov.pt/>);
- iv) Agência Portuguesa do Ambiente (APA, <https://apambiente.pt/>);
- v) *European Soil Data Centre* (ESDAC, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets/>);
- vi) Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>).



Índice

Crédito: © Sippakorn Yamkasikorn via Pexels

1. Incêndios rurais e qualidade da água	1
1.1. Conceitos essenciais sobre incêndios rurais	4
1.2. Processos de contaminação da qualidade da água associados a incêndios rurais	6
1.3. Avaliação e mitigação de risco	13
1.4. Bibliografia	14
2. Prevenção de incêndio rural	17
2.1. Risco e perigosidade estrutural de incêndio rural	17
2.2. Risco conjuntural de incêndio rural	18
2.3. Índice de risco estrutural de contaminação dos recursos hídricos por incêndios rurais	19
2.4. Mapeamento de áreas ardidas após um incêndio rural	21
2.5. Mitigação à exposição e ao perigo de incêndios rurais de elevada intensidade	22
2.6. Bibliografia	24
3. Resposta e recuperação após incêndio rural	26
3.1. Avaliação de risco imediatamente após incêndio rural	26
3.2. Monitorização da qualidade da água em áreas ardidas	27
3.3. Avaliação de risco no meio recetor	28
3.4. Mitigação da mobilização de cinzas e sedimentos após o incêndio	30
3.5. Mapeamento de áreas prioritárias para implementar medidas de mitigação	32
3.6. Prioridades no tratamento da água	34
3.7. Bibliografia	36
4. Casos de estudo: os incêndios rurais de 2003 e de 2017	38
4.1. Bibliografia	40

Abreviações e acrónimos

C_i	Fator de gestão da cobertura
K_i	Erodibilidade do solo
LS_i	Fator gradiente de comprimento de inclinação
P_i	Fator de prática de suporte
R_i	Fator de erosividade da chuva
<i>AdP Valor</i>	Águas de Portugal – Valor
AGIF	Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais
Al	Alumínio
ANEPC	Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
APPS	Áreas prioritárias de prevenção e segurança
Associação FCIências.ID	Associação para a Investigação e Desenvolvimento de Ciências
Ca^{2+}	Cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
CE	Condutividade elétrica
<i>CEF</i>	<i>Centro de Estudos Florestais</i>
CHANGE	<i>Global Change and Sustainability Institute</i>
CIM	Comunidades intermunicipais
DGT	Direção-Geral do Território
dNBR	<i>Delta normalized burn ratio</i>
EFFIS	<i>European forest fire information system</i>
ESDAC	<i>European soil data centre</i>
ET	Enxofre total
FCT	Fundação para a Ciência e para Tecnologia
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Fe^{2+}	Ferro
FGC	Faixas de gestão de combustível
FIC	Faixas de interrupção de combustível
FT	Fósforo total
FWI	<i>Fire weather index</i>
GNR	Guarda nacional republicana
IC	Índice de conectividade
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e Florestas
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
ISA	Instituto Superior de Agronomia

K ⁺	Potássio
LAPSUS	Modelo de evolução de paisagem
LEB	Barreiras de troncos
MED	<i>Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development</i>
Mg ²⁺	Magnésio
MMF	<i>Morgan-Morgan-Finney</i>
Mn ²⁺	Manganês
Na ⁺	Sódio
NPA	Nível de Pleno Armazenamento
NUTS III	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
PAM	Poliacrilamidas
PNGIFR	Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais
RCM	Risco Conjuntural e Meteorológico
RdNBR	Versão relativizada do dnbr
RUSLE	Equação universal de perda de solo
SEB	Feixes de restos de arbustos
SGIFR	Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais
SiO ₂	Sílica
SNIRH	Sistema nacional de informação de recursos hídricos
SST	Sólidos suspensos totais
TC	Carbono total
TN	Nitrogénio total
VC	Valor crítico
VL	Valor limite
WUR	<i>Wageningen university</i>
Zn ²⁺	Zinco



Crédito: © Matt Palmer via Unsplash

Resumo

Os incêndios rurais são um fenómeno recorrente em Portugal. Muitas vezes as cinzas produzidas por estes incêndios atingem as massas de água utilizadas para o abastecimento público, comprometendo a sua qualidade. Num exemplo recente, as cinzas resultantes dos incêndios de 2017 levaram à interrupção do abastecimento de água a algumas localidades, e à implementação de programas de monitorização adicional em outras captações. Nas últimas décadas, investigadores em Portugal e no resto do mundo têm estudado este fenómeno; no entanto, até ao momento presente, apenas parte deste conhecimento teórico se tem traduzido em medidas práticas para avaliar e mitigar o risco de contaminação, passíveis de serem implementadas no terreno.

Este guia propõe-se a fazer a ponte entre a teoria e a prática da gestão da água em bacias hidrográficas propensas a incêndios rurais. O guia baseia-se nos resultados mais recentes da investigação científica nesta área, e conta com a colaboração de investigadores ligados às universidades de Lisboa, Évora e Wageningen (Países Baixos), bem como de técnicos de gestão da água ligados ao grupo das Águas de Portugal. Pretende-se dar uma visão global das práticas para a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas com histórico de incêndios rurais em Portugal.

O guia aborda os seguintes temas:

- i) conceitos fundamentais sobre incêndios rurais e a forma como podem conduzir à contaminação da qualidade da água;
- ii) medidas de avaliação e mitigação de risco antes da ocorrência de um incêndio, incluindo o risco de incêndio estrutural e conjuntural, a exposição dos recursos hídricos aos incêndios, e medidas de prevenção de incêndios;
- iii) medidas de resposta após a ocorrência de um incêndio, incluindo avaliação de risco imediato, monitorização da qualidade da água em áreas ardidas, estabilização de emergência das encostas afetadas, e alteração aos processos de tratamento da água bruta;
- iv) casos de estudo em Portugal após os incêndios de 2003 e 2017.



Capítulo 1

Incêndios rurais e qualidade da água

João P. Nunes, Ana Sá, Akli Benali, Joana Parente



Os incêndios rurais (**Caixa 1**) afetam regularmente o território rural das bacias hidrográficas portuguesas. Estes eventos perturbam o coberto vegetal e a estrutura do solo de acordo com a sua extensão e severidade, criando uma camada de cinza rica em compostos capazes de contaminar a qualidade da água (**Caixa 2**). Além disso, os incêndios rurais podem aumentar a mobilização dos compostos contaminantes, ao alterar o coberto e as propriedades hídricas dos solos, potenciando

assim a geração de escorrência superficial e a erosão e transporte de cinza e sedimentos finos.

Esta mobilização dos compostos contaminantes pode chegar às massas de água superficiais a jusante, principalmente nos meses e anos de maiores períodos de precipitação e até de seca após o incêndio. Esta contaminação leva a impactos potenciais na captação de água para consumo humano, podendo levar à necessidade de tratamentos adicionais ou, no limite, a limitações na distribuição de água potável pela rede pública,

Caixa 1 | *Fogo rural e Incêndio rural*¹

Território rural: território florestal e agrícola.

Território agrícola: terreno ocupado com agricultura e pastagens melhoradas, segundo as especificações técnicas da carta de uso e ocupação do solo de Portugal continental.

Território florestal: terreno ocupado com florestas, matos, pastagens espontâneas, superfícies agroflorestais e vegetação esparsa, segundo as especificações técnicas da carta de uso da ocupação do solo de Portugal continental e compatíveis com os critérios do inventário florestal nacional.

Gestão de combustível: A criação e manutenção da descontinuidade horizontal ou vertical da carga combustível, através da modificação ou da remoção parcial ou total da biomassa vegetal e da composição das comunidades vegetais, empregando as técnicas mais recomendadas com a intensidade e frequência adequadas à satisfação dos objetivos dos espaços intervencionados.

Fogo rural: todo o fogo que ocorre em território rural, exterior a edifício, independentemente da sua intencionalidade e propósito, origem, dano ou benefício.

Incêndio rural: deflagração ou progressão do fogo, de modo não planeado ou não controlado, em território rural, requerendo ações de supressão.

Fogo de gestão de combustível: Classificação atribuída a um incêndio rural que, em condições meteorológicas adequadas e em territórios rurais, permite a evolução da propagação da combustão dentro de um perímetro preestabelecido pelo comandante das operações de socorro.

(¹Definições de acordo com: i) Ministros (2020) que aprova o Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais; e ii) Ministros (2021) que estabelece o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais no território continental e define as suas regras de funcionamento.)

como se verificou em algumas regiões no centro de Portugal após os incêndios de 2017. Por exemplo, devido à contaminação da água pelas cinzas em quatro captações diferentes da Lousã (Casal de S. Miguel, Sr. Graça, Cabril e Águas), perto de Coimbra, foi preciso recorrer a autotanques para que o abastecimento de água às populações fosse possível (APA, 2017a). Na captação de abastecimento de água da Ribeira de Alge, Ansião, foram também registados episódios de contaminação, que levaram à necessidade de adotar medidas relativas à limpeza e correção de linhas de água de cabeceira, assim como de proteção dos taludes das encostas ardidadas de um valor que rondou os 740 mil euros (APA, 2017b).

diferenças existentes nestas regiões do coberto vegetal, clima e solos limitam a sua aplicabilidade ao contexto mediterrânico, em geral, e a Portugal em particular. Por outro lado, existem dados suficientes em Portugal, nomeadamente de ocorrência de incêndios, impactos na escorrência e mobilização de sedimentos, e de qualidade da água em áreas potencialmente afetadas, que permitem ir além de uma simples adaptação de outros trabalhos e gerar nova informação com base na análise crítica da informação disponível.

O projeto FRISCO: gestão de riscos de contaminação da qualidade da água induzidos pelo fogo, analisou esta problemática no contexto de Portugal. Este projeto foi executado por um

Caixa 2 | A severidade do incêndio e a composição das cinzas²

Severidade do incêndio: medida indireta dos efeitos dos incêndios na vegetação e propriedades do solo. É um indicador da recuperação de uma dada área e do risco de erosão no pós-incêndio.

Cinza: é um resíduo alcalino inorgânico e orgânico que fica após a combustão da matéria orgânica durante um incêndio. A espessura da cinza varia de acordo com a severidade do incêndio quando esta é medida imediatamente a seguir ao incêndio, sendo tanto mais espessa quanto menor for a severidade do incêndio. O valor desta camada pode variar entre 1 e 10 cm. Contudo, tem se verificado em algumas áreas onde existe grande concentração de combustível em combustão espessuras de 20 cm. A cinza apresenta uma composição química base com os seguintes elementos: Carbonato de Cálcio (CaCO_3), pH, Carbono Total (TC), Nitrogénio Total (TN), rácio C/N. Esta composição é também rica em elementos que podem ser extraídos pela água como: Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Sódio (Na^+), Potássio (K^+), Fósforo total (FT), Enxofre total (ET), Sílica (SiO_2), Condutividade Elétrica (CE), Alumínio (Al), Manganês (Mn^{2+}), Ferro (Fe^{2+}) e Zinco (Zn^{2+}).

Cor da cinza: É um avaliador indireto dos efeitos dos incêndios no consumo da matéria orgânica e que descreve qualitativamente as condições das áreas ardidadas no pós-incêndio. As cores da cinza podem variar entre preto, branco, vermelho e/ou castanho. Esta escala de cores pode ser usada como medida da severidade um incêndio, e pode também ser usada como indicação do estado da combustão dos combustíveis. Uma cinza de cor escura representa uma combustão incompleta e terá maior proporção de material orgânico carbonizado do que cinzas de cor clara ou branca que são ricas em minerais e representam combustão completa. Consequentemente, uma cinza castanha e vermelha indica que o incêndio que afetou uma dada área foi de baixa severidade; uma cinza com uma escala de cores do preto para o muito cinzento indica que a severidade do incêndio foi de severidade moderada; e uma cinza com uma escala de cores do cinzento-escuro para o branco indica que a severidade do incêndio foi elevada.

(²Definições de acordo com: i) Pereira *et al.* (2012) analisou os efeitos da severidade do incêndio (estimada usando a cor das cinzas) nas propriedades químicas das cinzas; e ii) Bodí *et al.* (2011) que analisou a molhabilidade das cinzas.)

Existem várias formas que os gestores da água podem usar para limitar o risco (**Caixa 3**) de contaminação da água nas suas captações. Mas para isto, é necessário quantificar e caracterizar esse risco. Nesta temática existem vários trabalhos tanto científicos como de suporte à decisão feitos para regiões não mediterrânicas na América do Norte e na Austrália (Canning & Ryan, 2020). As

consórcio liderado pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (UL), que incluía a Universidade de Aveiro, o Instituto Superior de Agronomia da UL, a sociedade Águas de Portugal Valor – Serviços Ambientais, e contou com a colaboração da Universidade de Wageningen nos Países Baixos; e financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, referência:

PCIF/MPG/0044/2018). O projeto melhorou as metodologias necessárias que permitem aos gestores de recursos hídricos conhecerem os riscos potenciais de contaminação a que as suas captações estão sujeitas, tanto a longo prazo como

do risco de incêndio rural. O guia foca-se nas massas de água superficiais, uma vez que representam a grande maioria das fontes de água para abastecimento humano e uso agrícola em Portugal. O objetivo final (**Figura 1**) deste guia é

Caixa 3 | Risco, Perigosidade e Vulnerabilidade³

Risco: é a relação entre a perigosidade e a vulnerabilidade devido à ocorrência de um dado evento. Pode ter diferentes objetivos, tais como financeiro, de saúde e segurança, e ambientais. Assim, o risco representa a probabilidade das consequências prejudiciais ou os danos esperados resultantes das interações entre o perigo e as condições de vulnerabilidade devido à ocorrência de um dado evento. É importante denotar que o cálculo do risco deve ser feito consoante a sua causa. Por exemplo, se o risco for devido a intervenção ou atividade humana, o risco deve ser obtido mediante uma simulação determinística, ou seja, devem ser consideradas sempre as condições no pior cenário.

Perigosidade: é a quantificação de uma ameaça ou condição com potencial para causar perdas ou danos a vidas, ou para uma ameaça ou condição suscetível de causar perdas ou danos a vidas ou de provocar qualquer falha nos sistemas naturais, modificados ou humanos. Contudo, esta quantificação pode ser:

- i) qualitativa descrevendo o número de pessoas, propriedades, área afetada, etc., que estão sob ameaça;
- ii) obtida através do cálculo da probabilidade de ocorrência através da análise do histórico de eventos;
- iii) obtida através da soma das potenciais consequências para a zona afetada senão estiver em funcionamento um sistema de proteção.

Vulnerabilidade: é o grau de suscetibilidade a danos causados por um evento ou atividade perigosa. É composta por duas componentes: a capacidade de resistência de um sistema suportar o evento perigoso e a exposição do sistema a esse mesmo evento. A sua quantificação é algo árduo, mas necessária para a quantificação do perigo de uma ameaça real.

Suscetibilidade: é a propensão de um ativo ou recurso para sofrer um efeito positivo ou negativo em resultado da exposição a um perigo.

Gestão do risco: são as atividades coordenadas para dirigir e controlar uma organização/empresa em relação a um dado risco.

Plano de gestão de risco: é o esquema que no âmbito da gestão do risco especifica a abordagem, as componentes de gestão e os recursos a aplicar à gestão do risco.

³Definições de acordo com: i) Tsakiris (2009) que esclarece alguns dos termos que compõe a definição de risco e propor uma metodologia para a avaliação de riscos; e ii) ISO (2009) que providencia algumas definições de termos genéricos relacionados à gestão de riscos.)

imediatamente após um incêndio rural; e as possíveis medidas de mitigação do risco que estão disponíveis tanto para os gestores como para os proprietários das áreas afetadas.

Este guia sintetiza os resultados do projeto FRISCO, e de outros estudos científicos realizados sobre os impactos dos incêndios rurais na qualidade da água, em informação que os gestores da água portugueses possam consultar para analisar e mitigar o risco de contaminação das massas de água onde se encontram as suas captações. É incluído também uma descrição dos processos a analisar, fontes de informação disponíveis, e entidades responsáveis pela gestão

contribuir para a adaptação ao incêndio rural na gestão dos recursos hídricos em Portugal, e em especial das entidades gestoras responsáveis pela captação de água para distribuição para consumo humano. Neste sentido, este guia foca-se em indicar medidas de prevenção antes dos incêndios e medidas de resposta e recuperação após os incêndios. Tal, contribui para o objetivo mais vasto de adaptar as comunidades em Portugal ao incêndio rural.

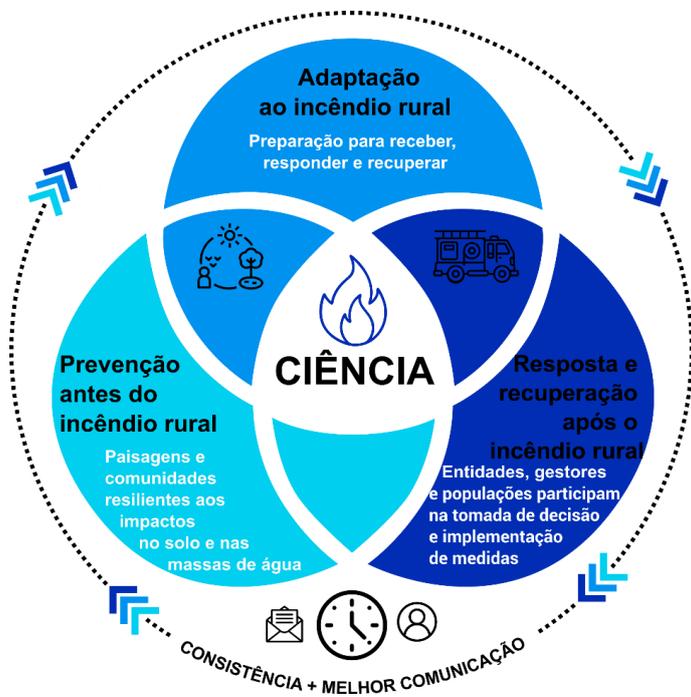


Figura 1 - Objetivos do guia

1.1. Conceitos essenciais sobre incêndios rurais

Os fatores que influenciam os incêndios podem ser analisados através da lógica de “interruptores”, que, quando ligados em simultâneo implicam que estão reunidas todas as condições para a ocorrência de um grande incêndio rural (área ardida superior a 100 ha) (Bradstock, 2010). Os quatro “interruptores” são os seguintes:

i) **Ignição:** é o início da produção da chama ou da combustão latente (Stacey *et al.*, 2012). Nos últimos 10 anos, em Portugal, ocorreram em média 14,776 ignições por ano que geraram incêndios (ICNF, 2022), sendo 99% das ignições de origem humana, tanto por negligência (23%), como por incendiário (76%), e cerca de 1% devido a causas naturais, isto é, queda de raios (Parente *et al.*, 2018):

ii) **Quantidade/Carga e continuidade de combustível:** a primeira é determinada, geralmente, pelo peso seco da biomassa de vegetação fina (herbáceas e arbustos) disponível por unidade de área e que varia entre diversas formações de vegetais (Anderson, 1981). A

segunda diz respeito à distribuição do combustível na vertical e horizontal que permite ou não assegurar a propagação do incêndio, e que depende de diversos fatores como o tipo de solo, a quantidade de água e declive. Estas condições de continuidade horizontal de combustível estão presentes, pelo menos em parte, na grande maioria do território rural português, bem como em áreas de descontinuidade criadas por zonas agrícolas e/ou urbanas.

iii) **Disponibilidade do combustível para arder:** definida pelo grau de secura da vegetação. A combustão será mais rápida e eficaz quanto menor o teor de água presente na vegetação. Existem dois grandes grupos de combustíveis de acordo com o grau de humidade: (i) os combustíveis mortos, que não contêm tecido vivo e cujo teor de água extremamente baixo varia ao longo do dia e do ano em função das condições meteorológicas; (ii) os combustíveis vivos, que contêm tecido vivo e cujo teor de água é elevado, tipicamente controlado por mecanismos fisiológicos internos, varia ao longo do ano, atingindo valores mais baixos durante o verão. Estes dois tipos de combustíveis podem ser finos e/ou grosseiros, dos quais podem ser destacados, por exemplo, as folhas, musgos, agulhas de pinheiro, troncos e hastes grossas.

iv) **Tempo:** refere-se às condições atmosféricas ou meteorológicas momentâneas num dado lugar e num determinado momento, sujeita a variações. O tempo é determinado por um conjunto de fatores atmosféricos como a temperatura, a humidade relativa, e a direção e velocidade do vento à superfície. As temperaturas elevadas, humidades relativas baixas e intensidades do vento elevadas contribuem para a ignição e propagação dos incêndios rurais. O tempo também influencia a secura dos combustíveis mortos, e, conseqüentemente, a

probabilidade de ocorrência de uma ignição. Em Portugal, as condições meteorológicas favoráveis ao desenvolvimento de grandes incêndios (área ardida superior a 100 hectares) são frequentes entre os meses de junho e outubro.

Quando os quatro “interruptores” estão interligados, as complexas relações entre a meteorologia, os combustíveis, o ponto de ignição e a topografia têm um impacto significativo no comportamento de um incêndio. Este pode ser dividido em dois grupos principais: (i) incêndios de superfície, que se desenvolvem através da folhada, arbustos e parte superior da manta rota; e, (ii) incêndios de copas, que se propagam de forma passiva, alimentado se pela superfície, ou propagando se de forma ativa através delas. Os incêndios de copas podem gerar projeções, a distâncias variadas, que podem gerar novas ignições.

Existem vários descritores quantitativos para caracterizar o comportamento de um incêndio, dos quais se destacam:

i) **Velocidade de propagação (m/min)**: representa a velocidade a que um incêndio se propaga na sua trajetória. Em geral, é calculada medindo a distância máxima percorrida por um incêndio (tipicamente medida na sua frente ou cabeça) dividida pelo tempo que demorou a percorrê-la. É, sobretudo, dependente da intensidade do vento, da topografia e do teor de humidade dos combustíveis.

ii) **Intensidade da frente de chama (kW/m) e o comprimento de chama (m)**: a primeira é uma medida direta da quantidade de energia libertada sob a forma de calor. O segundo é a medida desde a base da chama que se encontra ao nível do solo até à ponta da chama, e representa uma medida análoga à intensidade que permite antever a dificuldade do combate. A intensidade da frente de chama depende da

composição e estrutura da vegetação combustível à superfície, da topografia, e das condições meteorológicas. Estes fatores estão interligados e determinam a biomassa e o teor de humidade dos combustíveis vivos, que quanto mais baixo for (combustíveis mais secos), maior é a intensidade esperada de um incêndio. A intensidade da frente de chama está ainda diretamente ligada com: (i) a capacidade de supressão de um incêndio e na frente de chamas, uma vez que a capacidade de controlar um incêndio será cada vez menor ou até impossível, quanto maior for a sua intensidade (**Tabela 1**); e, (ii) a severidade do incêndio, que pode ser definida como o grau de alteração ou destruição causada pelo incêndio no solo e na vegetação, podendo a perda ser parcial ou total.

É importante salientar que a principal estratégia para a prevenção de incêndios rurais consiste em “desligar” um ou mais dos “interruptores” acima descritos. Este processo pode ser realizado de duas maneiras:

i) **Redução do número de ignições**, algo que se tem verificado nos últimos cinco anos em Portugal (**Figura 2**), através de campanhas de sensibilização, um melhor acompanhamento das queimas e queimadas, e de um reforço da vigilância dissuasiva;

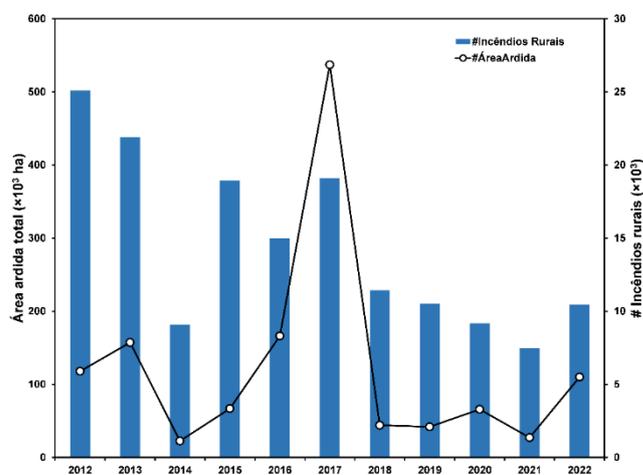


Figura 2 - Número de incêndios rurais e total de área ardida total por ano entre 2012 e 2022 e no período entre 1 de janeiro e 15 de outubro (ICNF, 2022).

ii) **Redução da quantidade e continuidade do combustível**, o que pode ser alcançado de diversas maneiras e será abordado com maior detalhe na secção 2.5.

O regime de incêndio integra um conjunto de variáveis que descrevem de forma geral os padrões espaciais, temporais e comportamentais do incêndio em uma determinada região. No sentido mais estrito, o regime de incêndio é definido por variáveis como a frequência, extensão, sazonalidade e intensidade que são características de uma área particular e/ou de um tipo de vegetação. No sentido mais lato, inclui também os fatores que mais influenciam a ocorrência e comportamento dos incêndios (como o uso do solo,

a população e o clima), bem como variáveis que caracterizam os seus impactos (Krebs *et al.*, 2010). Recentemente, foi disponibilizada uma cartografia de regimes de incêndio à escala da freguesia para Portugal continental para o período entre 1980 e 2017. Esta demonstra de forma bastante clara a heterogeneidade dos regimes de incêndio em Portugal, que variam desde os regimes de incêndio frequentes, de menor dimensão, associados sobretudo à pastorícia no Norte, até aos regimes de incêndios menos frequentes, mas de maiores dimensões e intensidade, presentes em largas extensões do Centro e Sul de Portugal continental (Pereira *et al.*, 2022).

Tabela 1 -Categorias de comportamento do incêndio (adaptada de Tedim *et al.* (2018); Alexander & Lannoville (1990); Palheiro *et al.* (2006), Elliot *et al.* (2016)).

Categoria	Intensidade frente chama (kW/m)	Comprimento de chama (m)	Velocidade de propagação (m/min)	Severidade do incêndio	Tipo de incêndio e capacidade de supressão
Baixo	< 500	<1.5	<5 ^a <15 ^b	Baixa	Incêndio de superfície. Dificuldade baixa, contenção efetiva com material de sapador.
Moderado	500-2,000	1.5 - 2.5	<15 ^a <30 ^b	Moderada	Incêndio de superfície. Contenção de dificuldade moderada. Meios terrestres efetivos
Elevado	2,000-4,000	2.5 - 3.5	<20 ^c <50 ^d	Elevada	Incêndio de superfície de elevada intensidade. Supressão muito difícil, necessidade de meios aéreos.
Muito Elevado	4,000-10,000	3.5 - 10	<50 ^c <100 ^d	Elevada	Incêndio passivo de copas. Supressão extremamente difícil. Contenção apenas possível com meios aéreos pesados.
Extremo	>10,000	>10	>50 ^c >100 ^d	Elevada	Comportamento extremo. Possibilidade de incêndio de copas ativo e projeções. A supressão da cabeça do incêndio é impossível.

^aFloresta e arbustos; ^bHerbáceas; ^cFloresta; ^dArbustos e herbáceas

1.2. Processos de contaminação da qualidade da água associados a incêndios rurais

O principal mecanismo pelo qual os incêndios rurais podem contaminar a qualidade da água é pela mobilização de cinzas, nutrientes, e outros agentes contaminantes (como metais ou hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) para as massas de água a jusante das áreas ardidas. Isto

deve-se, sobretudo, à potenciação da escorrência superficial e da erosão do solo nas áreas ardidas, através da remoção do coberto vegetal, da alteração das propriedades do solo (por exemplo, aumento da repelência do solo à água), ou de operações de corte e replantação de árvores após os incêndios. O grau de contaminação (em termos de intensidade e duração) depende da severidade dos impactos na vegetação e no solo (Vieira *et al.*, 2015). A severidade do incêndio é ilustrada na

Figura 3; um incêndio mais severo pode levar a uma produção superior de cinza, ou de cinzas com propriedades diferentes (**Caixa 2**); mas também à maior potenciação da escorrência e erosão.

A carga de cinzas e de sedimentos finos erodidos para as massas de água pode causar vários problemas na sua qualidade, em especial em zonas montanhosas de declive elevado e, portanto, propensas à erosão do solo. Estes problemas incluem:



Figura 3 - Ilustração de uma queima com um grau de severidade moderada (acima) e extrema (abaixo) no incêndio rural de Valongo em 2020 (© Oscar González-Pelayo).

i) Aumento da turbidez da água e dos sólidos suspensos. Além dos impactos diretos na qualidade da água, uma concentração elevada de sedimentos finos na água pode limitar a eficácia ou até mesmo impedir o funcionamento adequado de sistemas de tratamento de água para distribuição.

ii) Aumento da concentração de matéria orgânica, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos ou metais pesados. Estes elementos têm efeitos potencialmente tóxicos sobre os organismos e ecossistemas aquáticos e, em última análise, a saúde humana (Mansilha *et al.*, 2014).

iii) Aumento da concentração de nutrientes como o azoto e o fósforo. Além dos impactos diretos, estes elementos têm ainda potenciais impactos indiretos na qualidade da água ao potenciarem a sua deterioração posterior como consequência de eutrofização.

Num estudo recente, verificou-se a ocorrência de episódios de contaminação da qualidade da água em albufeiras de Portugal continental, com base na análise histórica de incêndios rurais ocorridos entre 2000 e 2022 e dados de qualidade da água a jusante (Nitzsche, 2022). Durante este estudo, foram analisados 119 incêndios a montante de 66 albufeiras espalhadas pelo país, bem como oito parâmetros de qualidade da água, incluindo sólidos suspensos, oxigénio dissolvido e nitratos. Verificou-se que, neste período, 30 a 40% dos incêndios levaram à alteração significativa de pelo menos um dos oito parâmetros de qualidade da água, em especial de sólidos suspensos, nitratos e fósforo total (**Figura 4**). Uma maior probabilidade de ocorrência de uma alteração significativa da qualidade da água foi associada à fração da bacia hidrográfica afetada pelo incêndio, bem como ao volume armazenado na albufeira durante o ano hidrológico após a ocorrência desse mesmo incêndio, possivelmente devido a uma maior capacidade de diluição. Foi identificado um limiar de cerca de 10% da área da bacia hidrográfica ardida para uma possível ocorrência de alterações significativas na qualidade da água, um valor compatível com estudos realizados fora de Portugal (Murphy *et al.*, 2023).

É mais difícil realizar este tipo de análise sistemática para rios; apesar de existirem vários casos de estudo na literatura mostrando um

ainda não existe uma visão global dos impactos com a mesma profundidade de análise feita para albufeiras.

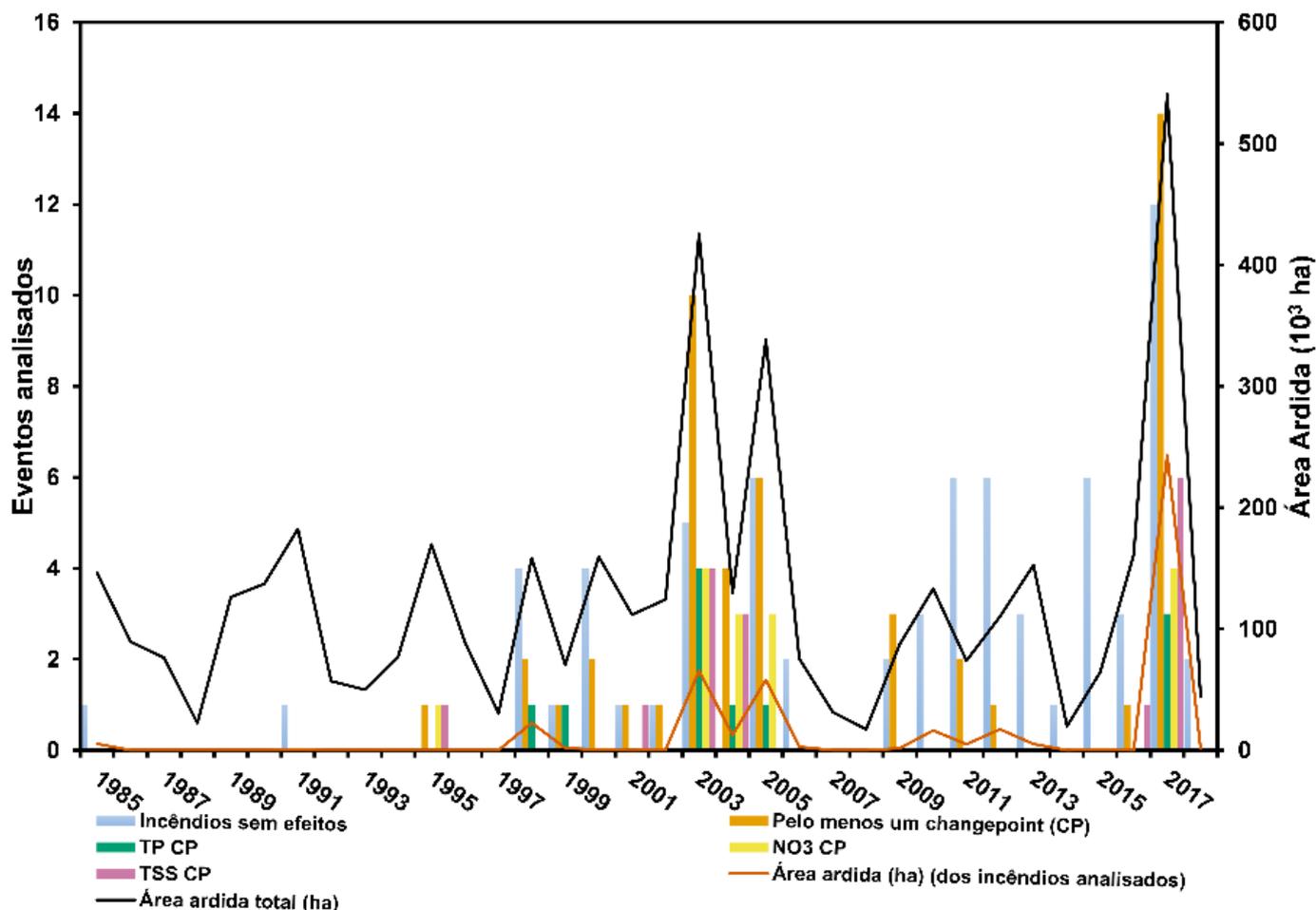


Figura 4 - Distribuição temporal dos incêndios rurais e dos eventos com alterações verificadas em alguns parâmetros da qualidade da água. É também mostrado a área ardida total em Portugal continental (linha preta) e a área ardida total dos incêndios analisados (linha laranja). Adaptado de: Nitzsche (2022).

aumento da concentração de sedimentos, nutrientes e metais pesados, a frequência da recolha sistemática de dados de qualidade da água em Portugal não é suficiente para detetar eventuais alterações, em especial de sólidos suspensos (indicadores da presença de cinzas), que podem ocorrer em picos de curta duração. Este problema é ainda mais premente para as águas subterrâneas, onde apenas existem estudos limitados sobre a ocorrência de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos após incêndios no centro de Portugal. Os impactos dos incêndios em rios são atestados por diversos episódios de limitação à captação de água relatados nos meios de comunicação social após os incêndios de 2017, por exemplo, em captações nos rios Alge e Ceira; mas

A temática da relação entre incêndios rurais e qualidade da água tem despertado uma atenção crescente da comunidade científica e técnica, como apontado por Robinne *et al.* (2021). Dessa forma, existe bastante informação científica publicada sobre os processos que levam à contaminação da água após os incêndios. A **Tabela 2** apresenta bibliografia-chave para esta temática que inclui uma revisão da literatura científica e um resumo do estado atual do conhecimento. Este conhecimento permite, agora, elaborar recomendações técnicas com base científica. Um exemplo é o guia recentemente publicado para a Indústria da Água da Austrália por Canning & Ryan (2020), que se apoia na informação científica acumulada para fundamentar

recomendações que possam ser implementadas pelos gestores da água no terreno.

A implementação de medidas para redução de riscos é necessária, uma vez que a recuperação da vegetação e dos solos nas áreas ardidadas (e, conseqüentemente, a reposição da qualidade da água antes do incêndio) pode levar vários anos, o que pode gerar uma “janela de perturbação” no tempo. A **Figura 5** ilustra uma destas situações

nos meses da primeira estação húmida após um incêndio rural.

No entanto, as cinzas e sedimentos mobilizados podem depositar-se no fundo das linhas de água, lagos e albufeiras, causando uma camada de sedimentos contaminados. Estes processos podem ser particularmente importantes em bacias hidrográficas de maior dimensão, que podem armazenar maiores quantidades de cinzas

Tabela 2 - Bibliografia-chave sobre processos de contaminação da qualidade da água após incêndios rurais.

Referência	Tópico
Bodí <i>et al.</i> (2014) Sánchez-García <i>et al.</i> (2023) Shakesby (2011)	Produção e composição de cinzas após incêndios rurais. Processos hidrológicos e erosivos em áreas ardidadas na região Mediterrânica.
Smith <i>et al.</i> (2011) Paul <i>et al.</i> (2022)	Processos de contaminação da qualidade da água após incêndios rurais.
Verkaik <i>et al.</i> (2013)	Impactos dos incêndios rurais nos ecossistemas aquáticos mediterrânicos.
Nunes <i>et al.</i> (2018)	Avaliação e mitigação do risco dos incêndios rurais para os sistemas de abastecimento de água.
Wibbenmeyer <i>et al.</i> (2023)	Impactos económicos da contaminação da qualidade da água após incêndios rurais.

após um incêndio rural na Região Centro de Portugal, seguida pelo corte das árvores ardidadas e preparação do terreno para a reflorestação. Por outro lado, a mobilização de sedimentos (indicando a mobilização de cinzas) é significativamente superior nos primeiros meses após os incêndios. De acordo com Vieira *et al.* (2015), existe uma forte redução da mobilização após os primeiros seis meses após um incêndio, e é difícil notar diferenças entre áreas ardidadas e não ardidadas ao fim de três anos. Isso se deve, não somente à recuperação do coberto vegetal do solo, mas também à exaustão das cinzas e dos sedimentos finos que podem ser mobilizados pela água. Desta forma, os impactos dos incêndios na qualidade da água são frequentemente descritos na literatura como episódios de contaminação aguda, com duração curta e, em Portugal, geralmente, concentrados

e sedimentos nas zonas de deposição. Eventos chuvosos posteriores podem levar à ressuspensão destes sedimentos; Nunes *et al.* (2018) relata vários casos em que, devido a esses processos, os impactos dos incêndios tornaram-se a crónicos, durando vários anos após o incêndio. Esta situação é ilustrada na **Figura 6**, que apresenta a evolução da qualidade da água na albufeira da Bravura (Algarve), após um incêndio na Serra de Monchique em 2003. Nesta área os principais impactos verificaram-se após a recuperação do coberto vegetal, até cinco anos após a ocorrência, provavelmente devido à ressuspensão de sedimentos depositados nas linhas de água a montante.

1.3. Avaliação e mitigação de risco

As várias estratégias para avaliação e as várias oportunidades para mitigação dos riscos de contaminação da qualidade da água após incêndios rurais encontram-se esquematizadas na **Figura 7**. A análise de risco começa por identificar os contaminantes mais preocupantes gerados devido à ocorrência de incêndios. De acordo com a proposta apresentada neste guia, para esta

análise da mobilização e transporte de cinzas: por um determinado incêndio rural (secção 3.1 a 3.5) e, de uma forma probabilística, para o longo prazo, tendo em conta o historial de incêndios rurais na bacia hidrográfica onde se localiza a captação (secção 2.1 a 2.3). Este guia fornece informação sobre abordagens de avaliar o risco de contaminação para uma determinada captação em ambos os aspetos, acompanhada de fontes de informação úteis para o aprofundamento da



Figura 5 - Recuperação da vegetação após um incêndio rural, e posterior mobilização do solo para reforestação, na Serra do Caramulo, imediatamente após um incêndio ocorrido em agosto de 2011; e 8, 18 e 21 meses após o mesmo incêndio (© João Pedro Nunes e Léonard Bernard-Jannin)

primeira análise, é suficiente assumir que as cinzas resultantes dos incêndios como a fonte de contaminação mais preocupante, uma vez que a maioria dos contaminantes são mobilizados e transportados com a cinza. No entanto, em alguns casos, pode ser necessária uma avaliação de risco com base num contaminante particularmente preocupante para a captação em causa, tendo em vista os impactos descritos nos subcapítulos anteriores. Desta forma, este guia foca-se na

aplicação destas abordagens.

Quanto à mitigação de risco, esta pode ser realizada antes do incêndio rural, através de estratégias de gestão florestal para minimizar o risco de incêndio, limitando as ignições ou o alastramento do incêndio (secção 2.5); ou após o incêndio, através de intervenções de estabilização de emergência nas áreas ardidas para mitigar o risco de mobilização de cinzas, ou de intervenções no tratamento de água captada para distribuição

(secção 3.4). Este guia não se foca na estratégia de combate aos incêndios rurais, que consiste na proteção especial de massas de água (e respetivas bacias hidrográficas) mais relevantes para o abastecimento. A mitigação do risco de contaminação requer uma gestão integrada dos recursos hídricos e das bacias hidrográficas associadas; contudo, os gestores de água geralmente têm maior responsabilidade e

responsáveis por implementar estas estratégias com as quais os gestores se podem coordenar para verificar as medidas implementadas nas bacias hidrográficas associadas às suas captações de água.

1.4. Bibliografia

Alexander, M. E., & Lanoville, R. A. (1989). *Predicting Fire Behavior in the Black Spruce-Lichen Woodland Fuel Type of Western and Northern Canada*. Canadian Forestry Service, Northwest Region, Edmonton, Alberta, Government of Northwest Territories, Department of Renewable Resources, Territorial Forest Fire Centre, Fort Smith, Northwest Territories. <https://tinyurl.com/ycx8fkmx>.

Anderson, H. E. (1981). *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior* (Vol. 122). US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. <https://tinyurl.com/4kc7at95>.

APA. (2017a). *Evolução das disponibilidades hídricas*. Reunião GT Seca. <https://tinyurl.com/rkap25du>.

APA. (2017b). *Medidas a implementar nas áreas áridas para garantir a proteção dos recursos hídricos: Municípios de Pedrogão Grande, Figueiró dos Vinhos, Castanheira de Pêra, Góis, Pampilhosa da Serra, Penela, Sertã*. <https://tinyurl.com/ydreydxj>.

Bodí, M. B., Martin, D. A., Balfour, V. N., Santín, C., Doerr, S. H., Pereira, P., Cerdà, A., & Mataix-Solera, J. (2014). *Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects*. *Earth-Science Reviews*, 130, 103–127. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.007>.

Bodí, M. B., Mataix-Solera, J., Doerr, S. H., & Cerdà, A. (2011). *The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content*. *Geoderma*, 160(3–4), 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.009>.

Bradstock, R. A. (2010). *A biogeographic model of fire regimes in Australia: current and future implications*. *Global Ecology and Biogeography*, 19(2), 145–158. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00512.x>.

Canning, A., & Ryan, G. (2020). *National good practice operational guidelines for bushfire management for the Australian water industry*. Water Services Association of Australia. <https://tinyurl.com/4hzuzxd8>.

Castro, C. F. de, Serra, G., Parola, J., Reis, J., Lourenço, L., & Correia, S. (2006). *Combate a incêndios*

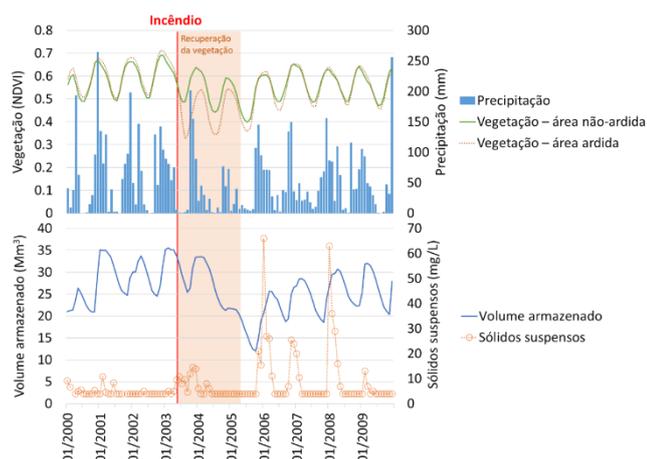


Figura 6 - Recuperação da vegetação após um incêndio rural na serra de Monchique em Julho de 2023 (acima; dados MODIS NDVI, <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>) e volume armazenado e sólidos suspensos na albufeira da Bravura (abaixo; fonte: SNIRH)

capacidade de atuação na etapa final, do tratamento da água captada. Desta forma, este guia oferece uma visão geral das abordagens e

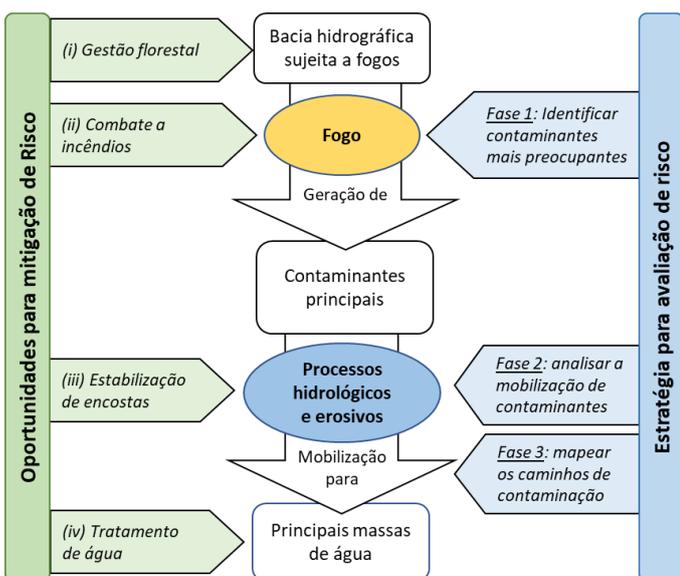


Figura 7 - Principais processos associados à contaminação da água após incêndios rurais (centro), oportunidades de mitigação de risco (esquerda) e estratégias de avaliação de risco (direita), segundo Nunes *et al.* (2018).

métodos associados à mitigação antes e depois dos incêndios rurais, além de indicar as entidades

florestais - Volume XIII (3ª). Escola Nacional de Bombeiros. <https://tinyurl.com/48fsud2j>.

Elliot, W. J., Miller, M. E., & Enstice, N. (2016). *Targeting forest management through fire and erosion modelling*. *International Journal of Wildland Fire*, 25(8), 876. <https://doi.org/10.1071/WF15007>.

ICNF. (2012). *Codificação e definição das categorias das causas*. <https://tinyurl.com/23sb7d3n>.

ICNF. (2014). *Análise das causas dos incêndios florestais: 2003 - 2013*. <https://tinyurl.com/yeyp4yte>.

ICNF. (2022). *8º Relatório provisório de incêndios rurais: 2022. 1 de Janeiro a 15 de Outubro*. <https://tinyurl.com/bdhrpass>.

ISO. (2009). *ISO Guide 73:2009(en) Risk management — Vocabulary*. <https://tinyurl.com/rket5c9n>.

Krebs, P., Pezzatti, G. B., Mazzoleni, S., Talbot, L. M., & Conedera, M. (2010). *Fire regime: History and definition of a key concept in disturbance ecology*. *Theory in Biosciences*, 129(1), 53–69. <https://doi.org/10.1007/s12064-010-0082-z>.

Mansilha, C., Carvalho, A., Guimarães, P., & Espinha Marques, J. (2014). *Water Quality Concerns Due to Forest Fires: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) Contamination of Groundwater From Mountain Areas*. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 77(14–16), 806–815. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.909301>.

MEFISTO. (2018). *European Forest Fire Fighting Multi language Glossary: Forest fire multilingual glossary portuguese version*. <https://tinyurl.com/42n7v8hw>.

Ministros, Presidência do Conselho de. (2020). *Resolução do Conselho de Ministros nº 45-A/2020, de 16 de junho*. *Diário Da República nº 115/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-06-16*, 2–145. <https://tinyurl.com/hzxzvwkt>.

Ministros, Presidência do Conselho de. (2021). *Decreto-Lei nº 82/2021, de 13 de outubro*. *Diário Da República nº 199/2021, Série I de 2021-10-13*, 2–47. <https://tinyurl.com/mr3675zd>.

Murphy, S. F., Alpers, C. N., Anderson, C. W., Banta, J. R., Blake, J. M., Carpenter, K. D., Clark, G. D., Clow, D. W., Hempel, L. A., Martin, D. A., Meador, M. R., Mendez, G. O., Mueller-Solger, A. B., Stewart, M. A., Payne, S. E., Peterman, C. L., & Ebel, B. A. (2023). *A call for strategic water-quality monitoring to advance assessment and prediction of wildfire impacts on water supplies*. *Frontiers in Water*, 5. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1144225>.

Nitzsche, N. (2022). *Evaluating and interpreting post-fire water quality changes in portuguese reservoirs* [Msc Thesis, FCUL]. <https://tinyurl.com/2u6adb68>.

Nunes, J. P., Doerr, S. H., Sheridan, G., Neris, J., Santín, C., Emelko, M. B., Silins, U., Robichaud, P. R.,

Elliot, W. J., & Keizer, J. (2018). *Assessing water contamination risk from vegetation fires: Challenges, opportunities and a framework for progress*. *Hydrological Processes*, 32(5), 687–694. <https://doi.org/10.1002/hyp.11434>.

Palheiro, P. M., Fernandes, P., & Cruz, M. G. (2006). *A fire behaviour-based fire danger classification for maritime pine stands: Comparison of two approaches*. *Forest Ecology and Management*, 234, S54. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.07>.

Parente, J., Pereira, M. G., Amraoui, M., & Tedim, F. (2018). *Negligent and intentional fires in Portugal: Spatial distribution characterization*. *Science of The Total Environment*, 624, 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.013>.

Paul, M. J., LeDuc, S. D., Lassiter, M. G., Moorhead, L. C., Noyes, P. D., & Leibowitz, S. G. (2022). *Wildfire Induces Changes in Receiving Waters: A Review With Considerations for Water Quality Management*. *Water Resources Research*, 58(9). <https://doi.org/10.1029/2021WR030699>.

Pereira, J. M. C., Silva, P. C., Melo, I., Oom, D., Baldassarre, G., & Pereira, M. G. (2022). *Cartografia de Regimes de Fogo à Escala da Freguesia (1980-2017)*. *ForestWISE (Coord.) - Projetos AGIF 2021 (P32100231)*. <https://tinyurl.com/44ykrxrn>.

Pereira, P., Úbeda, X., & Martin, D. A. (2012). *Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements*. *Geoderma*, 191, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.005>.

Robinne, F., Hallema, D. W., Bladon, K. D., Flannigan, M. D., Boisramé, G., Bréthaut, C. M., Doerr, S. H., Di Baldassarre, G., Gallagher, L. A., Hohner, A. K., Khan, S. J., Kinoshita, A. M., Mordecai, R., Nunes, J. P., Nyman, P., Santín, C., Sheridan, G., Stoof, C. R., Thompson, M. P., ... Wei, Y. (2021). *Scientists' warning on extreme wildfire risks to water supply*. *Hydrological Processes*, 35(5). <https://doi.org/10.1002/hyp.14086>.

Sánchez-García, C., Santín, C., Neris, J., Sigmund, G., Otero, X. L., Manley, J., González-Rodríguez, G., Belcher, C. M., Cerdà, A., Marcotte, A. L., Murphy, S. F., Rhoades, C. C., Sheridan, G., Strydom, T., Robichaud, P. R., & Doerr, S. H. (2023). *Chemical characteristics of wildfire ash across the globe and their environmental and socio-economic implications*. *Environment International*, 178, 108065. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108065>.

Shakesby, R. A. (2011). *Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions*. *Earth-Science Reviews*, 105(3–4), 71–100. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>.

Smith, H. G., Sheridan, G. J., Lane, P. N. J., Nyman, P., & Haydon, S. (2011). *Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply*. *Journal of Hydrology*,

396(1–2), 170–192.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.043>.

Stacey, R., Gibson, S., & Hedley, P. (2012). *European glossary for wildfires and forest fires. European Union: INTERREG IVC*. <https://tinyurl.com/y5bz5w7z>.

Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., Bouillon, C., Coughlan, M., Delogu, G., Fernandes, P., Ferreira, C., McCaffrey, S., McGee, T., Parente, J., Paton, D., Pereira, M., Ribeiro, L., Viegas, D., & Xanthopoulos, G. (2018). *Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts*. *Fire*, 1(1), 9. <https://doi.org/10.3390/fire1010009>.

Tsakiris, G. (2009). *A Paradigm for Applying Risk and Hazard Concepts in Proactive Planning*. In A. Iglesias, A. Cancelliere, D. A. Wilhite, L. Garrote, & F. Cubillo (Eds.), *Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems: Drought management and*

policy development in the Mediterranean (pp. 81–91). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9045-5_7.

Verkaik, I., Rieradevall, M., Cooper, S. D., Melack, J. M., Dudley, T. L., & Prat, N. (2013). *Fire as a disturbance in mediterranean climate streams*. *Hydrobiologia*, 719(1), 353–382. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1463-3>.

Vieira, D. C. S., Fernández, C., Vega, J. A., & Keizer, J. J. (2015). *Does soil burn severity affect the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation data*. In *Journal of Hydrology* (Vol. 523, pp. 452–464). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.071>.

Wibbenmeyer, M., Sloggy, M. R., & Sánchez, J. J. (2023). *Economic Analysis of Wildfire Impacts to Water Quality: A Review*. *Journal of Forestry*, 121(4), 374–382. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvad012>.

Capítulo 2

Prevenção de incêndio rural

Joana Parente, Luís F. Dias, João P. Nunes, Ana Sá, Akli Benali

Crédito: © Malachi Brooks via Unsplash

De modo geral, a prevenção engloba as atividades de avaliação do perigo e risco, elaboração de planos de resposta e implementação de ações de mitigação. Por outras palavras, a prevenção é a execução de atividades que reduzam a exposição e a vulnerabilidade ao incêndio rural, para que este não cause efeitos irreversíveis, ou mesmo para que os elementos em risco reduzam ou anulem a sua exposição. As atividades da prevenção podem ser definidas em quatro grandes processos:

- i) Gestão de território rural: ações que tornam o território apto para o combate aos incêndios;
- ii) Proteção do território edificado: criação e manutenção de boas práticas de defesa do edificado e aglomerações populacionais;
- iii) Verificação das condições de segurança: verificação no terreno do estado de conservação e funcionamento de estruturas e equipamentos de proteção e supressão, bem como das infraestruturas de abrigo e refúgio e as redes de defesa;
- iv) Fiscalização do cumprimento das medidas de prevenção e sinalização central das situações de incumprimento com a georreferenciação necessária.

Como tal, a prevenção deve ser realizada antes de qualquer ameaça de um dado evento e deve fazer parte das atividades de gestão do mesmo. Para dar início às atividades de prevenção, deve ter-se em conta os vários conceitos atualmente usados em Portugal descritos de forma sucinta na **Caixa 1**. Em seguida, é necessário compreender as diversas variáveis que compõem o risco, nomeadamente a perigosidade estrutural (secção 2.1), e a perigosidade conjuntural (secção 2.2). A definição destas duas componentes permitiu a elaboração e a avaliação de um índice de risco estrutural de contaminação dos recursos hídricos (secção 2.3). Para o cálculo e mapeamento destes índices é necessário ter a informação histórica das áreas ardidadas, conforme descrito na secção 2.4. Por fim, é possível, agora, estabelecer com precisão medidas de mitigação pelas entidades competentes, que estão descritas de uma forma sucinta na secção 2.5.

2.1. Risco e perigosidade estrutural de incêndio rural

Em Portugal, a cartografia de risco de incêndio rural está disponível como carta de perigosidade de incêndio rural (entenda-se

perigosidade estrutural). Esta cartografia identifica os territórios onde os incêndios são mais prováveis e podem se tornar mais severos, orientando as ações de redução da carga combustível e o condicionamento ao aumento do valor dos territórios onde a sua exposição implique perdas com elevada probabilidade, sendo avaliada a nível nacional. A perigosidade estrutural é apresentada com cinco classes de risco, designadamente: *muito baixa, baixa, média, alta e muito alta*.

De acordo com o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR), é de responsabilidade do ICNF a definição da metodologia, elaboração e divulgação da cartografia de perigosidade de incêndio rural, em articulação com a Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais (AGIF), a Direção-Geral do Território (DGT) e a Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC). Esta nova cartografia é disponibilizada para cada decénio pelo ICNF, submetida para publicação no Diário da República e, obrigatoriamente, integrada na planta de condicionantes dos planos territoriais. A metodologia em vigor para a elaboração da carta de perigosidade de incêndio rural encontra-se disponibilizada no portal do ICNF. É ainda de a responsabilidade do ICNF coordenar e divulgar anualmente a cartografia nacional das áreas ardidas. O levantamento cartográfico das áreas ardidas é realizado para áreas iguais ou superiores a 0.5 hectares, sendo da responsabilidade dos municípios, em conjunto com a Guarda Nacional Republicana (GNR), o levantamento para áreas inferiores a 10 hectares. Além disso, cabe aos municípios, sob a coordenação do ICNF e em conjunto com a GNR, efetuar o levantamento cartográfico das áreas ardidas resultantes do recurso a fogo de gestão de combustível, de fogo controlado e de queimadas. A obtenção de outros elementos relevantes para a elaboração da carta

de perigosidade de incêndio rural, nomeadamente, a sistematização da informação e elaboração de produtos cartográficos de base e temáticos como a carta de ocupação do solo e a carta do regime de uso do solo, são da responsabilidade da DGT.

Finalmente, é importante salientar que o Decreto-lei n.º 49/2022, de 19 de julho, determina que, cabe às comissões sub-regionais sediadas nas Comunidades Intermunicipais (CIM) definir nos correspondentes territórios as áreas prioritárias de prevenção e segurança (APPS). Isto significa, que serão estas comissões a definir nos seus territórios quais as limitações que deverão existir nos dias mais críticos de risco de incêndio rural, nas áreas demarcadas com perigosidade alta e muito alta na carta de perigosidade de incêndio rural, sem colocar em causa o desenvolvimento e fruição do seu território. Por este motivo, o mesmo decreto suspende a atual metodologia que permite a elaboração atual da Carta de Perigosidade de Incêndio Rural em Portugal. Deve ser salientado, que se encontra em andamento um grupo de trabalho que visa a criação de uma metodologia que adapte a metodologia suspensa à realidade de cada território.

2.2. Risco conjuntural de incêndio rural

Para além das características estruturais da paisagem, existem fatores conjunturais que influenciam o perigo de incêndio rural, dentro dos quais se destacam: (i) as ignições, que podem ter causas diversas, mas maioritariamente antropogénicas, e, (ii) as condições meteorológicas, que variam ao longo dos dias e ao longo de cada dia. Estes fatores conjunturais influenciam a probabilidade de ocorrência de um incêndio, a disponibilidade dos combustíveis para arder, o comportamento do incêndio e os seus impactos.

Para ter em conta as variações conjunturais no perigo de incêndio, causadas pelas dinâmicas meteorológicas, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) calcula diariamente o Risco Conjuntural e Meteorológico (RCM) através da combinação de dois parâmetros e mediante uma matriz de ponderação:

i) a “**perigosidade de incêndio rural**”, apresenta responsabilidade do ICNF, havendo atualmente dois níveis de perigosidade, nomeadamente anual e decadal. Estes dois níveis são descritos no subcapítulo 2.1. É importante salientar que a perigosidade conjuntural anual é classificada de acordo com seis classes distintas, que variam de perigosidade nula a perigosidade máxima.

ii) o “**índice meteorológico de perigo de incêndio florestal**”, calculado diariamente pelo IPMA, e conhecido como FWI (*Fire Weather Index*). O FWI foi desenvolvido no Canadá por Van Wagner (1987) e integra várias variáveis meteorológicas relevantes para a ocorrência e comportamento dos incêndios (por exemplo, a temperatura e humidade relativa do ar e a intensidade do vento).

O RCM pode ser consultado diariamente no portal do IPMA ou, em alternativa, em <http://multisites.ipma.pt/anpc/risco-por-concelho/>. Este último permite a visualização da previsão do RCM até sete dias, agregada por unidade administrativa, nomeadamente por municípios ou por sub-regiões, de acordo com as NUTS III, estação meteorológica ou em malha. A **Figura 8** apresenta um exemplo de previsão do RCM e do Perigo de Incêndio Rural para o dia 2 de junho de 2023 e para o dia 1 de agosto de 2023, respetivamente, agregados por concelho.

É preciso ter em conta que o RCM tem diversas limitações associadas aos dois parâmetros que o compõem, aos dados utilizados e ao fato de não conter informações sobre a probabilidade de ignição. Ainda assim, é um índice útil para que os gestores possam identificar o perigo de incêndio rural expectável para os dias seguintes nas bacias hidrográficas associadas às captações de água.

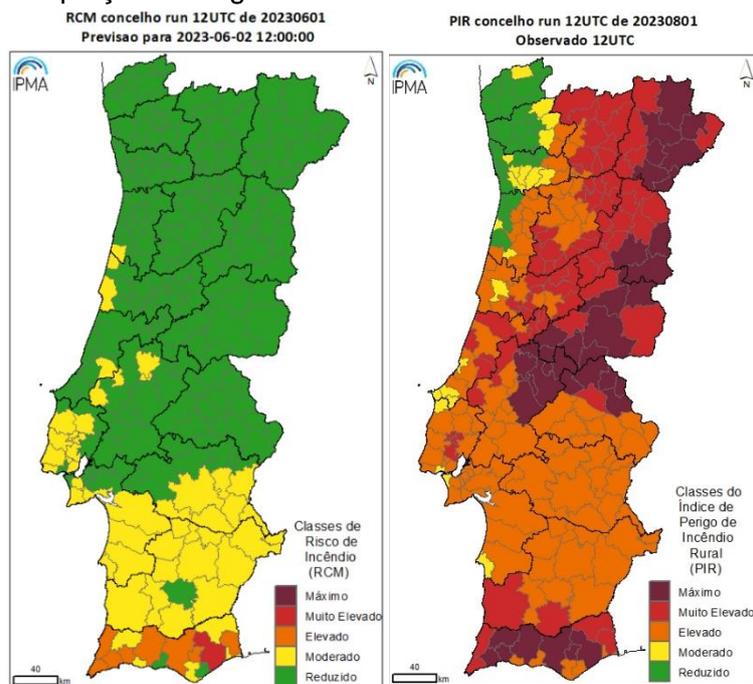


Figura 8 - Previsão do RCM para o dia 2 de junho de 2023 agregado por concelho (esquerda). Perigo de Incêndio Rural para o dia 1 de agosto de 2023 agregado por concelho (direita). (fonte: IPMA)

2.3. Índice de risco estrutural de contaminação dos recursos hídricos por incêndios rurais

A avaliação do risco estrutural de contaminação de um determinado recurso hídrico por incêndios rurais é baseada em três parâmetros:

- i) o **perigo de eventos de contaminação**, ou seja, a magnitude que um evento de contaminação pode ter se este ocorrer, em termos de volume de água captada e população servida.
- ii) **a sua exposição aos incêndios**, ou seja, a frequência e a extensão de áreas aridas na bacia hidrográfica associada ao recurso hídrico;

iii) **a sua vulnerabilidade a eventos de contaminação**, como, por exemplo, a existência de fontes alternativas de abastecimento.

O índice de risco estrutural de contaminação dos recursos hídricos por incêndios rurais (**Figura 9a**) apresentado neste guia foi elaborado para 60 albufeiras portuguesas de características distintas e com base nos parâmetros perigo e exposição. O parâmetro exposição à contaminação é baseado na quantidade de água captada anualmente a partir do recurso hídrico em causa. Em outras palavras, representa o grau em que o abastecimento público de água está dependente deste recurso, e, consequentemente, o potencial impacto se ocorresse um incêndio que contaminasse a sua qualidade. O parâmetro perigo de eventos de contaminação é baseado na probabilidade anual de ocorrência de incêndios de diferentes tamanhos numa bacia hidrográfica e na relação entre esta probabilidade e a contaminação de um recurso hídrico. Por outras palavras, este parâmetro reflete a frequência com que as áreas das bacias hidrográficas arderam entre 1990 e 2020, e a probabilidade de contaminação da água associada a esses incêndios. O tamanho da área e a conexão com a massa de água estão relacionados com a mobilização e transporte de contaminantes indicados no subcapítulo 1.2. Os parâmetros descritos anteriormente podem ser calculados a partir da cartografia da bacia hidrográfica do recurso hídrico em causa, da informação sobre a captação de água associada (disponibilizada pela Agência Portuguesa do Ambiente, APA, nos planos de gestão de região hidrográfica); e da cartografia histórica de áreas ardidas disponibilizada pelo ICNF.

O mapa nacional do índice de risco de contaminação mostra diferenças significativas ao longo de Portugal continental, que estão relacionadas com as diferenças que existem no

regime de incêndios a nível regional. Desta forma, o índice pode ser analisado em conjunto com a carta de perigosidade de incêndio rural, descrita no subcapítulo 2.1, uma vez que um maior risco de contaminação está associado a um maior risco de incêndio.

A informação apresentada na **Figura 9a**, pode ser complementada com a cartografia apresentada na **Figura 9b**. Esta cartografia revela que existem diversos tipos de albufeiras em Portugal continental, tendo em conta os parâmetros exposição e perigo descritos anteriormente. É possível, por exemplo, classificar albufeiras com baixa perigosidade e elevada exposição, encontrando-se estas localizadas na sua maioria na região do Algarve. É importante salientar que estas albufeiras estão localizadas em áreas associadas a um risco entre o médio e elevado de incêndio e que a região depende bastante delas como fonte de abastecimento de água. As albufeiras classificadas com baixa exposição e baixa perigosidade estão localizadas na região Norte, onde se verifica baixo-médio risco de contaminação e baixa dependência. Na região centro, localizam-se as albufeiras classificadas com grande perigosidade e baixa exposição. Estas albufeiras estão localizadas em áreas de elevado e muito elevado risco de incêndio, mas não são utilizadas para abastecimento de água, ou são apenas usadas para tal fim marginalmente. Por fim, no Alentejo, são predominantes albufeiras classificadas com nenhuma exposição ou perigosidade. É importante salientar que estas albufeiras são predominantemente utilizadas para a agricultura, e encontram-se em áreas de baixo risco de incêndio.

Na análise da cartografia entre a perigosidade de incêndio rural (subcapítulo 2.1) e o índice de risco estrutural de contaminação, verifica-se que as zonas de maior risco coincidem nos dois

mapas, isto é, as albufeiras com maior risco localizam-se nas regiões Centro e Algarve. A cartografia deste tipo de risco estrutural pode ser útil para identificar o grau e tipo de risco associado a uma determinada captação de água a nível superficial. Esta análise servirá como base para determinar quais as medidas de mitigação necessárias e adequadas para cada caso.

2.4. Mapeamento de áreas ardidadas após um incêndio rural

Os incêndios rurais resultam em áreas ardidadas que podem ser mapeadas de diversas maneiras. Atualmente a forma mais expedita e

A severidade pode ser avaliada com trabalho de campo e imagens de satélite, para, posteriormente, ser obtida através do cálculo de índices. O índice mais comum é o “*delta normalized burn ratio*” (dNBR, Key & Benson, 2006), que reflete o grau absoluto de alteração no solo e vegetação causado por um incêndio. O RdNBR é a versão relativizada do dNBR (Miller & Thode, 2007), que reflete o grau relativo de alteração causado por um incêndio, tendo em consideração a quantidade de vegetação existente antes do incêndio. Ambos os índices (e outros similares) podem ser calculados de forma expedita durante a época de incêndios utilizando, por exemplo,

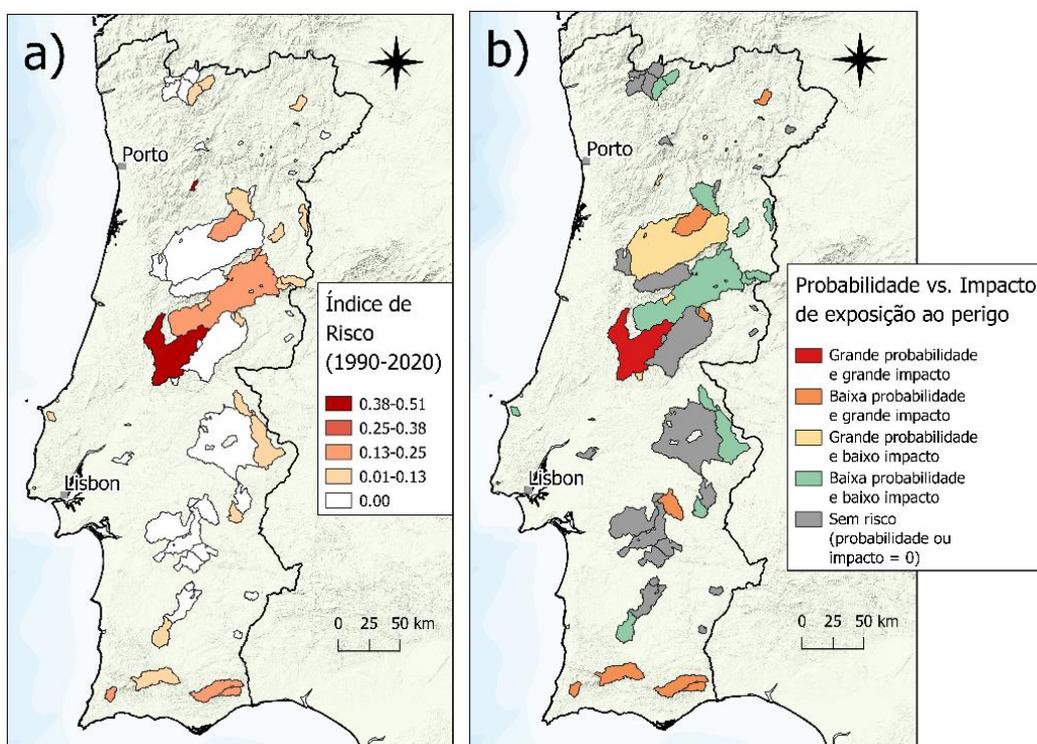


Figura 9 - a) Índice de risco estrutural de contaminação para Portugal continental com base no risco de contaminação e na exposição das pessoas no período 1990-2020, onde 1 significa elevado risco. b) Probabilidade de exposição ao perigo de contaminação da água.

fiável de o fazer é através da utilização de imagens de satélite. Em Portugal, a responsabilidade do mapeamento é do ICNF que utiliza imagens do satélite Sentinel-2 (com elevada resolução) para mapear áreas ardidadas ao longo do ano. Os mapas estão disponíveis ao público no final do ano e podem ser visualizados e descarregados em <https://geocatalogo.icnf.pt/websig/>.

imagens dos satélites Sentinel-2 e/ou Landsat 8/9 no *Sentinel Hub EO Browser*.

A **Figura 10** apresenta a severidade calculada com o dNBR (esquerda) e o RdNBR (direita) para dois incêndios ocorridos em 2020: Aljezur – Bordeira (cima) e Proença-a-Nova – Conqueiros (baixo). Os incêndios tiveram extensões de áreas ardidadas muito diferentes, o de Aljezur atingiu uma área de aproximadamente

2,300 hectares em junho e o de Proença-a-Nova atingiu cerca de 15,000 hectares em setembro. É perceptível a diferença na severidade causada por ambos os incêndios em questão, resultado do seu comportamento (maior intensidade no incêndio de Proença-a-Nova) e da humidade do solo e dos combustíveis (incêndios no início e no final do

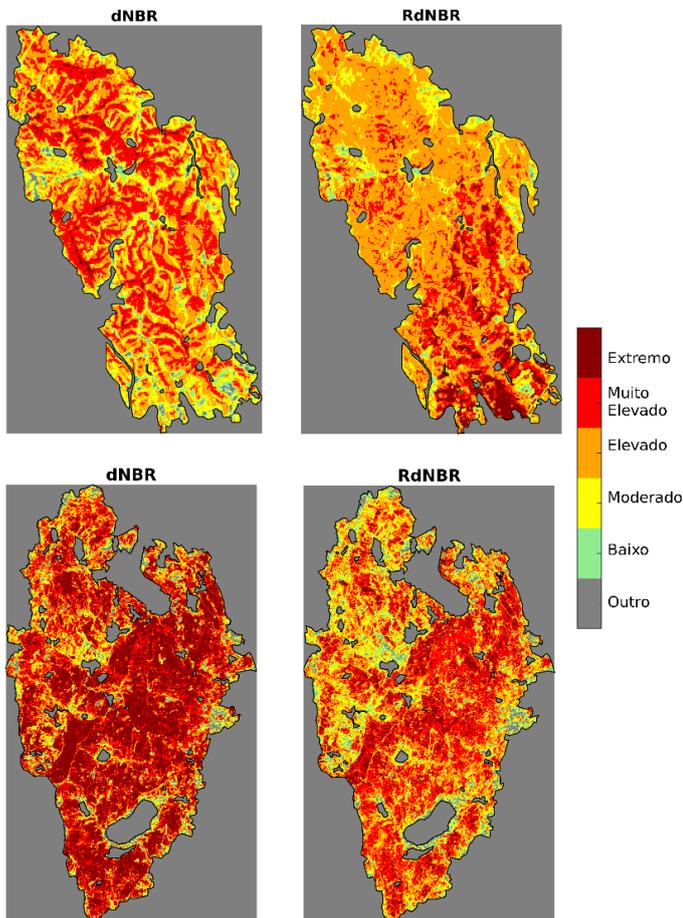


Figura 10 - Severidade calculada com imagens Sentinel-2 para dois incêndios rurais: Aljezur – Bordeira (cima) e Proença-a-Nova – Conqueiros (baixo), utilizando dois índices de severidade do fogo: o dNBR (esquerda) e o RdNBR (direita).

Verão). Além disso, é notório a diferença da severidade estimada pelos índices, especialmente no incêndio de Aljezur. Por exemplo, na zona mais a sul caracterizada por ter menos vegetação e sobretudo herbácea, a alteração absoluta foi relativamente baixa. No entanto, em termos relativos o RdNBR sugere que o grau de destruição foi elevado. Por outras palavras, havia pouca vegetação, mas, provavelmente, grande parte dela foi consumida pelo incêndio (elevada severidade).

É importante referir que, apesar de serem extremamente úteis na identificação das áreas com

maior grau de destruição resultante de um incêndio, os índices identificados acima apresentam limitações, sobretudo associadas às capacidades dos satélites em adquirir informação: (i) no subcoberto de povoamentos densos cuja copa não tenha sido afetada (por exemplo, incêndios tipicamente de baixa intensidade que consomem apenas vegetação por baixo das copas) e (ii) nas camadas superficiais do solo.

Em Portugal, não existe a obrigação de elaborar mapas de severidade do fogo. Estes podem ser visualizados no *European Forest Fire Information System* (EFFIS) atualizado semanalmente. No futuro próximo, está planeada a disponibilização semanal de mapas de severidade do fogo nos seguintes websites: <https://severus.pt/> e <https://pccir.isa.ulisboa.pt/>.

2.5. Mitigação à exposição e ao perigo de incêndios rurais de elevada intensidade

Tem sido muito discutido o atual abandono do território rural, resultante de transformações socioeconómicas ocorridas na década de 60, que levaram à diminuição das práticas de uso do solo tradicionais, como a agricultura e a pastorícia. A grande continuidade do território florestal e acumulação de biomassa devida à falta de gestão ativa e ao abandono rural exigem medidas de prevenção estruturais que diminuam a intensidade e a velocidade de propagação dos incêndios. Sendo a falta generalizada de gestão florestal ativa no território por parte do proprietário florestal não industrial uma realidade bem presente, se realizada em larga escala e de uma forma planeada poderá reduzir o balanço custo-eficácia por cada hectare tratado, e de modo geral, o perigo da paisagem aos grandes incêndios rurais (Benali *et al.*, 2021).

Medidas para quebrar a homogeneidade da vegetação na paisagem, como intercalar diferentes ocupações (em que a agricultura tem um papel relevante) e reduzir a carga e a continuidade dos combustíveis (faixas de gestão de combustível, tratamentos em mosaicos, gestão florestal e ações de fogo controlado), promovem a proteção e a diminuição do perigo da paisagem a incêndios de grande dimensão e severidade elevada, a sustentabilidade florestal e a criação de paisagens mais valorizadas e resilientes aos incêndios.

Desta forma, e como mencionado no subcapítulo 1.3, existem oportunidades de mitigação dos impactos dos incêndios na qualidade da água antes de acontecerem, através da redução do perigo de incêndio de elevada intensidade na bacia hidrográfica a montante de um ponto de captação de água. A prevenção, é, portanto, uma medida preponderante para que os incêndios permaneçam dentro dos limites da capacidade de supressão, de forma a diminuir a sua intensidade e mitigar os respetivos impactos. Existem várias medidas enquadradas no Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais (PNGIFR), que no âmbito da gestão do território integram a gestão de combustíveis, as redes de defesa, o desenho de novas paisagens e a implementação de práticas de valorização.

Espacialmente, existem duas estratégias com objetivos distintos usadas na gestão de combustíveis (Observatório Técnico Independente *et al.*, 2019): 1) estruturas lineares ou faixas de gestão de combustível (FGC), com a variante de faixas de interrupção de combustível (FIC) com vegetação de baixa combustibilidade, e 2) manchas ou mosaicos de redução de combustível. Em qualquer uma das hipóteses, é possível remover na completamente ou parcialmente os combustíveis, ou até mesmo substituir a ocupação. No caso das FGC, o principal objetivo é isolar ou

compartimentar o território rural, ou a interface urbano-rural, de modo a proteger/defender as estruturas e infraestruturas, facilitar acessos e o posicionar as forças de combate. As FGC traduzem-se nas redes primárias (levada a cabo pelo ICNF), secundárias e terciárias (que são de responsabilidade dos municípios e executadas por entidades públicas e privadas como a Redes Energéticas Nacional, E-Redes – Distribuição de Eletricidade, Infraestruturas de Portugal, indústria, e proprietários florestais) que são usadas na terminologia e regulamentação nacionais. Não é esperado que as FGC e FIC por si só contenham a propagação do incêndio (ou seja, que tenham efeito passivo), dado a frequente existência de vegetação na envolverência, e particularmente no caso de incêndios intensos com projeções que facilmente transpõem a largura das faixas. No caso da gestão em manchas ou mosaicos, pretende-se alterar o comportamento e efeito do incêndio, fomentando-se a alteração da ocupação e a redução da carga e continuidade dos combustíveis, de modo a aumentar a heterogeneidade e valorização da paisagem, e a sua resiliência aos incêndios.

A redução do combustível de superfície (manta morta, ervas, arbustos) deve ser a primeira prioridade, seguida pelo aumento da descontinuidade vertical entre a superfície e a base da copa das árvores e, finalmente, pelo aumento da descontinuidade horizontal entre copas para diminuir a probabilidade de incêndios a propagarem pelas copas. Desta forma, o tipo de silvicultura preventiva a ser aplicado deve ter em conta a desramação (para quebrar a continuidade vertical dos combustíveis, prevenindo assim a subida do fogo de superfície às copas) e a gestão da densidade dos povoamentos. Se, por um lado, o aumento do distanciamento entre copas diminui o potencial de fogo de copas, por outro lado,

aumenta a quantidade de luz que chega ao solo, o aumento da carga e secura dos combustíveis no subcoberto e o aumento da velocidade do vento à superfície. A interação entre estes fatores potencia a propagação e a intensidade do incêndio em áreas florestais de baixa densidade. Oliveira *et al.* (2023) recorreram a simulações de propagação do fogo para demonstrar que povoamentos com uma elevada densidade de folhosas têm o potencial de mitigar o risco de incêndio no interface industrial-rural, mesmo sob condições de severidade meteorológica. Se planeadas, estas espécies podem ser usadas em corredores “verdes” de modo a servirem de barreira a incêndios, por exemplo, na proteção de infraestruturas.

A participação da população nas ações de gestão de combustível é crucial para que, através da gestão florestal ativa, e/ou da mudança para ocupações adequadas, haja uma maior estruturação do território, aliada à sua valorização, proteção e mitigação dos impactos dos incêndios. Estas ações devem ser executadas de forma integrada na paisagem, suportadas pela análise de risco e pela priorização no espaço e no tempo, de modo a aumentar a eficiência na distribuição dos custos associados à gestão de combustíveis. Dependendo do local, podem existir planos de gestão devidamente articulados com o PNGIFR que consideram as respetivas especificidades ambientais e socioeconómicas.

A gestão de combustíveis pode ser realizada por meio de ferramentas manuais, mecânicas ou do uso ao fogo controlado. No caso do corte de árvores ou desrama, é comum serem usadas ferramentas comuns como a motosserra e o machado. Já para a limpeza de matos, é comum o uso de motosserra, roçadora ou quando se pretende a remoção da raiz a grade de discos. O fogo controlado surge como uma ferramenta de baixo custo, que pode ser utilizada fora da época

de incêndios e em condições meteorológicas específicas (“controladas”). Esta ferramenta permite para além da redução da carga de combustível, também a diminuição da sua continuidade espacial, permitindo que as áreas queimadas sejam usadas como locais de abrandamento do comportamento do fogo devido às descontinuidades criadas, e como oportunidades para o posicionamento das forças de combate.

O fogo controlado (Decreto-lei n.º 124/2006, de 28 de junho, descrito na legislação conjuntamente com o fogo de supressão como fogo técnico) só pode ser executado por técnicos cuja credenciação é obrigatória, com autorização, registo e formação, sob a responsabilidade do ICNF. Contudo, existe um estudo que demonstra que, historicamente, o tamanho das áreas sujeitas a fogo controlado bem como a sua extensão individual são pouco eficazes na redução da área ardida (Davim *et al.*, 2022). Este mesmo estudo refere que a prática de fogo controlado deve ser assistida com a modelação do fogo à escala da paisagem para que possa ser estrategicamente realizado, podendo ser, por exemplo, ancorado em áreas ardidas recentes e em faixas de gestão de combustíveis para aumentar a escala do seu efeito. Segundo uma comunicação do governo, em 2021 a área tratada com fogo controlado foi de 3,942 hectares, o que representa cerca de 0.1% do espaço florestal, valor este só por si bastante abaixo de alguns valores de referência dados pela comunidade científica. Há a necessidade para que a área de fogo controlado, bem como a sua localização na paisagem sejam devidamente definidas no âmbito da gestão dos incêndios.

2.6. Bibliografia

AGIF (2022). *Plano Nacional de Gestão Integrada de fogos rurais*. <https://tinyurl.com/5c9527w4>.

- Benali, A.; Sá, A.C.L.; Pinho, J.; Fernandes, P.M.; & Pereira, J.M.C. (2021). *Understanding the Impact of Different Landscape-Level Fuel Management Strategies on Wildfire Hazard in Central Portugal*. *Forests*, 12, 522. <https://doi.org/10.3390/f12050522>.
- Davim, David A., Rossa, Carlos G., Pereira, José M.C., & Fernandes, Paulo M. (2022). *Evaluating the effect of prescribed burning on the reduction of wildfire extent in Portugal*, *Forest Ecology and Management*, Volume 519, 120302, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120302>.
- ESA (2023). *Sentinel-2 Mission Guide*. <https://tinyurl.com/4npg9xv2>.
- EFFIS (2023). *Current Situation Viewer*. <https://tinyurl.com/yc28ew26>.
- ICNF (2023). *Perigosidade Estrutural*. <https://tinyurl.com/8vkubek7>.
- ICNF (2020). *Metodologia para a produção da Carta de Perigosidade de Incêndio Rural de cariz estrutural: relatório definitivo*. <https://tinyurl.com/283yvw49>.
- IPMA (2020). *Cálculo do Índice de Risco de Incêndio Rural Risco Conjuntural e Meteorológico – RCM: Versão 1.0 de 13 de Julho de 2020*. <https://tinyurl.com/yc687wwn>.
- Key, C.H.; & Benson, N.C. (2006) *Landscape Assessment (LA): Sampling and Analysis Methods. In Firemon: Fire Effects Monitoring and Inventory System; Lutes, D., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S., Gangi, L., Eds.; RMRS-GTR-164; Rocky Mountain Research Station, US Department of Agriculture, Forest Service: Fort Collins, CO, USA; pp. LA-1–LA-51*. <https://tinyurl.com/3fh2yasu>.
- Miller, J.D., & Thode, A.E. (2007). *Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)*. *Remote Sens. Environ.* 109, 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>.
- Ministros, Presidência do Conselho de. (2020). *Resolução do Conselho de Ministros nº 45-A/2020, de 16 de junho*. *Diário Da República nº 115/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-06-16, 2–145*. <https://tinyurl.com/hxzvwwkt>.
- Ministros, Presidência do Conselho de. (2021). *Decreto-Lei nº 82/2021, de 13 de outubro*. *Diário Da República nº 199/2021, Série I de 2021-10-13, 2–47*. <https://tinyurl.com/mr3675zd>.
- Observatório Técnico Independente, Castro Rego F., Fernandes P., Sande Silva J., Azevedo J., Moura J.M., Oliveira E., Cortes R., Viegas D.X., Caldeira D., e Duarte Santos F. - Coords. (2019). *Racionalizar a gestão de combustíveis: uma síntese do conhecimento atual*. Assembleia da República. Lisboa. 21 pp. <https://tinyurl.com/yc462ajk>.
- Oliveira, Aline S., Silva, Joaquim S., Guiomar, Nuno, Fernandes, Paulo, Nereu, Mauro, Gaspar, José, Lopes, Rúben F.R., Rodrigues, João Paulo C. (2023), *The effect of broadleaf forests in wildfire mitigation in the WUI – A simulation study*, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 93, 103788, ISSN 2212-4209. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103788>.
- Schuurman, J. (2023). *Mapping fire-induced water contamination risk in Portugal* [Dissertação apresentada na Universidade de Wageningen para obtenção do Grau de Mestre da ciência em gestão de informação geográfica e aplicações].
- Sinergise (2023). *Sentinel Hub EO Browser*. <https://tinyurl.com/yvk9td7j>.
- USGS (2023). *Landsat* 8. <https://tinyurl.com/ysjz3k5>.
- Van Wagner, C. E. (1987). *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35 OTTAWA. <https://tinyurl.com/yje8szy9>.



Capítulo 3

Resposta e recuperação após incêndio rural

Joana Parente, Luís F. Dias, Carlos Brito, Sérgio Prats, Niels Nitzsche, João P. Nunes

Após um incêndio rural, é necessário executar ações de resposta e, eventualmente, de recuperação que auxiliem na prevenção ou mitigação dos impactos subsequentes. Uma das ações de resposta mais urgentes é a avaliação do risco de contaminação da água, tanto imediatamente após o incêndio (subcapítulo 3.1) como a longo prazo (subcapítulo 3.4). A quantificação deste risco permitirá a identificação das áreas onde será necessária uma maior atenção na monitorização da qualidade da água (subcapítulo 3.2) e, eventualmente, a tomada de medidas de prevenção/mitigação adequadas. Entre estas medidas, figuram as medidas de estabilização de emergência, que visam minimizar os riscos de mobilização das cinzas e do solo das encostas para as linhas de água (subcapítulo 3.4). Para planear e implementar estas medidas é fundamental identificar primeiro as áreas prioritárias de intervenção, ou seja, as encostas que contribuíam mais para os riscos a jusantes (subcapítulo 3.5).

3.1. Avaliação de risco imediatamente após incêndio rural

Como apresentado no Capítulo 1, o risco de contaminação da água imediatamente após um incêndio depende em larga medida da fração da bacia hidrográfica ardida e da severidade do incêndio, indicador da quantidade de cinza que pode ser mobilizada e transportada para massa de água (fatores de risco já descritos no subcapítulo 1.2) e, no caso de albufeiras, do seu volume de água armazenado, indicador da capacidade de diluição das entradas de cinzas, sedimentos erodidos e contaminantes.

No âmbito do projeto FRISCO, foi desenvolvido um índice de risco de impacto de incêndios rurais na qualidade da água de albufeiras em Portugal continental, baseado nos dados de quantidade e qualidade da água disponíveis no SNIRH e na cartografia das áreas ardidas disponibilizada pelo ICNF (subcapítulo 2.4). A

análise destes dados encontra-se descrita detalhadamente em Nitzsche (2022).

Este índice fornece uma estimativa do potencial impacto de um incêndio na qualidade da água em um determinado ponto de captação numa albufeira. O índice é definido como a probabilidade de um aumento significativo da quantidade de sólidos suspensos na albufeira. Estas situações

mostradas na **Figura 11** e baseadas no trabalho de Nitzsche (2022). As classes do índice estão descritas na **Tabela 3**. Na sua base está a definição de intervalos de área ardida que (i) não têm impacto (risco muito baixo), (ii) têm impacto apenas quando o incêndio é seguido por um ano com um volume armazenado da albufeira mais baixo (risco baixo ou moderado) ou (iii) têm impacto

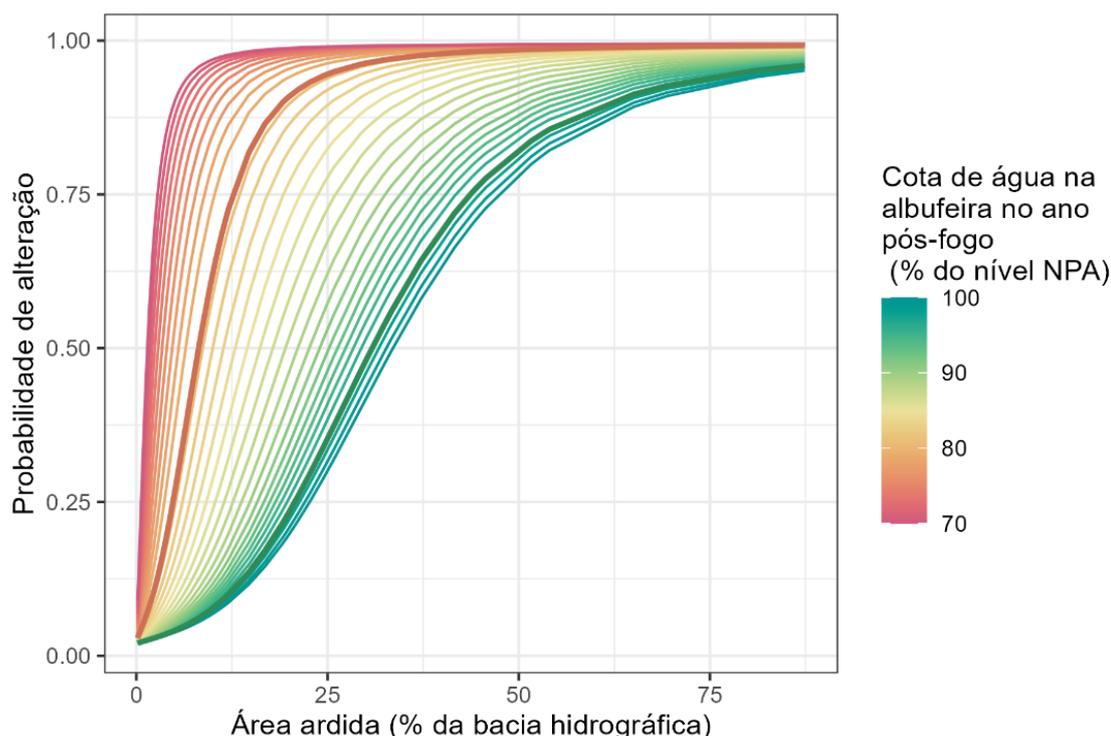


Figura 11 - Probabilidade de uma alteração significativa aos sólidos suspensos totais numa albufeira após um incêndio rural, conforme a fração da bacia hidrográfica ardida e o nível de água armazenado no ano após o incêndio, para Portugal continental (calculado com base nos dados de Nitzsche (2022)). As linhas grossas representam o nível mediano (97,2% do Nível de Pleno Armazenamento, NPA; verde) e os valores extremos de seca (80,6% NPA; vermelho) para as albufeiras estudadas e são as linhas adotadas para o cálculo do índice.

podem conduzir a valores superiores a 25 mg/L, o valor máximo recomendado para as águas doces superficiais destinadas à produção de água para consumo humano (Ambiente, 98), dependendo também do volume de água armazenado na albufeira no ano seguinte ao incêndio.

Na elaboração deste índice, consideraram-se as curvas de probabilidade acumulada de contaminação da qualidade da água (utilizando o parâmetro sólidos suspensos como indicador),

independentemente do volume armazenado da albufeira no ano seguinte (risco elevado ou muito elevado). Este índice pode ser obtido utilizando os mapas de área ardida disponibilizados pelo ICNF, conforme descrito no subcapítulo 2.4, ou consultado em <https://pccir.isa.ulisboa.pt/>.

Tabela 3 - Classes do índice de risco de contaminação da água de uma albufeira após um incêndio rural, de acordo com a área ardida (% da bacia hidrográfica).

Área ardida (% da bacia hidrográfica)	Risco de alteração na qualidade da água	Descrição
<11%	Muito baixo	Baixa probabilidade de impacto (P<66%)
11-19%	Baixo	Impacto provável (P=66-90%) caso o nível de água no ano pós-incêndio seja baixo
19-38%	Moderado	Impacto muito provável (P>90%) caso o nível de água no ano pós-incêndio seja baixo
38-62%	Elevado	Impacto provável (P=66-90%) independentemente do nível de água no ano pós- incêndio Impacto muito provável (P>90%) caso o nível de água no ano pós-incêndio seja baixo
>62%	Muito elevado	Impacto muito provável (P>90%) independentemente do nível de água no ano pós-incêndio

3.2. Monitorização da qualidade da água em áreas aridas

Em Portugal, as entidades gestoras dos recursos hídricos têm como intenção reforçar no pós-incêndio o plano de monitorização da água na origem, para avaliar eventuais alterações da sua qualidade. Este reforço compreende o aumento da frequência de monitorização e, simultaneamente, uma maior abrangência dos parâmetros a serem analisados. As metodologias de avaliação de risco referidas anteriormente, em especial a fração ardida da bacia hidrográfica associada à captação de água, devem indicar se é necessário implementar medidas adicionais de monitorização da qualidade da água.

Caso se justifique monitorização adicional, esta deve-se focar nas alterações tipicamente verificadas no pós-incêndio descritas no subcapítulo 1.2: sólidos suspensos totais e/ou turbidez, nitratos e fósforo total, que podem eventualmente ser monitorizados de forma automática. Uma vez que a concentração destes componentes tende a ser muito variável no tempo devido à sua associação com períodos chuvosos, e a ter valores mais altos durante os períodos de caudal de ponta, é importante a recolha de amostras após (e, se possível, durante) a

ocorrência de chuvadas significativas. Alguns estudos em Portugal (por exemplo, Nunes *et al.*, 2020, ou Wu *et al.*, 2021) sugerem que uma precipitação de 10 mm num dia é suficiente para se verificar um impacto. Mas é importante ter em conta que a monitorização de base (ou seja, realizada regularmente nas principais massas de água) também pode fornecer dados interessantes, como, por exemplo, para avaliar a evolução do aporte de nutrientes a uma albufeira; sugere-se uma frequência regular (semanal). Dado o potencial desfasamento entre a ocorrência do incêndio e as subseqüentes alterações na qualidade da água, esta monitorização intensificada deve-se estender pelo tempo, pelo menos durante a estação húmida após a ocorrência do incêndio. Além disso, deve-se considerar a monitorização contínua, por exemplo, com um sensor ótico de turbidez da água.

Se a monitorização revelar uma alteração significativa na qualidade da água no pós-incêndio, devem ser analisados parâmetros adicionais relacionados com os impactos de incêndios, como o carbono orgânico dissolvido, os metais ou os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, de forma a obter uma visão mais completa dos impactos. É recomendável a recolha de amostras em locais adicionais, como as linhas de água mais afetadas

pelo incêndio, a fim de compreender de uma forma mais aprofundada a extensão dos impactos. Pode ainda considerar-se um programa de monitorização mais longo no tempo, uma vez que alguns impactos dos incêndios podem continuar a ocorrer durante vários anos após a sua ocorrência (conforme ilustrado no subcapítulo 1.2). Caso se suspeite da ocorrência de problemas na qualidade da água decorrentes da ressuspensão de sedimentos acumulados no fundo de uma albufeira, a recolha de amostras dos sedimentos pode ajudar a analisar este problema, devendo-se, no entanto, ter em mente que este tipo de sedimentos é mais complexo do ponto de vista logístico, e pode requerer o apoio de equipas especializadas.

A **Tabela 4** ilustra um exemplo de um plano de monitorização a implementar após um incêndio, listando os parâmetros a serem monitorizados bem como o incremento de custos estimado face a um cenário padrão, conduzindo a um aumento semanal de aproximadamente 223 €/ETA. Os valores apresentados tiveram como base numa estimativa feita por entidades gestoras das Águas de Portugal.

3.3. Avaliação de risco no meio recetor

O volume armazenado no ano após o incêndio rural também afeta a probabilidade da existência de uma alteração significativa na qualidade da água (Niels, 2022). A **Figura 12** ilustra estas relações. Por exemplo, se o nível de água armazenado atingir os 80% do pleno armazenamento, basta uma área ardida de aproximadamente 20% da área da bacia hidrográfica para um impacto ser muito provável (acima de 0,90). Se o nível atingir os 97%, a área ardida capaz de causar essa probabilidade de impacto aumenta para cerca de 60% da área da bacia hidrográfica. Desta forma, é crucial que o

responsável pela gestão da água de uma albufeira afetada tenha conhecimento não só da percentagem da área da bacia hidrográfica ardida, mas também do potencial de evolução do volume de água armazenado no ano após o incêndio.

Tabela 4 - Ajuste do Plano de Amostragem e seus custos, assumindo uma periodicidade de amostragem semanal.

Parâmetros	Custo (€ / Semana)
Cor	3
Turvação	2
pH	2
Condutividade	2
Carbono orgânico total (COT)	25
Carbono orgânico dissolvido	25
Oxidabilidade	5
Fósforo	6
Nitratos	6,5
Azoto total	20
Sólidos suspensos totais	5
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPA)	30
Oxigénio dissolvido	1,5
UV254	2
Sódio	5
Cloretos	6,5
Sulfatos	6,5
Cianeto	10
PCB	47
Ferro	6
Manganês	7

Em muitos casos, o volume armazenado na altura do incêndio e/ou as características da albufeira permitem fazer uma avaliação do risco de contaminação. Para tal, é necessário realizar uma análise do histórico do volume de água armazenado na albufeira. A **Figura 12** apresenta os dados do SNIRH sobre os níveis de armazenamento de água entre 1990 e 2020, expressos como uma fração da capacidade máxima (capacidade NPA). Na maior parte do período e com poucas exceções, as albufeiras das regiões do interior Norte e Centro encontram-se

praticamente na sua capacidade máxima de armazenamento. As albufeiras da região do Algarve e algumas albufeiras das regiões do Alentejo e do litoral registaram vários anos com níveis de albufeira baixos a extremamente baixos, enquanto a importante albufeira de Castelo de Bode apresentou níveis de armazenamento quase totalmente acima dos 90%. Portanto, a probabilidade de contaminação reforçada por baixos volumes de armazenamento de água é baixa no Norte e Centro de Portugal, mas mais elevada no Sul de país. Se a contaminação se registar no Norte ou no Centro, deverá ser

principalmente devido à extensão dos incêndios nas bacias hidrográficas.

No entanto, é também possível realizar uma avaliação sazonal deste risco imediatamente após um incêndio, recorrendo a outras ferramentas. Iniciando a previsão no início da estação húmida após um incêndio (em outubro), é possível avaliar o possível grau de recarga do volume de uma albufeira, analisando as previsões sazonais. Estas previsões podem ser obtidas através do portal do IPMA, que disponibiliza ao público previsão de longo prazo, nomeadamente para três meses (IPMA, 2023). Desta forma, uma análise efetuada

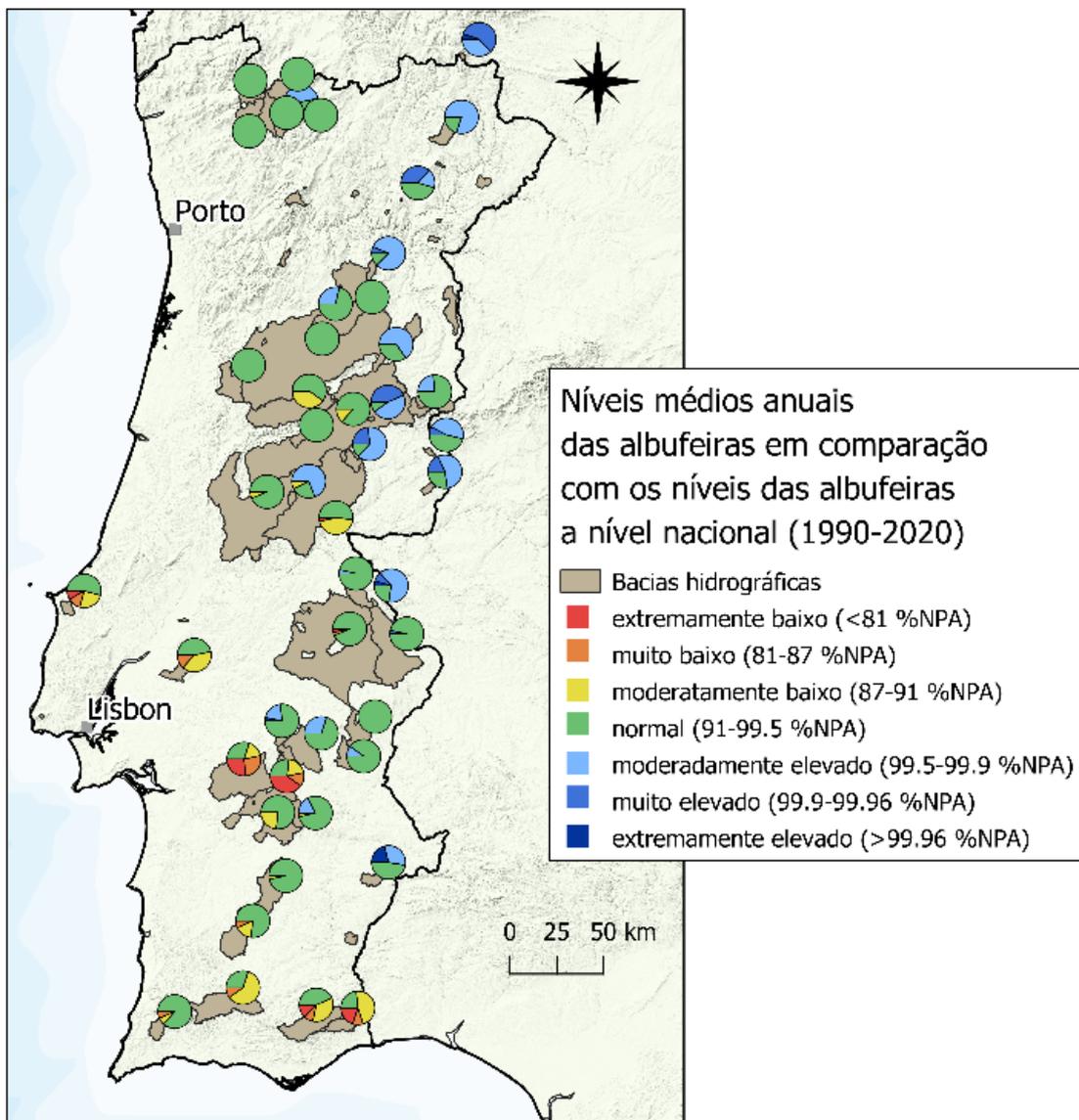


Figura 12 - Nível de água armazenado em diferentes albufeiras, expresso em percentagem do Nível de Pleno Armazenamento (NPA) de cada uma, em comparação com a mediana nacional durante o período 1990-2020 (adaptado de Schuurman, 2023).

no pós-incêndio pode ajudar a perceber a capacidade de diluição das cinzas que a albufeira terá nos meses seguintes.

3.4. Mitigação da mobilização de cinzas e sedimentos após o incêndio

A região noroeste da península Ibérica apresenta taxas de erosão pós-incêndio elevadas, geralmente entre 1 e 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Shakesby, 2011). Algumas atividades de remoção de árvores queimadas e de preparação do terreno para replantação, como a lavragem ou a construção de terraços, podem duplicar esses valores. Para além dos sedimentos mobilizados terem impacto na qualidade da água, as perdas de solo podem também levar à sua degradação, em especial em zonas afetadas por incêndios recorrentes. Desta forma, é necessário, em muitos casos, implementar medidas de mitigação da erosão em áreas recentemente ardidas.

Os tratamentos são geralmente aplicados em encostas ardidas com maior potencial de erosão. Existem ainda medidas de tratamento que visam limitar o movimento de sedimentos e cinzas em linhas de água, ribeiros e rios. A elaboração de um relatório de estabilização de emergência com as prioridades de intervenção é, geralmente, atribuída ao ICNF (ICNF, 2023), enquanto a APA tem a responsabilidade da recuperação das linhas de água afetadas; e a implementação é da responsabilidade dos municípios locais.

Estes tratamentos podem ser agrupados em aplicações baseadas em aumentar o coberto do solo e em barreiras contra o movimento de sedimentos (**Figura 13**). A eficácia destas medidas é variável em função da sua capacidade de redução da erosão, e dos custos e complexidade da sua aplicação, conforme discutido recentemente por Girona-García *et al.* (2021).

A técnica de aumento do coberto do solo mais conhecida é o *mulch*: espalhamento de um coberto sobre a área ardida. Entre as técnicas de aumento do coberto do solo encontram-se: (i) *mulch* de palha; (ii) *mulch* de restos florestais triturados; (iii) *mulch* de restos florestais não triturados (ramos, gravetos, folhas); (iv) o *hydromulch*, uma variante do *mulch* onde uma mistura de água, fibras orgânicas, tensoativos, nutrientes e sementes utilizadas na restauração de encostas e pedreiras é aplicado com um jato a pressão; e, (v) poliacrilamidas (PAM), um agente químico utilizado com sucesso na redução da

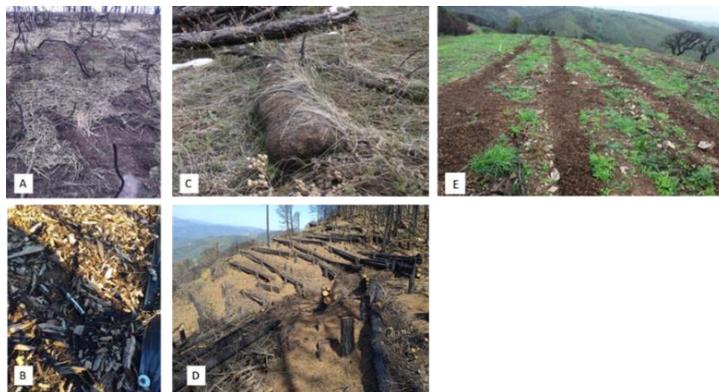


Figura 13 - Exemplos de técnicas de mitigação da erosão e escorrência pós-incêndio aplicadas em encostas através de coberto (A e B) e de barreiras (C, D e E): A) mulch de palha; B) mulch de restos triturados; C) barreiras de rolos de palha; D) barreiras de troncos; E) vale e cômoro (© Sergio Prats e Florian Ulm).

erosão em terras agrícolas. Quanto às técnicas de mitigação da erosão nas encostas com barreiras, incluem-se: (i) aplicação de *mulch* em faixas; (ii) Barreiras de feixes de arbustos (SEB, que deriva do nome em inglês, *cut-shrub erosion barriers*); (iii) barreiras de troncos (LEB, *Log Erosion Barrier*), espaçadas cerca de 20 m; (iv) rolos de palha (*straw wattles*), compostos por uma malha de plástico recheada de palha triturada; e (v) lavoura em vale-e-cômoro realizada com maquinaria pesada, em curvas de nível.

Os tratamentos de superfície são os mais eficazes para a mitigação da erosão e do arrasto de cinzas, uma vez que combinam uma redução da erosão com um custo de aplicação inferior ao de outras medidas (Girona-García *et al.*, 2023). Os

mulches de palha (taxas de aplicação de 1 - 2 t ha⁻¹), os restos de silvicultura triturados e não triturados (2-10 t ha⁻¹), e o *hydromulch* (3 - 4 t ha⁻¹) reduzem o escoamento em metade e a erosão do solo em 80-90%. Esta elevada eficácia tem sido demonstrada não somente em aplicações no pós-incêndio em Portugal (Prats *et al.*, 2012), como também em aplicações no pós-incêndio e compactação por maquinaria florestal para extrair a madeira queimada, um cenário altamente vulnerável para o qual poucas soluções existem (Prats *et al.* 2021). Recentemente, têm sido testadas aplicações de *mulch* em faixas, com reduções da erosão muito importantes, e com custos ainda mais reduzidos do que a aplicação sobre toda a superfície (Prats *et al.* 2022).

Estudos demonstram que os tratamentos em encostas baseados em barreiras podem ter um efeito redutor da erosão (Badía *et al.*, 2015), não demonstrar efeito (Fernandez *et al.*, 2011), ou até mesmo serem potenciadores de erosão (Robichaud *et al.*, 2008), embora os estudos realizados em Portugal sejam reduzidos. No entanto, as barreiras são difíceis de se instalarem corretamente, uma vez que podem ocorrer fugas, por transbordos por cima da barreira, e/ou perdas por baixo da barreira, o que pode impedir que a barreira deixe de acumular sedimentos (Robichaud *et al.*, 2008), especialmente se elas não estiverem corretamente alinhadas com o contorno do terreno. Por outro lado, mesmo quando implementadas cuidadosamente, 75% das barreiras estudadas por Robichaud *et al.* (2008) revelaram problema de instalação e incapacidade de armazenamento de sedimentos. Outra técnica amplamente utilizada para o controlo de erosão em áreas agrícolas é a lavoura em vala-e-cômoros, que tem sido testada em zonas recentemente ardidas, mas sem grande sucesso devido ao custo elevado, potencial de

compactação do solo e à interferência com a regeneração natural da vegetação (Faria, 2022).

Quanto às técnicas para limitar o movimento de sedimentos e cinzas em linhas de água, ribeiros e rios, estas incluem: (i) barreiras de troncos (*log check dams*), colocadas no leito dos rios e ribeiros; (ii) faixas de vegetação ripícola; e (iii) barreiras de pedras (*rock check dams*) ou betão (*concrete check dams*), colocadas no leito do rio. A eficácia destas medidas é mais difícil de ser avaliada, e o número de estudos em Portugal é reduzido. O estudo de modelação hidrológica para o sul de Portugal realizado por Faria (2022) revelou resultados satisfatórios na mitigação do transporte de sedimentos em linhas de água, através da utilização de barreiras de troncos, e um efeito mais reduzido na recuperação da vegetação ripícola. Estas abordagens podem ser atrativas dada a área de aplicação limitada às linhas de água.

No entanto, a implementação de barreiras nas linhas de água contradiz à limpeza e desobstrução das linhas de água necessárias para impedir inundações em algumas zonas que são potenciadas pelos incêndios. Outra limitação no uso das barreiras prende-se com a colocação, que caso seja incorreta pode levar ao seu colapso, potenciando o transporte de sedimentos entretanto acumulados num curto espaço de tempo, o que pode levar a eventos de contaminação pontuais mais elevados. Já a implementação ou recuperação de faixas de vegetação ripícola tem recebido alguma atenção, uma vez que o seu carácter preventivo permite um investimento antes dos incêndios. Contudo, isto pode ser considerado uma desvantagem, uma vez que a recuperação da vegetação ripícola requer planeamento atempado e não pode ser considerada uma medida de mitigação de emergência (Faria, 2022).

Assim sendo, considerando os custos e os benefícios, o *mulching* surge como a medida que mais pode ajudar na mitigação de emergência dos riscos de contaminação da qualidade da água derivados da ocorrência dos incêndios rurais. Acresce a isto a recuperação das faixas de vegetação ripícola, enquadradas dentro de uma estratégia de planeamento de longo prazo. Um resumo das recomendações deste subcapítulo encontra-se na **Tabela 5**. Os gestores florestais e hídricos, os administradores locais e outras partes interessadas devem, no entanto, discutir as medidas mais adequadas para mitigar os impactos dos incêndios de acordo com a situação que se encontra cada bacia hidrográfica no antes e no pós-incêndio, e em particular onde estas medidas são prioritárias, tendo em conta os fundos geralmente limitados e ainda a necessária rapidez para que a intervenção seja eficaz.

3.5. Mapeamento de áreas prioritárias para implementar medidas de mitigação

O mapeamento de áreas prioritárias para intervenções no campo é crucial, pois esta informação facilita a tomada de decisões sobre onde e como mitigar a mobilização de cinzas, diante de recursos escassos e tempo limitado, uma

vez que as medidas devem ser implementadas de preferência antes das primeiras chuvadas fortes. As áreas prioritárias são definidas como aquelas onde ocorrem maiores taxas de erosão e por consequência onde se espera a maior mobilização de cinzas após um incêndio rural, e onde será mais necessário aplicar medidas de estabilização de solos que a limitem.

As taxas de erosão podem ser estimadas por meio de modelos como o de *Morgan-Morgan-Finney* (MMF). Este modelo foi aplicado por Parente *et al.* (2022) para Portugal continental para o período entre 1980 e 2018. O mapeamento nacional realizado permitiu identificar as áreas com maior risco de erosão no pós-incêndio para o passado e para o futuro. Tais áreas estão associadas à combinação entre a ocorrência de períodos de chuva intensos e declives elevados, e encontram-se na sua grande maioria nas zonas centro e norte do país e nas serras algarvias, o que coincide com as áreas de maior perigosidade de incêndio identificadas por Parente *et al.* (2016) e por ICNF (2020).

Outro modelo que pode ser utilizado é a Equação universal de perda de solo (RUSLE). Este, usando cálculos menos complexos que o MMF, permite o mapeamento fiável de áreas

Tabela 5 - Recomendações de utilização de medidas de mitigação da erosão pós-incêndio em encostas e linhas de água baseados na efetividade das técnicas para mitigar a mobilização e transporte de solo e cinzas.

Recomendação	Encostas	Linhas de água
Recomendáveis sempre	<i>Mulch</i> de palha	Faixas de vegetação ripícola
	<i>Mulch</i> de restos triturados	
	<i>Mulch</i> de restos não triturados	
	Hydromulch	
	Faixas de <i>mulch</i>	
Recomendáveis só com condições locais favoráveis	Barreiras de feixes de arbustos (SEB)	Barreiras de troncos
	Barreiras de troncos (LEB)	Barreiras de pedras
	Barreiras de rolos de palha	Limpeza e desobstrução
Não recomendáveis	Lavoura em vala-e-cômodo	
	PAM	

prioritárias à escala local, como é demonstrado por Parente *et al.* (2023) e como é possível verificar na **Figura 14**.

do MMF, mas existe uma aplicação simples de usar para pessoas com poucos conhecimentos em sistemas de informação geográfica e, como

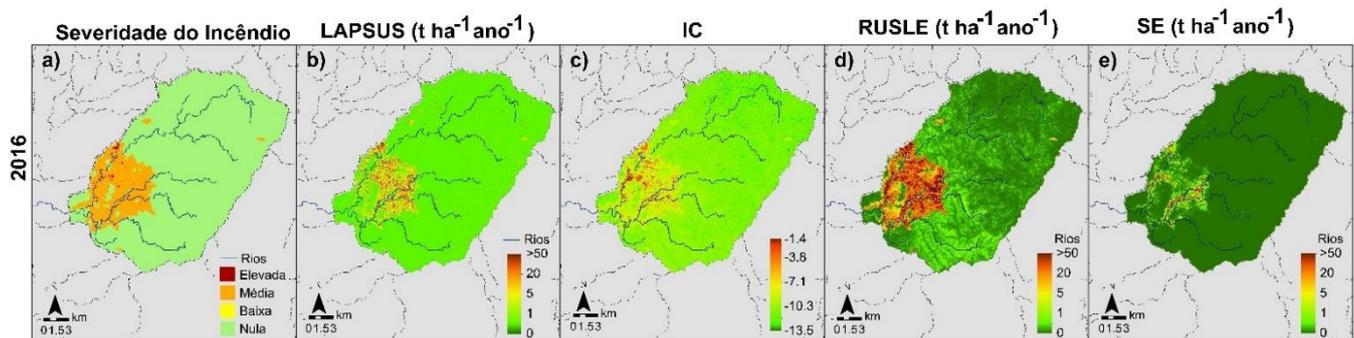


Figura 14 - Previsão de perda de solo no pós-incêndio de 2016 segundo vários modelos de perda de solo para a bacia hidrográfica de Águeda. a) severidade do incêndio de 2016. b) Modelo de evolução de paisagem, LAPSUS. c) Índice de conectividade, IC (adimensional). d) Equação Universal de perda de solo (RUSLE). e) Exportação de sedimentos, SE, consiste na relação entre RUSLE e IC. (adaptado de Parente *et al.* 2023).

A RUSLE encontra-se detalhada na **Figura 15**, necessitando das seguintes variáveis:

- i) O fator de erosividade da chuva (R_i), erodibilidade do solo (K_i), fator gradiente de comprimento de inclinação (LS_i) e fator de prática de suporte (P_i), relacionado com a gestão humana do solo; estas variáveis podem ser facilmente encontradas na base de dados do *European Soil Data Centre*.
- ii) O fator de gestão da cobertura (C_i) que requer a calibração de acordo com a cartografia da severidade do incêndio e da cobertura do solo. Os valores de C_i que deverão ser considerados encontram-se na **Tabela 6**.

$$RUSLE(t\ ha^{-1}\ ano^{-1}) = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i$$

Figura 15 – Equação universal de perda de solo (RUSLE) em que R_i é o fator de erosividade da chuva, K_i é o fator de erodibilidade do solo, LS_i é o comprimento de inclinação, P_i é o fator de prática de suporte e C_i é o fator de gestão de cobertura.

Um terceiro modelo é o índice de conectividade (IC). Este índice permite a identificar as áreas prioritárias a serem intervencionadas numa bacia hidrográfica, utilizando a topografia e um mapa da severidade do incêndio para estimar o potencial dos sedimentos serem erodidos e também transportados para as linhas de água. O cálculo do IC é mais complexo que o da RUSLE ou

alternativa, uma ferramenta de fácil implementação em sistemas de informação geográfica. Na sua computação são necessárias duas variáveis: (i) o fator de gestão da cobertura (C_i), calculado de acordo com a metodologia utilizada na RUSLE; e (ii) o modelo digital de terreno da bacia hidrográfica dentro da qual se encontram as áreas que se pretende intervencionar. A utilidade do IC para mapeamento de áreas prioritárias de intervenção em áreas ardidas foi demonstrada por Parente *et al.* (2023) e Petratou *et al.* (2023). O mapeamento do IC e sua comparação com alguns dos modelos anteriormente mencionados encontram-se exemplificados na **Figura 14**. Nesta figura, é possível identificar algumas diferenças e semelhanças existentes entre diversos modelos que permitem a previsão de perda de solo (Parente *et al.*, 2023).

3.6. Prioridades no tratamento da água

Numa perspectiva preventiva e de segurança da água, considera-se fundamental dispor de uma avaliação do risco (ver capítulo 2 e subcapítulos do 3.1 ao 3.3), identificação dos possíveis impactos dos incêndios nas origens de água, bem como das medidas preventivas que devem ser tomadas a curto e médio prazo (ver subcapítulos 2.5 e 3.4). Por outro lado, é fundamental priorizar quais os contaminantes mais importantes em cada contexto local (água superficial, água subterrânea, albufeira, rio, tipo de floresta, dimensão do incêndio, entre outros fatores). Para quantificar os impactos, é necessário reforçar que os incêndios afetam não só a qualidade da água, mas podem também impactar significativamente a capacidade de uma entidade gestora tratar com eficiência a água na origem afetada pelo incêndio, caso o sistema de tratamento não tenha capacidade para lidar com os impactos do evento, diminuindo a disponibilidade de água tratada.

Para este fim, foram caracterizadas duas captações em áreas afetadas por incêndios pela AdP-Valor junto de entidades gestoras do grupo

AdP. Os sistemas em estudo são, genericamente, constituídos por (i) sistema de captação e (ii) linha de tratamento. Em relação à tipologia da captação, esta pode ser em albufeira ou em rio, enquanto as linhas de tratamento variam de instalação para instalação. Na **Figura 16**, é apresentada uma esquematização dos sistemas em estudo, bem como identificadas as principais medidas de mitigação aplicáveis a cada componente do sistema. É importante salientar que a amplitude das medidas de mitigação identificadas abrange tanto o sistema de captação como na linha de tratamento.

Dos diversos parâmetros de qualidade da água bruta afetados em períodos pós-incêndio, apenas os parâmetros pH e turvação são monitorizados de forma regular. No primeiro caso, geralmente não são detectados desvios significativos que ponham em causa o funcionamento do sistema, e, conseqüentemente, não existe informação relativa às medidas de mitigação associadas. Desta forma, a análise focou-se no parâmetro turvação. Realizou-se um questionário com os seguintes levantamentos:

- i) Definição e caracterização dos impactos causados nos sistemas de tratamento pelas

Tabela 6 - Valores do fator de gestão da cobertura (C_i) que devem ser considerados de acordo com o tipo de coberto do solo e a severidade do incêndio rural (adaptado de Parente *et al.* 2023).

Cobertura do solo	Severidade do incêndio rural	Fator de cobertura (C_i)
Povoações	Severidade Nula (não queimado)	0.0005
	Severidade baixa	0.00055
	Severidade moderada	0.00113
	Severidade elevada	0.00188
Agricultura	Severidade Nula (não queimado)	0.002
	Severidade baixa	0.0658
	Severidade moderada	0.1347
	Severidade elevada	0.2244
Floresta de Eucalipto, Floresta de Pinheiro, Outro tipo de florestas, Matos	Severidade Nula (não queimado)	0.001
	Severidade baixa	0.0658
	Severidade moderada	0.1347
	Severidade elevada	0.2244

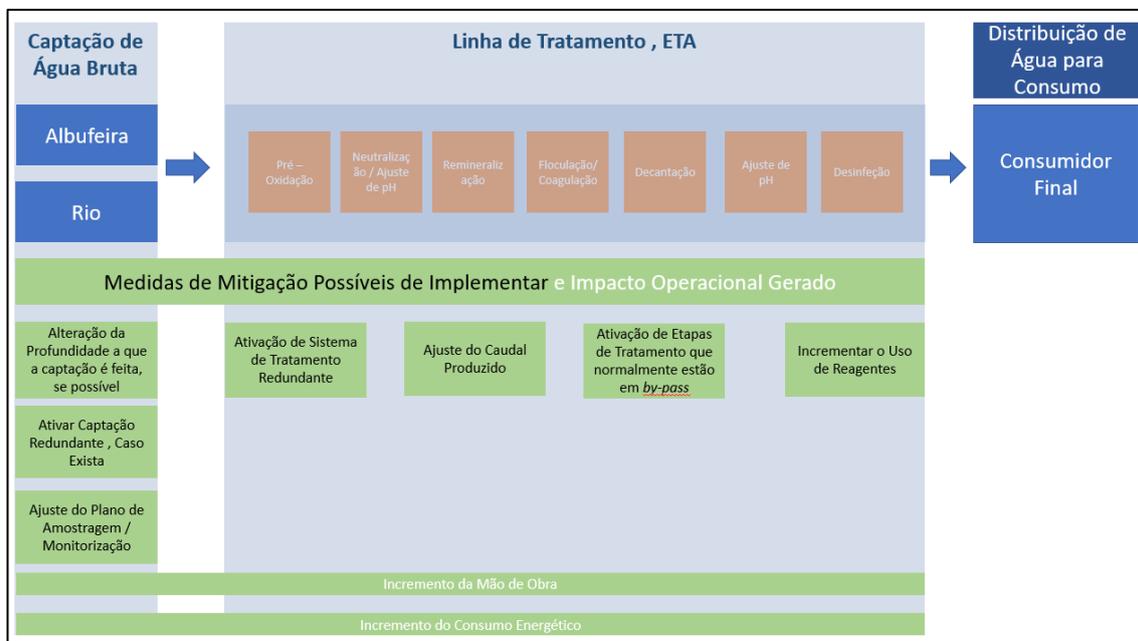


Figura 16 - Esquematização dos sistemas analisados e aplicabilidade das medidas de mitigação e impacto operacional gerado.

alterações paramétricas de turvação registadas na água bruta:

- i. Nível 1 – Sem Impacto;
- ii. Nível 2 – Impacto ultrapassável com

medidas operacionais;

- iii. Nível 3 – Compromete a fiabilidade

do sistema mesmo aplicando medidas operacionais

ii) Caracterização dos valores paramétricos limite associados às categorias de impacto mencionadas anteriormente (para a turvação):

- i. Valor Limite (VL): Valor paramétrico registado na água bruta a partir do qual o Sistema Sofre Impacto de Nível 2;

- ii. Valor Crítico (VC): Valor paramétrico registado na água bruta a partir do qual o Sistema Sofre Impacto de Nível 3.

- iii) Medidas de Mitigação Operacionais aplicáveis quando os valores paramétricos da água bruta estiverem entre VL e VC,

- iv) Custos associados às medidas de mitigação identificadas.

O exercício de caracterização dos valores paramétricos limite (VL e VC) associados aos três níveis de impacto permitiu obter informação relativa

ao parâmetro turvação (**Tabela 7**). Nesse sentido, apresenta-se a seguir uma análise dos dados que refletem a experiência dos gestores das instalações de tratamento.

Tabela 7 - Análise de resultados, valores paramétricos limite.

Sistema / Parâmetro	Turvação (NTU)	
	VL	VC
I. Sistema de Captação (Global)	15	30
II. Linha de Tratamento (Global)	4-5	10-20

Uma medida de mitigação adotada frequentemente prende-se com o incremento da dosagem de reagentes ou ao uso de reagentes adicionais que são utilizados face à ocorrência de perturbações na qualidade da água bruta. Normalmente, este reforço é feito imediatamente após o incêndio como medida preventiva, uma vez que a obtenção dos resultados da monitorização da qualidade da água bruta não é imediata. Também ao nível da mão de obra, ocorre um acréscimo de afetação associado à implementação das medidas de mitigação referidas. Esta medida é acomodada pelas equipas operacionais, uma vez que o incremento de custos recorrente das atividades adicionais não é diretamente quantificável. Não obstante, é possível concluir que são esperados

incrementos de mão de obra, associados à operação das etapas de floculação/coagulação e filtração. As etapas de tratamento consomem energia, logo, qualquer perturbação no seu normal funcionamento poderá resultar num aumento do consumo energético, tanto no sistema de captação como na linha de tratamento, ou mesmo pela ativação de sistemas alternativos de abastecimento de água. Constata-se que esta é uma medida cuja quantificação de custos é bastante complexa, sendo a sua quantificação fortemente dependente dos sistemas instalados.

Apresenta-se a seguir o incremento de custos estimado resultante das medidas de mitigação operacional propostas (**Tabela 8**). É importante salientar que os valores fornecidos pelos gestores dos sistemas refletem a sua experiência operacional e, conseqüentemente, variam de instalação para instalação. Sendo assim,

estes valores referentes a duas estações de tratamento devem ser considerados como uma primeira análise, a título ilustrativo. Contudo, a apresentação destes valores possibilita a realização de algumas estimativas dos custos de mitigação. As medidas de mitigação no sistema de tratamento podem atingir o valor mínimo de 180 €/dia, ou, se considerarmos apenas o primeiro ano pós-incêndio 65,700 € (**Tabela 8**). Por outro lado, Petratou *et al.* (2023) estimaram o custo das medidas de mitigação da erosão pós-incêndio em linhas de água de máxima erosão (maior a 10 t ha⁻¹) em 3,672 €, para um incêndio de 13,000 hectares, o que representa um custo 17 vezes maior. Apesar de não ser possível eliminar as medidas de mitigação do sistema de tratamento, deve ainda ser possível a sua redução efetiva se aplicarmos medidas de mitigação da erosão pós-incêndio.

Tabela 8 - Incremento do uso de reagentes, mão de obra e energia, e custos associados.

Sistema \ Medida de Mitigação	Incremento do Uso de Reagentes (€/dia)	Aumento de Mão de Obra (€/dia)	Aumento de Energia (€/dia)
I. Sistema de Captação	N/A	N/A	80
II. Linha de Tratamento	50-60	Aplicável. Custo Desconhecido	Aplicável. Custo Desconhecido
Pré - Oxidação	15-20	N/A	-
Remineralização	10	N/A	-
Floculação /Coagulação	25-40	Aplicável. Custo Desconhecido	-
Decantação	N/A	N/A	-
Filtração	Aplicável. Custo desconhecido	Aplicável. Custo Desconhecido	-
Desinfecção	Aplicável. Custo desconhecido	N/A	-

3.7. Bibliografia

Ambiente, M. do. (1998). *Decreto-lei 236/98, de 1 de Agosto*. Diário Da República, 176/1998. <https://tinyurl.com/afvsv2je>.

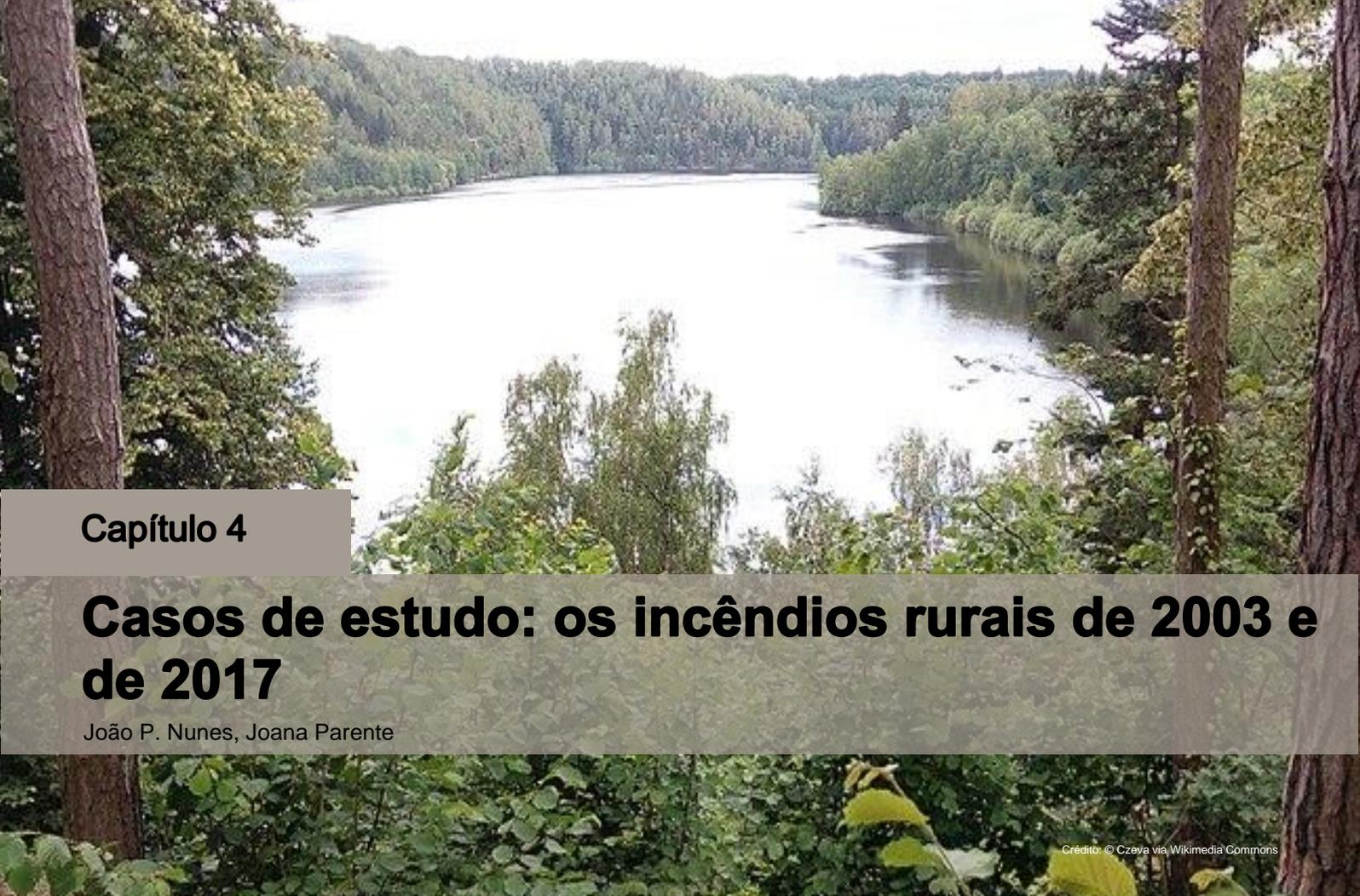
Badía, D., Sánchez, C., Aznar, J.M., & Martí, C. (2015). *Post-fire hillslope log debris dams for runoff and erosion mitigation in the semiarid Ebro Basin*.

Geoderma, 237–238: 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.004>.

ESDAC (2023). *Joint research centre: European soil data centre (ESDAC)*. <https://tinyurl.com/zxr5jpkc>.

Faria, B. (2022). *Assessing the Effectiveness of SLM Measures in Restoring Forest Ecosystem Services Disturbed by Forest Fires*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. <https://tinyurl.com/2jr58zfw>.

- Fernández, C., Vega, J.A., Jiménez, E., & Fonturbel, T. (2011). *Effectiveness of three post-fire treatments at reducing soil erosion in Galicia (NW Spain)*. *International Journal of Wildland Fire*, 20 (1), 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103611>.
- Girona-García, A., Vieira, D.C.S., Silva, J., Fernández, C., Robichaud, P.R., & Keizer, J.J. (2021). *Effectiveness of post-fire soil erosion mitigation treatments: A systematic review and meta-analysis*. *Earth-Science Reviews*, 217, 103611. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103611>.
- Girona-García, A., Cretella, C., Fernández, C., Robichaud, P.R., Vieira, D.C.S., & Keizer, J.J. (2023). *How much does it cost to mitigate soil erosion after wildfires?* *Journal of Environmental Management*, 334, 117478. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117478>.
- ICNF (2023). *Relatório de estabilização de emergência*. <https://tinyurl.com/yt4dvj8r>.
- ICNF (2020). *Metodologia para a produção da Carta de Perigosidade de Incêndio Rural de cariz estrutural: relatório definitivo*. <https://tinyurl.com/283yvw49>.
- IPMA (2023). *Previsão de longo prazo*. <https://www.ipma.pt/pt/otempo/prev.sazonal/>.
- Nitzsche, N. (2022). *Evaluating and interpreting post-fire water quality changes in portuguese reservoirs*. [Msc Thesis, FCUL]. <https://tinyurl.com/bdfjnrsk>.
- Nunes, J.P., Bernard-Jannin, L., Rodríguez-Blanco, M.L., Boulet, A.-K., Santos, J.M., Keizer, J.J. (2020). *Impacts of wildfire and post-fire land management on hydrological and sediment processes in a humid Mediterranean headwater catchment*. *Hydrological Processes*, 34(26), 5210-5228. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.13926>.
- Parente, J., Girona-García, A., Lopes, A. R., Keizer, J. J., & Vieira, D. C. S. (2022). *Prediction, validation, and uncertainties of a nation-wide post-fire soil erosion risk assessment in Portugal*. *Scientific Reports*, 12(1), 2945. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07066-x>.
- Parente, J., Nunes, J.P., Baartman, J., & Föllmi, D. (2023). *Testing simple approaches to map sediment mobilisation hotspots after wildfires*. *International Journal of Wildland Fire*, 32, 886-902. <https://doi.org/10.1071/WF22145>.
- Parente, J., & Pereira, M. G. (2016). *Structural fire risk: The case of Portugal*. *Science of The Total Environment*, 573, 883–893. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.164>.
- Prats, S.A., MacDonald, L.H., Monteiro, M., Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., & Keizer, J.J. (2012). *The effectiveness of forest residue mulching in reducing overland flow generation and associated soil losses following wildfire in north-central Portugal*. *Geoderma*, 191, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.009>.
- Prats, S.A., Sierra-Abraín, P., Moraña-Fontán, A., Zas, R. (2022) *Effectiveness of community-based initiatives for mitigation of land degradation after wildfires*. *Science of the Total Environment*, 810, 152232 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152232>.
- Prats, S.A., Wagenbrenner, J.W., Malvar, M.C. (2021). *Compaction and cover effects on runoff and erosion in post-fire salvage logged areas in the Valley wildfire, California*. *Hydrological Processes*, 35, e13997 <https://doi.org/10.1002/hyp.13997>.
- Petratou, D., Nunes, J.P., Guimarães, M.H., & Prats, S.A. (2023). *Decision-making criteria to shape mulching techniques for fire-prone landscapes*. *Landscape Ecology*. <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01659-1>.
- Robichaud, P.R., Wagenbrenner, J.W., Brown, R.E., Wohlgemuth, P.M., & Beyers, J.L. (2008). *Evaluating the effectiveness of contour-felled log erosion barriers as a post-fire runoff and erosion mitigation treatment in the Western United States*. *International Journal of Wildland Fire*, 17, 255-273. <https://doi.org/10.1071/wf07032>.
- Schuurman, J. (2023). *Mapping fire-induced water contamination risk in Portugal*. [Dissertação apresentada na Universidade de Wageningen para obtenção do Grau de Mestre da ciência em gestão de informação geográfica e aplicações].
- Shakesby, R. A. (2011). *Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions*. *Earth-Science Reviews*, 105(3–4), 71–100. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>.
- Wu, J., Baartman, J.E.M., Nunes, J.P. (2021). *Comparing the impacts of wildfire and meteorological variability on hydrological and erosion responses in a Mediterranean catchment*. *Land Degradation and Development*, 32, 640-653. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3732>.



Capítulo 4

Casos de estudo: os incêndios rurais de 2003 e de 2017

João P. Nunes, Joana Parente

Crédito: © Czeva via Wikimedia Commons

O índice de risco de contaminação da água após incêndio, descrito no capítulo 3.1, foi aplicado tendo em conta as áreas ardidas em 2003 e 2017 (**Figura 17**), para se poder fazer uma comparação com os impactos observados na qualidade da água. Como se pode verificar, em 2003 as principais albufeiras afetadas foram Bravura (81% da bacia hidrográfica ardida), Póvoa e Meadas (44% ardida), e Castelo de Bode (32% ardida em 2003, com uma área adicional ardida de 14% em 2005). Em 2017, as principais albufeiras afetadas foram: Fronhas (52% ardida), Aguieira (44% ardida), e num menor grau, Castelo de Bode (33% ardida). Note-se ainda o rio Alge (72% da bacia hidrográfica ardida), que apesar de ser uma captação em rio e não em albufeira, sofreu fortes impactos na qualidade da água, pelo que foi adicionado à análise.

A **Figura 18** mostra o impacto dos incêndios nestas três principais albufeiras afetadas em

2003, na concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST) na albufeira, comparado com o volume armazenado. Os impactos existiram nos três casos, mas foram bastante diferentes (conforme descrito em seguida), e ilustram que o índice de risco consegue identificar a existência potencial de um impacto, mas que a magnitude desses impactos varia conforme a situação:

i) **Na albufeira da Bravura**, os impactos imediatamente após o incêndio de 2003 foram reduzidos; ainda assim a concentração de SST aumentou de valores não detetáveis para entre 10 e 20 mg L⁻¹, capazes de afetar o tratamento da água. Mas os principais impactos ocorreram entre 2005 e 2008, com picos de concentrações acima dos 30 mg L⁻¹. Uma análise detalhada por Wu *et al.* (2021) sugere que as cinzas acumularam-se nos leitos das ribeiras a montante durante a seca de 2003 a 2005, dado o reduzido número de eventos chuvosos; tendo sido exportadas de

forma concentrada em eventos chuvosos durante as estações húmidas subsequentes.

ii) **Na albufeira de Póvoa e Meadas**, a concentração de SST era já de valores até 10 mg L⁻¹ antes do incêndio, apresentando vários picos de curta duração associados a períodos de volume reduzido. O incêndio de 2003 teve um impacto com efeitos significativos na qualidade da água, levando a concentrações até 30 mg L⁻¹ durante um período mais prolongado, durante seis meses depois do incêndio; no entanto, depois dessa situação as concentrações voltaram a um valor regular.

iii) **Na albufeira de Castelo de Bode**, as concentrações de SST antes dos incêndios variaram, mas sempre em valores abaixo de 5 mg L⁻¹. Após os incêndios de 2003 e 2005 e o final

ligeiramente acima dos 5 mg L⁻¹, suficientes para causar um impacto potencial, mas não de grande magnitude.

Esta análise mostra que, após os incêndios de 2003, o índice de risco identificou corretamente as situações com impactos na qualidade da água significativos. Mas não identificou a magnitude nem a duração desses impactos, que estão provavelmente associados a outros fatores como a severidade do incêndio, a fisiografia da bacia hidrográfica ou as características das albufeiras, que carecem de uma análise mais aprofundada.

Quanto aos incêndios de 2017, a limitação da frequência de dados de qualidade da água no SNIRH (dados semestrais) limita a possibilidade de executar uma análise com o mesmo grau de detalhe. Contudo, podemos referir algumas

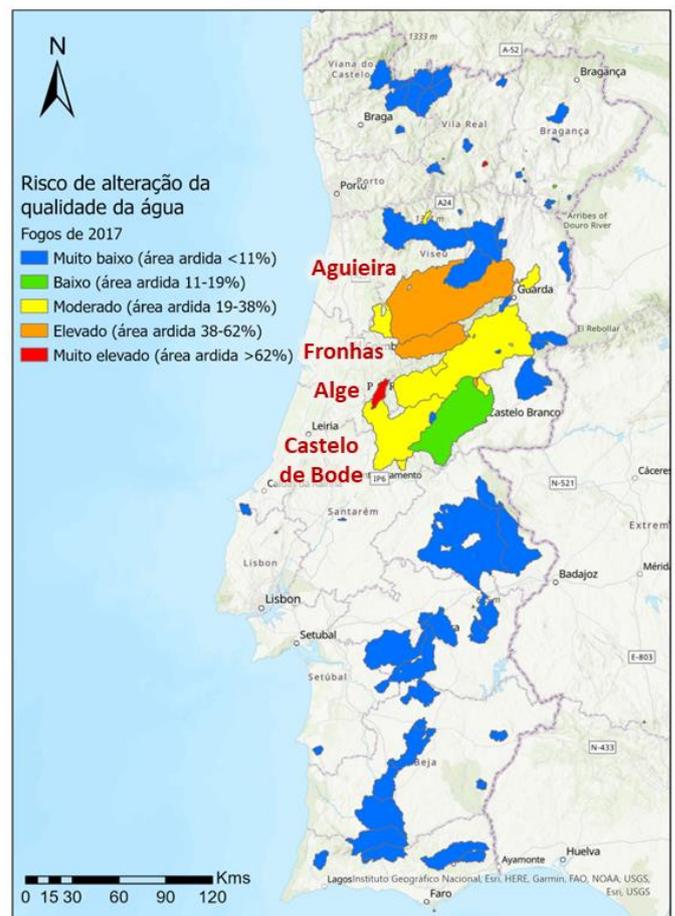
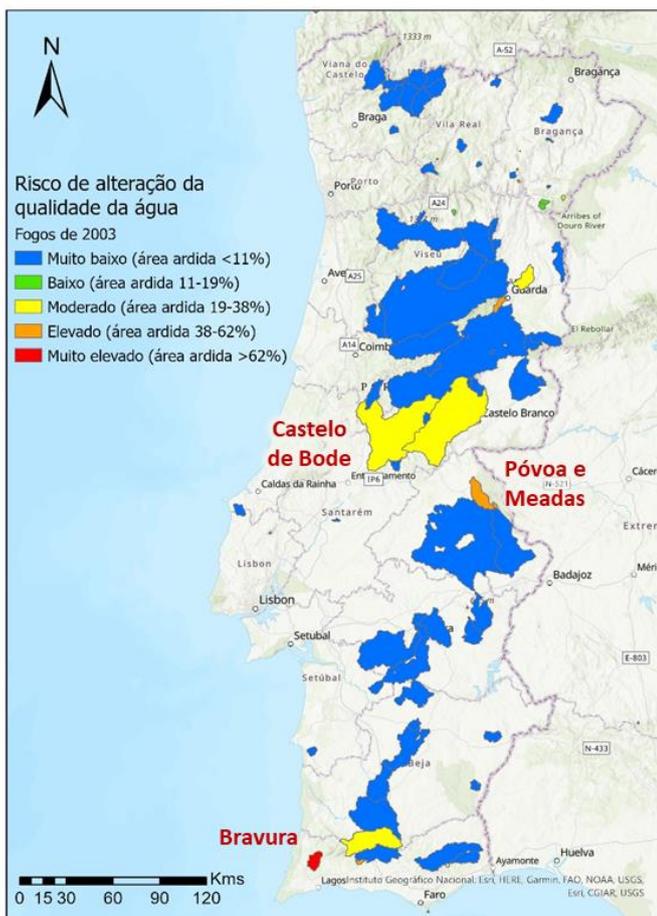


Figura 17 - Aplicação do índice de risco de alteração da qualidade da água para os incêndios rurais de 2003 (esquerda) e 2017 (direita); os nomes indicam as principais albufeiras com risco muito elevado ou extremo.

da seca, os valores mantiveram-se baixos, mas ocorreram vários picos de concentração

análises realizadas por alguns colegas à escala dos rios, de captações de água e de subbacias da

bacia hidrográfica da Aguieira após estes incêndios (Dinis *et al.*, 2020; Sequeira *et al.*, 2020a,b; 2023). Por exemplo, Sequeira *et al.* (2020a) verificaram que após os incêndios de 2017 houve um aumento: (i) da turbidez em todos os cursos de água, e da condutividade elétrica em cursos de água de baixo declive; e (ii) das concentrações de Al, Fe, Mn, As, Ba e Zn, que rapidamente diminuíram após intensos eventos de precipitação.

Por outro lado, foi possível recolher alguma informação nos meios de comunicação social para todos os casos afetados através de notícias

de água; por exemplo, a captação de água do rio Ceira para Góis (SAPO24, 2017).

Quanto a Castelo de Bode, a APA referiu que não se registaram impactos significativos na qualidade da água, apesar da área ardida (LUSA, 2020). Ao contrário de 2003, este incêndio não foi seguido de um período de seca, pelo que (conforme o índice mostrado na **Figura 18**) um impacto na qualidade da água seria improvável. Este resultado é corroborado por um estudo de modelação numérica, que indicou que o grande volume armazenado na albufeira terá limitado os impactos das cinzas na qualidade da água (Basso

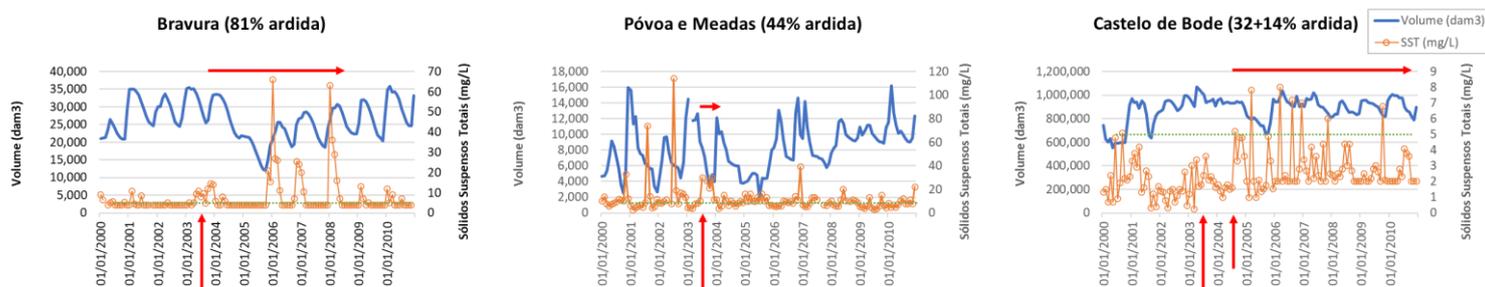


Figura 18 - Valores mensais do volume de água armazenado (azul) e sólidos suspensos totais (laranja) antes e depois dos incêndios de 2003 e 2005, nas albufeiras da Bravura (esquerda), Póvoa e Meadas (centro) e Castelo de Bode (direita); as setas vermelhas verticais no eixo da data indicam a ocorrência do incêndio, e as setas vermelhas horizontais no topo indicam a duração da perturbação. A linha verde pontilhada horizontal indica um limiar de impacto de 5 mg/L de SST. Note-se a diferença nas escalas do volume armazenado e dos sólidos suspensos totais. Dados obtidos no SNIRH.

disponíveis online no ano após estes incêndios, exceto para a albufeira da Aguieira. O rio Alge sofreu os maiores impactos, com a captação a ser interrompida apenas algumas semanas após os incêndios, quando enxurradas inesperadas em julho levaram cinzas para o rio (RTP, 2017a). Estes impactos repetiram-se novamente no final do ano, quando as chuvas voltaram em dezembro e foi necessário interromper novamente a captação da água (JL, 2017). Nesse inverno, as cinzas arrastadas para a albufeira de Fronhas levaram a alterações da qualidade da água e a preocupações sobre a capacidade de abastecimento de água a Oliveira do Hospital (RTP, 2017b). De notar que outros municípios na região dos incêndios, mas com água captada fora de albufeiras, sofreram também limites à captação

et al., 2021). A isto acresce que foram implementadas medidas de proteção dos recursos hídricos pela APA em coordenação com os municípios locais, nomeadamente a correção torrencial de linhas de água e a proteção dos taludes das encostas ardidas (LUSA, 2020). No entanto, uma análise do índice de risco indica que, caso ao ano de 2017 se tivesse seguido uma seca severa, poderiam ter-se verificado impactos na qualidade da água semelhante aos que ocorreram em 2003, com potencial para afetar o tratamento da água.

4.1. Bibliografia

Basso, M., Mateus, M., Ramos, T. B., & Vieira, D. C. (2021). *Potential post-fire impacts on a water supply reservoir: an integrated watershed-reservoir approach*. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 684703. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.684703>.

Dinis, P. A., Sequeira, M., Tavares, A. O., Carvalho, J., Castilho, A., & Pinto, M. C. (2020). *Post-wildfire denudation assessed from compositional features of river sediments (Central Portugal)*. *Applied Clay Science*, 193, 105675. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105675>.

JL (2017). *Chuvas contaminam águas de Ansião com cinzas dos incêndios*. <https://tinyurl.com/yr2km7ew>.

LUSA (2020). *APA assegura qualidade da água para consumo a partir de Castelo de Bode*. <https://tinyurl.com/29yp5z6j>.

RTP (2017a). *Enxurradas dos últimos dias obrigaram município de Ansião a interromper captação de água*. <https://tinyurl.com/2jdv3few>.

RTP (2017b). *Detritos dos incêndios deixaram as águas do Rio Alva negras*. <https://tinyurl.com/muc5kpz3>.

SAPO24 (2017). *Góis deixa de captar água do rio Ceira devido às cinzas dos incêndios*. <https://tinyurl.com/kw5vmsb7>.

Sequeira, M.D., Castilho, A.M., Dinis, P.A., Tavares, A.O. (2020a). *Impact Assessment and Geochemical Background Analysis of Surface Water Quality of Catchments Affected by the 2017 Portugal Wildfires*. *Water*, 12(10):2742. <https://doi.org/10.3390/w12102742>.

Sequeira, M.D., Castilho, A., Tavares, A.O., Dinis, P. (2023). *The Rural Fires of 2017 and Their Influences on Water Quality: An Assessment of Causes and Effects*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1):32. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010032>.

Sequeira, M. D., Castilho, A. M., Tavares, A. O., & Dinis, P. (2020b). *Assessment of superficial water quality of small catchment basins affected by Portuguese rural fires of 2017*. *Ecological Indicators*, 111, 105961. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105961>.

Wu, J., Baartman, J. E., & Nunes, J. P. (2021). *Comparing the impacts of wildfire and meteorological variability on hydrological and erosion responses in a Mediterranean catchment*. *Land Degradation & Development*, 32(2), 640-653. <https://doi.org/10.1002/ldr.3732>.

