

Efeitos dos fogos florestais nos sistemas aquáticos

Os incêndios florestais constituem um fenómeno cada vez mais frequente nos países mediterrânicos. Portugal não é exceção, tendo-se observado nas últimas décadas um aumento do número de ocorrências e área ardida. As severas consequências sociais, económicas e ecológicas dos incêndios florestais são amplamente reconhecidas, mas alguns dos seus impactos, nomeadamente os impactos após fogo na qualidade da água, não têm merecido o relevo científico adequado. Neste trabalho pretende avaliar-se os efeitos nefastos de escorrências superficiais provenientes de áreas ardidas, ricas em metais e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, nos ecossistemas aquáticos. Para tal sugere-se a preparação de extratos aquosos de cinzas (em alternativa às escorrências naturais), uma matriz relativamente fácil de recolher em qualquer zona ardida, cuja toxicidade pode ser testada com diversos organismos-teste sinalizadores de efeitos adversos nos ecossistemas aquáticos. No caso particular do presente trabalho, utilizou-se um teste de inibição de crescimento da macrófita *Lemna minor*, uma espécie fotoautotrófica comumente encontrada em massas de água doce superficiais em Portugal. Estudos anteriores revelam a sensibilidade desta espécie a escorrências de incêndios e alertam para repercussões das mesmas no normal funcionamento do ecossistema aquático.

Palavras-chave

incêndios florestais
contaminação
ecossistemas aquáticos
ensaios ecotoxicológicos

Vera Silva^{1,2}

Joana Luísa Pereira¹

Fernando Gonçalves¹

Ian Jacob Keizer²

Nelson Abrantes^{2*}

¹ Departamento de Biologia & CESAM (Centro de Estudos do Ambiente e do Mar), Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

² Departamento de Ambiente e Ordenamento & CESAM (Centro de Estudos do Ambiente e do Mar), Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

* njabrant@ua.pt

INTRODUÇÃO

A problemática dos incêndios florestais em Portugal

A região mediterrânica é particularmente fustigada por incêndios florestais, os quais se traduzem anualmente em prejuízos sérios quer ao nível ambiental quer sócio-económico (Granged et al. 2011, Pausas e Fernández-Muñoz 2011). No que respeita a Portugal, o país europeu com o maior número de ocorrências de incêndios (614 228 ocorrências de 1980 a 2012; JRC 2013), registou-se na última década uma média de 140 000 ha de área ardida por ano (ICNF 2014; Figura 1). Em Portugal, a área ardida compreende sobretudo povoamentos de eucalipto, pinheiro bravo e matos, correspondendo aos tipos de povoamentos florestais mais propensos aos incêndios (Moreira et al. 2010, ICNF 2014). Neste contexto, e considerando os futuros cenários de alterações climáticas, os quais preveem uma maior duração da estação seca e o aumento das temperaturas de Verão extremas (IPCC 2013, Pinol et al. 1998), é de esperar que a ocorrência de incêndios florestais seja exacerbada com óbvios prejuízos e impactos a vários níveis.

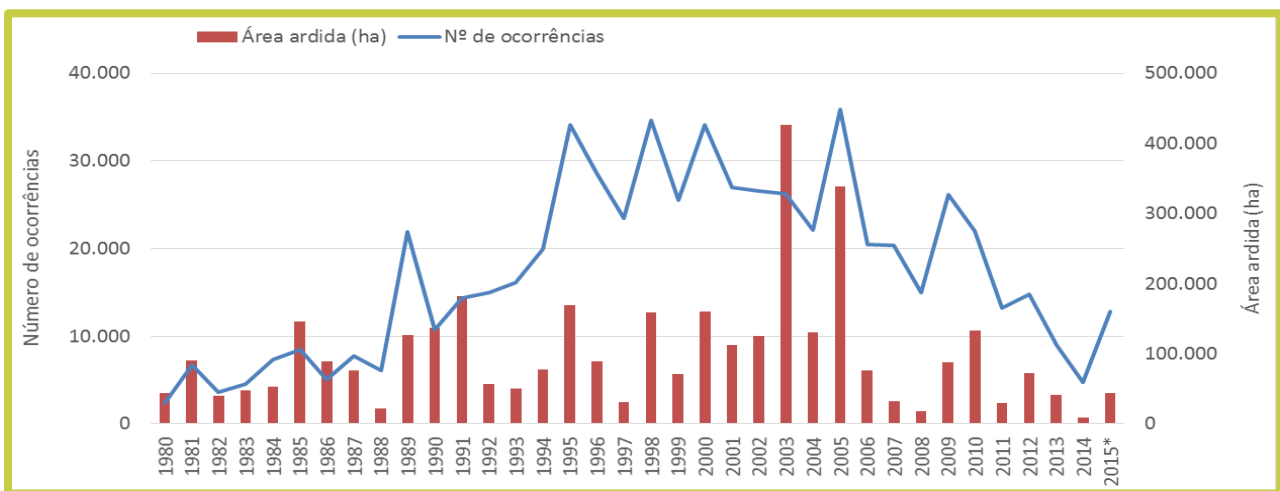


FIGURA 1: Evolução no número de incêndios florestais e na área ardida em Portugal continental de 1980 a 2015. O símbolo de * indica que os valores apresentados para o ano de 2015 são referentes ao período de 01 de Janeiro a 17 de Agosto, data após a qual não existe mais informação disponível. Fonte: ICNF 2014.

A nível ambiental, os efeitos adversos dos incêndios florestais estendem-se a vários componentes: solo, água, ar e biota. De um modo geral, o efeito mais notório dos incêndios revela-se ao nível da flora, pela alteração ou eliminação parcial/completa da vegetação (manta morta, vegetação arbórea e arbustiva). Ao nível da fauna, e enquanto efeitos diretos e imediatos do incêndio, podem ocorrer lesões ou mesmo a morte de alguns organismos, caso estes não revelem capacidade de fuga eficiente. Efeitos a longo prazo integram alterações nos recursos como por exemplo a fragmentação e degradação do habitat e alterações na quantidade/qualidade de alimento disponível (Moreira et al. 2010). No solo, e dependendo das temperaturas atingidas no incêndio, pode ocorrer mineralização da matéria orgânica, existe formação de uma camada hidrofóbica e ocorrem alterações na porosidade, na capacidade de infiltração e no armazenamento da água. Como resultado da perda da vegetação, o solo encontra-se mais exposto e com uma maior vulnerabilidade aos processos erosivos (Certini 2005 e Jung et al. 2009). O regime hidrológico é afetado indiretamente pelas alterações ao nível da vegetação e solo, registando-se menor evaporação e sobretudo maiores volumes de escorrência superficial em área ardidas face a áreas não ardidas (Moreira et al. 2010). Entre os vários impactos dos incêndios florestais destaca-se ainda a poluição atmosférica, pelas emissões de gases

tóxicos, tais como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), e de gases promotores de efeito de estufa, tais como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso (Lavorel et al. 2007, Martins et al. 2009, Smith et al. 2011). Os incêndios florestais podem ainda ser encarados como uma fonte de poluição difusa para os sistemas aquáticos que se encontrem a jusante de zonas ardidas, na medida em que são responsáveis pela produção e/ou remobilização de compostos com potencial tóxico, nomeadamente HAPs e metais. Quer os metais quer os HAPs são substâncias que, a partir de determinadas concentrações, apresentam elevada toxicidade para os seres vivos, possuem potencial para serem bioacumuláveis e elevada persistência ambiental (Manoli e Samara 1999). Estas substâncias pirolíticas, através de escoamentos superficiais (outros meios de transporte incluem lixiviação e deposição atmosférica), podem atingir os sistemas aquáticos adjacentes à área ardida, comprometendo a qualidade da água e afetando o biota aquático (Smith et al. 2011, Pereira e Úbeda 2010). De facto, são vários os estudos sobre os impactos dos incêndios em organismos aquáticos, com enfoque em grupos particulares como o fitoplâncton (Charette e Prepas 2003), perifiton (Minshall et al. 1995), macro invertebrados (Earl e Blinn 2003), anfíbios (Pilliod et al. 2003) e peixes (Rinne 1996). Deste modo, torna-se imperativo a correta avaliação dos efeitos dos incêndios florestais nos sistemas aquáticos já que estes podem ser responsáveis por alterações drásticas e imediatas na estrutura e funcionamentos dos ecossistemas.

A avaliação de efeitos dos incêndios florestais através de ensaios ecotoxicológicos laboratoriais

Os testes ecotoxicológicos laboratoriais permitem avaliar a resposta de organismos face à exposição a substâncias tóxicas. De uma forma simplificada, a resposta biológica pode ser avaliada recorrendo a testes de toxicidade aguda, testes de curta duração em que são avaliados parâmetros mais severos, sobretudo a letalidade; ou em testes de toxicidade crónica, em que a exposição ao tóxico é mais prolongada e não compromete a sobrevivência do organismo, resultando em efeitos sub-letais, tais como efeitos na reprodução ou crescimento. A realização de testes ecotoxicológicos permite o estabelecimento de relações dose (concentração)-resposta bem como relações causa-efeito. Deste modo, estes ensaios são uma ferramenta indispensável à correta avaliação dos impactos de tóxicos no ambiente.

No caso da avaliação dos efeitos dos incêndios florestais nos ecossistemas aquáticos, o objeto de teste é, numa primeira fase, uma matriz complexa de substâncias originadas no processo de combustão da vegetação e solo. Esta matriz representará o que chegará ao compartimento aquático numa zona ardida, fundamentalmente através das escoamentos promovidas pelas primeiras chuvas pós-fogo. Têm sido realizados estudos que analisam a toxicidade das escoamentos propriamente ditas (Campos et al. 2012). Campos et al. (2012) observaram a existência de efeitos tóxicos em espécies aquáticas de produtores primários como a alga verde *Raphidocelis subcapitata* e a macrófita *Lemna minor*. A disponibilidade das escoamentos propriamente ditas para este tipo de ensaios pode ser um fator limitante. De facto, para as recolher é necessário que seja feita a instrumentalização de uma bacia hidrográfica numa zona recentemente ardida e antes das primeiras chuvas. A figura 2 mostra o processo de instrumentalização ao nível de uma encosta ardida e a composição de um sistema de recolha de escoamentos instalado na zona de Talhadas (Sever do Vouga), área de estudo do projecto FIRETOX - Efeitos tóxicos dos incêndios florestais nos sistemas aquáticos. O sistema é composto por uma parcela aberta conectada a tanques de 250 ou 500 L que recolhem a escoamento. A logística deste tipo de sistemas é exigente e por isso, tipicamente as amostras de escoamento são de disponibilidade reduzida. Alternativamente, as cinzas do

próprio incêndio podem ser tratadas de forma a produzir em laboratório amostras que de alguma forma mimetizam as escorrências para ensaios ecotoxicológicos. Para isso, preparam-se extratos aquosos (*vide* sugestões metodológicas na secção seguinte deste artigo), adaptando uma metodologia normalizada que se utiliza na avaliação da toxicidade de sedimentos (USEPA 1991).



FIGURA 2: Sistema de recolha de cinzas e sedimentos (Z1 e Z3) e sistema de recolha de escorrências superficiais (Z2) instalados numa parcela ardida.

Silva et al. (in press) avaliou os efeitos associados a um incêndio de severidade moderada-alta em Vale de Cambra, no ano de 2011, testando esta matriz com vários organismos dulçaquícolas. Os ensaios ecotoxicológicos revelaram que os extractos aquosos inibiram o crescimento dos produtores primários *R. subcapitata* e *L. minor* e a luminescência da bactéria *Vibrio fischeri*. Já considerando um nível trófico superior, os extratos aquosos não causaram efeitos agudos (imobilização) em neonatos de cladóceros *Daphnia magna*.

O presente artigo congrega dois objetivos essenciais. Por um lado, pretende-se dar a conhecer a problemática dos efeitos nefastos dos incêndios florestais ao nível do compartimento aquático, o que contribui para a sensibilização da sociedade em geral para a necessidade de adotar comportamentos e medidas de prevenção dos incêndios florestais. Por outro lado, afirma-se como uma proposta de uma atividade prática experimental, contextualizada neste tema, que pode ser facilmente reproduzida com os equipamentos e recursos disponíveis nas escolas do Ensino Básico e Secundário.



ATIVIDADE PRÁTICA DE CARIZ EXPERIMENTAL – avaliação dos efeitos de extratos aquosos de cinzas na planta aquática *Lemna minor*

Notas introdutórias

Esta atividade é centrada na realização de um ensaio ecotoxicológico com a planta aquática *Lemna minor*. Trata-se de um ensaio de curta duração, mas que avalia parâmetros tipicamente sub-letais associados ao

crescimento da planta. *Lemna minor* (Figura 3), de nome comum lentilha-de-água, é uma espécie de plantas aquáticas com uma ampla distribuição, de rápido crescimento e pequeno tamanho e que apresenta elevada sensibilidade a muitos dos tóxicos que atingem os ecossistemas aquáticos. Esta macrófita está na base da cadeia alimentar aquática, enquanto produtora primária, sendo também co-responsável pela



FIGURA 3: Colónias de *Lemna minor* no campo.

produção de oxigénio e servindo ainda de abrigo a outros organismos, sobretudo a organismos zooplancónicos. A nível experimental, reúne uma série de características que a tornam num bom organismo-modelo (Wang 1990): ciclo de vida rápido e profícuo com tempo de duplicação típico de 2 dias; reprodução assexuada predominante por propagação vegetativa, o que permite controlar a variabilidade nas respostas porque anula a variabilidade genética dentro da população testada; é uma espécie de fácil cultivo, crescendo facilmente em meios de cultura sintéticos; o seu tamanho permite que seja manejada facilmente e sem necessidade de recurso a

instrumentos de ampliação. Adicionalmente, os ensaios ecotoxicológicos com esta espécie são simples, relativamente rápidos (7 dias é a duração típica de um ensaio de crescimento) e com pouca exigência logística (Radić et al. 2010, Wang 1990). Esta atividade em particular tem como objetivo avaliar a toxicidade de escorrências de incêndios florestais nos ecossistemas aquáticos, através de um teste de inibição de crescimento da macrófita *Lemna minor*.

Recolha de *Lemna minor* e manutenção de culturas em Laboratório

As colónias de *L. minor* podem ser cedidas a partir de uma cultura laboratorial disponível em algumas instituições de Ensino Superior e investigação nacionais, ou mesmo recolhidas no campo, em qualquer massa de água em que estas apresentem um aspeto saudável (sem lesões, necroses ou contaminações) e em que não sejam conhecidas fontes de poluição. Uma vez em laboratório, as colónias devem ser transferidas, em condições o mais assépticas possível, para um recipiente de vidro previamente esterilizado (120 °C durante 20 minutos) que contenha meio de cultura. Um dos meios de cultura sintéticos mais utilizados para manter e testar *L. minor* é o meio Steinberg. Trata-se de um meio bastante rico (ver composição e modo de preparação na Tabela I), que fornece todos os nutrientes necessários ao crescimento ótimo da espécie em culturas com densidade devidamente otimizada e controlada.

TABELA I: Composição e modo de preparação do meio Steinberg (Fonte: OECD, 2006).

	Soluções stock	mg/L
Macro elementos	1-KNO ₃	17500
	KH ₂ PO ₄	4500
	K ₂ HPO ₄	630
	2-Mg ₂ SO ₄ .7H ₂ O	5000
	3- Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	14750
Micro elementos	4-H ₃ BO ₃	120
	5-ZnSO ₄ .7H ₂ O	180
	6-Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	44
	7-MnCl ₂ .4H ₂ O	180
	8-FeCl ₃ .6H ₂	760
	EDTA Dissódico Di-hidratado	1500

Na impossibilidade de produzir este meio de cultura, poderá utilizar-se água de um poço ou de um ribeiro que se saiba não estar contaminado, quer para a manutenção, quer para os ensaios propriamente ditos; nestas condições pode ser necessário fazer ajustes na rotina de manutenção de culturas, já que pode haver limitação de alguns nutrientes na água que de alguma forma retardem o crescimento das plantas. O(s) recipiente(s) de cultura deve(m) ser coberto(s) com uma rolha de algodão envolta em gaze, permitindo as

trocas gasosas e evitando evaporação e a contaminação (p.ex. com esporos de microrganismos que possam estar suspensos na atmosfera do laboratório). Esta cultura deve ser mantida por algumas semanas antes da realização do teste, período pelo que se deve realizar a renovação semanal do meio de cultura (ver figura 4 para algumas orientações adicionais). Para um crescimento ótimo, as culturas devem ser mantidas a 23 ± 1 °C e sob 16 horas de luz por dia com uma intensidade média de 8500 lux. Mais uma vez estas condições podem ser adaptadas ajustando a rotina de manutenção e eventualmente a duração total do ensaio. Para cada litro de meio Steinberg a preparar, adicionar 20 mL das soluções 1, 2 e 3 e 1 mL das soluções 4, 5, 6 e 7 a água destilada. Perfazer o volume e autoclavar o meio (120° C durante 20 minutos). Após autoclavar o meio adicionar 1 mL da solução 8.

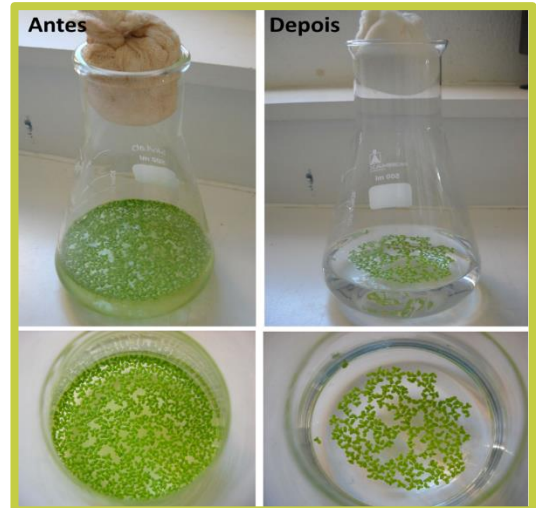


FIGURA 4: Recipiente de cultura de *Lemna minor* aquando da mudança semanal do meio de cultura.

Recolha e preparação da amostra a testar: Extratos Aquosos de Cinzas (EAC)

Após um incêndio florestal deverá proceder-se à recolha de cinzas para sacos de plástico, que devem ser fechados e preservados no frigorífico. Caso a experiência não possa ser realizada nos dias seguintes à recolha das cinzas, é aconselhável o seu congelamento até o teste poder ser iniciado. As cinzas deverão ser adicionadas ao meio de cultura que se utiliza para manter as plantas no laboratório e no ensaio propriamente dito, numa proporção de 1:4 (v/v), em recipientes de vidro com as dimensões adequadas (p.ex. matrizes do tipo Erlenmeyer de 500 mL são adequados para uma mistura que resulte num volume final de 300 mL). Estes recipientes devem ser envolvidos com papel de alumínio para evitar eventos de foto degradação e colocados em agitação num agitador orbital (200 rpm por duas horas¹). Após agitação dos recipientes deve proceder-se à sedimentação (é aconselhado um período de repouso dos recipientes de 12 horas) e decantação das cinzas. O líquido decantado - designado como extrato aquoso de cinzas - deve ser guardado no frigorífico até o início do teste por um período máximo de 24 horas.

Teste de inibição de crescimento de *Lemna minor* (adaptado da norma 221 da OCDE; OECD 2006)

• Desenho experimental:

O ensaio deverá ser realizado em erlenmeyers/recipientes de vidro (tipo frascos de compota) estéreis/descontaminados (autoclavados a 120°C durante 20 min). Estes devem ter um volume superior a 100 mL e largura suficiente para que não haja sobreposição de colónias de lemnas. Sugere-se testar o extrato aquoso de cinzas (EAC) e quatro diluições do mesmo no meio de teste (75% EAC, 50% EAC, 25% EAC e 12.5% EAC em meio Steinberg ou na água alternativa usada nas culturas; ver preparação na tabela II), cumprindo um volume final de solução de teste de 100 mL. Em cada teste deverá ainda ser estabelecido ainda um controlo, onde as plantas serão colocadas em meio limpo. Cada uma destas concentrações deverá ser replicada pelo menos três vezes. A partir da cultura estabelecida devem transferir-se para cada um dos erlenmeyers preparados para o teste, com o auxílio de um pinça metálica, três colónias de três

¹ Na impossibilidade de utilizar um agitador orbital, a agitação dos recipientes poderá ser feita com agitador magnético ou por agitação manual vigorosa durante cerca de 5 minutos, até se obter uma distribuição uniforme.

frondes² (número de frondes (NF) inicial por erlenmeyer = 9) ou de quatro frondes caso estas sejam mais abundantes na cultura (NF=12). Os recipientes de teste também devem ser tapados com rolhas de algodão e gaze (Figura 5).

No início do teste, devem ainda ser retirados da cultura três conjuntos de três colónias com três frondes (ou de quatro frondes, caso se tenha optado por usar colónias de quatro frondes para o teste). Estas colónias (incluindo as raízes) devem ser secas (60 °C, 12 horas) e pesadas de modo

TABELA II: Preparação dos vários tratamentos sugeridos para o teste.

Tratamento	Volume Meio de cultura (mL)	Volume EAC (mL)
Controlo	100	0
12.5% EAC	87.5	12.5
25% EAC	75	25
50% EAC	50	27
75% EAC	25	75
AEC	0	100

a obter-se o peso seco inicial. As condições de temperatura e fotoperíodo do teste devem manter-se iguais às da manutenção de culturas (p.ex. 23 ± 1 °C; 16 horas luz: 8 horas escuridão).

O teste de inibição de crescimento tem uma duração de 7 dias e após este período, o número de frondes por frasco deve ser contabilizado e o peso seco deve ser determinado. O critério de definição de fronde deve ser mantido em todo o teste. Para a determinação do peso seco, as colónias devem ser limpas com água destilada, secas (60 °C, 12 horas) e pesadas.



FIGURA 5: Exemplo do *apparatus* de um ensaio de inibição de crescimento em *Lemna minor*.

• **Pârametros a calcular:**

O incremento de biomassa (y) é expresso como o aumento da variável de crescimento durante o período de exposição. Para cada uma das variáveis de crescimento em estudo - número de frondes e peso seco - deve então ser aplicada a seguinte fórmula:

$$y (i - f) = Nf - Ni$$

Em que:

Ni = medida da variável de crescimento em cada réplica dos vários tratamentos (controlo e várias concentrações de EAC) no início do teste.

Nf = medida da variável de crescimento em cada réplica dos vários tratamentos (controlo e várias concentrações de EAC) no final do teste.

² Fronde = mínima estrutura individualizada, folha.

A taxa de crescimento específico (μ) é expressa como o aumento logarítmico (portanto, linear) da variável de crescimento durante o período de exposição, e é determinada através da seguinte fórmula:

$$\mu (i - f) = (\ln(Nf) - \ln(Ni))/t$$

Em que:

Ni = medida da variável de crescimento em cada réplica dos vários tratamentos (controle e várias concentrações de EAC) no início do teste.

Nf = medida da variável de crescimento em cada réplica dos vários tratamentos (controle e várias concentrações de EAC) no final do teste.

t = período de duração do teste (dias).

A inibição de incremento de biomassa (Iy) ou a inibição da taxa de crescimento específico ($I\mu$) para cada réplica dos tratamentos com EAC expressa a comparação entre os valores médios de y ou de μ obtidos no controle e os valores de y e de μ obtido em cada réplica. A inibição no crescimento para cada uma das variáveis é calculada pela aplicação das seguintes fórmulas:

$$\% Iy = \frac{y \text{ controle} - y \text{ tratamento EAC}}{y \text{ controle}} \times 100$$

$$\% I\mu = \frac{\mu \text{ médio controle} - \mu \text{ tratamento EAC}}{\mu \text{ controle}} \times 100$$

Em geral, os dados obtidos são graficamente apresentados utilizando a média da taxa de crescimento específico e/ou a média do incremento da biomassa verificada em cada tratamento experimental (a figura 6 apresenta um exemplo de apresentação deste tipo de dados). À média deve ser associada uma medida de dispersão, sendo geralmente apresentado o erro padrão³. Frequentemente estima-se ainda a concentração a que se prevê induzir x% de efeito (CE_x ; o valor mais comum para x é 50%, resultando no estabelecimento do CE_{50}), neste caso x% de inibição de crescimento da macrófita. Para o efeito, ajusta-se um modelo matemático aos dados de inibição obtidos e estima-se o valor de x (concentração) a partir do valor de y, que é conhecido ($y=50$), a partir da resolução da equação que traduz esse mesmo modelo matemático. Mais detalhes sobre os cálculos associados à determinação destes parâmetros são apresentados em Pereira et al. (2009) e em Marques et al. (2009).

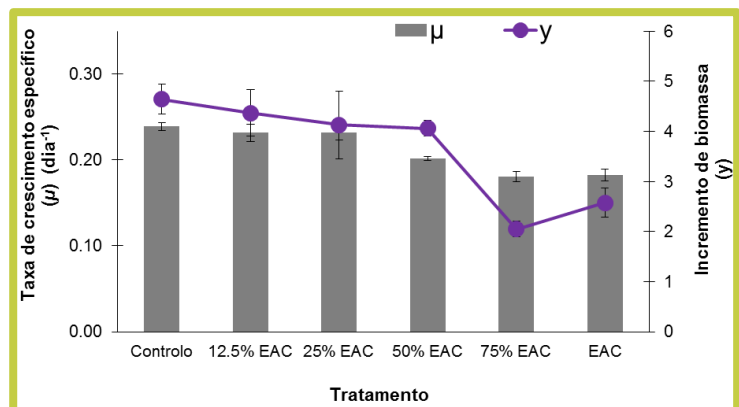


FIGURA 6: Taxa de crescimento específico (μ) e incremento da biomassa (y) de *Lemna minor* após sete dias de exposição a extratos aquosos de cinzas (EAC). As barras de erro representam o erro padrão.

³ O erro padrão tende a ser a medida de dispersão apresentada neste tipo de dados pois representa a incerteza associada à estimativa da média na população. O cálculo deste parâmetro tem em conta o desvio padrão, medida de variabilidade das observações em relação à média, e o tamanho da população.



Resultados e conclusões esperados

Em conformidade com os resultados obtidos em Campos et al. (2012), em que se expôs esta mesma espécie de macrófita a escorrências naturais provenientes de uma área ardida (povoamento de eucaliptos) e com os dados de Silva et al. (in press), em que as escorrências foram geradas em laboratório através de extratos aquosos de cinzas (recolhidas após um incêndio em povoamento misto de pinheiro e eucalipto) preparados conforme se sugere neste artigo, é expectável que o crescimento da macrófita seja inibido na presença de EAC e que este efeito inibitório seja mais forte nas concentrações de EAC mais elevadas. Tendo em conta que esta espécie se mantém à superfície da água, os efeitos observados no crescimento de *L. minor* dever-se-ão à toxicidade dos elementos que possam estar presentes na matriz testada (geralmente hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais de acordo com os dados de Silva et al. (in press) e não, por exemplo, à limitação de luz (pela entrada de sedimentos e cinzas no sistema), o que pode ser um fator a ter em conta quando se testa o efeito deste tipo de matrizes em organismos produtores que estão suspensos na coluna de água (p.ex. microalgas verdes). Efeitos nefastos dos extratos aquosos de cinzas no crescimento de *L. minor* levantam preocupações sobre possíveis impactos dos incêndios florestais no equilíbrio dos ecossistemas aquáticos, uma vez que a contaminação por escorrências superficiais provenientes de áreas ardidas (ricas em HAPs e metais) pode comprometer a base da cadeia alimentar e as funções desempenhadas por estes organismos (produção de oxigénio e reciclagem de nutrientes).

agradecimentos • Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto de investigação FIRETOX - Efeitos tóxicos dos incêndios florestais nos sistemas aquáticos (PTDC/AAG-GLO/4176/2012). Joana Pereira é financiada por uma bolsa atribuída pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, comparticipada pelo Fundo Social Europeu e por fundos nacionais do MEC (SFRH/BPD/101971/2014).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campos I, Abrantes N, Vidal T, Gonçalves F, Keizer J (2012). Assessment of the toxicity of ash-loaded runoff from a recently burnt eucalypt plantation. *Eur. J. For. Res.* 131:1889 - 1903.
- Certini G (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143: 1-10.
- Charette T, Prepas EE (2003). Wildfire impacts on phytoplankton communities of three small lakes on the Boreal Plain, Alberta, Canada: a paleolimnological study. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 60: 584 - 593.
- Earl SR, Blinn DW (2003). Effects of wildfire ash on water chemistry and biota in South-Western USA streams. *Freshwater Biology* 48: 1015 -1030.
- Granged AJP, Zavala LM, Jordán A, Bárcenas-Moreno G (2011). Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: A 3-year study. *Geoderma* 164: 85-94.
- ICNF - Instituto de Conservação da Natureza e Florestas (2015). 5º Relatório provisório de Incêndios Florestais 2016 - 01 de Janeiro a 15 de Agosto. Departamento de Gestão de Áreas Classificadas, Públicas e de Proteção Florestal, 10 pp.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V and Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- JRC- Joint Research Centre (2013). Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2012. Joint Research Centre technical reports of the European Commission. Institute for Environment and Sustainability, 109 pp, doi:10.2788/58397.

- Jung HY, Hogue TS, Rademacher LK, Meixner T (2009). Impact of wildfire on source water contributions in Devil Creek, CA: evidence from end-member mixing analysis. *Hydrological Processes* 23: 183 - 200.
- Lavorel S, Flannigan MD, Lambin EF, Scholes MC (2007). Vulnerability of land systems to fire: Interactions among humans, climate, the atmosphere, and ecosystems. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 12: 33 - 53.
- Marques CR, Pereira R, Antunes SC, Cachada A, Duarte AC, Gonçalves F. (2009) Estudo in situ do efeito de herbicidas numa microalga. *CAPTAR* 1 (1): 113-126.
- Martins V, Miranda AI, Carvalho A, Schaap M, Borrego C. (2009). Impacto dos Incêndios Florestais na Qualidade do Ar em Portugal no Período 2003-2005. *Silva Lusitana* 17(2): 219 - 239.
- Manoli E, Samara C (1999). Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters: sources, occurrence and analysis. *Trends Anal. Chem.* 18: 417 - 428.
- Minshall GW, Robinson CT, Royer TV, Rushforth SR (1995). Benthic community structure in two adjacent streams in Yellowstone National Park 5 years after the 1988 wildfires. *Great Basin Nat.* 55: 193 - 200.
- Moreira F, Catry FX, Silva JS, Rego F (2010). *Ecologia do fogo e gestão de áreas ardidas*. Isapress, Lisboa, 323 pp.
- OECD (2006). *Lemna* sp. growth inhibition test. OECD Guidelines for Testing of Chemicals 221. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264016194-en>.
- Pausas JG, Fernández-Muñoz S (2011). Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Clim. Chang.* 110: 215 - 226.
- Pereira JL, Gonçalves Fernando (2009). A expressão genética como ferramenta de avaliação de impactos da poluição por pesticidas em sistemas aquáticos. *CAPTAR* 1 (1): 40-53.
- Pereira P, Úbeda X (2010). Spatial distribution of heavy metals released from ashes after a wildfire. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 18: 13-22.
- Pilliod, D.S., Bury, R.B., Hyde, E.J., Pearl, C.A., Corn, P.S., 2003. Fire and amphibians in North America. *For. Ecol. Manag.* 178:163 - 181.
- Pinol J, Terradas J, Lloret F (1998). Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic Change* 38: 345 - 357.
- Radić S, Stipaničev D, Cvjetko P, Mikelić IL, Rajčić MM, Širac s, Pevalek-Kozlina B, Pavlica M (2010). Ecotoxicological assessment of industrial effluent using duckweed (*Lemna minor* L.) as a test organism. *Ecotoxicology* 19(1): 216 - 222.
- Rinne JN (1996). Short-term effects of wildfire on fishes and aquatic macroinvertebrates in the southwestern United States. *N. Am. J. Fish Manag.* 16: 653 - 658.
- Silva V, Pereira JL, Campos I, Keizer JJ, Gonçalves F, Abrantes N (2014). Toxicity assessment of aqueous extracts of ashes from forest fires. *Catena*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.021>.
- Smith HG, Sheridan GJ, Lane PNJ, Nyman P, Haydon S (2011). Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. *Journal of Hydrology* 396: 170 - 192.
- USEPA - US Environmental Protection Agency (1991). Evaluation of dredged material proposed for ocean disposal testing manual. EPA 503/8-91/001.
- Wang W (1990) Literature review on duckweed toxicity testing. *Environ. Res.* 52: 7 - 22.