



# CAPTAR

ciência e ambiente para todos

volume 8 • número 2 • p 1-12

## Avaliação da exposição da vinha duriense ao ozono em clima presente e futuro

O ozono ( $O_3$ ) troposférico é um gás que pode danificar severamente a vegetação. Vários estudos identificam o efeito do  $O_3$  na perda de produtividade de campos agrícolas e na redução da qualidade de produtos vegetais e frutícolas. Este artigo foca-se na Região Demarcada do Douro, uma importante região vitivinícola portuguesa, e tem como objetivo a avaliação da exposição da vinha ao  $O_3$  troposférico, mediante a aplicação do sistema de modelação da qualidade do ar WRF-CHIMERE para clima presente, futuro a médio prazo e futuro a longo prazo. O indicador de exposição AOT40 (concentração acumulada de  $O_3$  acima de 40 ppb) foi calculado para o intervalo de tempo estabelecido na legislação portuguesa (maio a julho), assim como os níveis de deposição seca acumulada para o mesmo período. Aplicaram-se também funções exposição-resposta, baseadas na literatura, para estabelecer o risco de exposição das vinhas ao  $O_3$  em termos de produtividade e qualidade. Os resultados do modelo indicam que o valor-alvo estabelecido pela Comissão Europeia para a proteção da vegetação é excedido em toda da região do Douro, no presente e no futuro, e que o ozono pode estar a provocar danos diretos nas vinhas e potencialmente a diminuir o seu rendimento e qualidade.

### Palavras-chave

ozono troposférico  
alterações climáticas  
modelação da qualidade do ar  
deposição seca  
indicadores de exposição  
vinha

Ana Isabel Miranda<sup>1\*</sup>

Ana Ascenso<sup>1</sup>

Carlos Silveira<sup>1</sup>

Daniel Blanco-Ward<sup>1</sup>

Carla Gama<sup>1</sup>

Alexandra Monteiro<sup>1</sup>

Carolina Viceto<sup>2</sup>

Alfredo Rocha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CESAM & Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Portugal.

<sup>2</sup> CESAM & Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Portugal.

\* miranda@ua.pt



## INTRODUÇÃO

O ozono ( $O_3$ ) troposférico é um poluente atmosférico que pode danificar severamente a vegetação. Trata-se de um poluente atmosférico secundário, i.e., não é emitido diretamente para atmosfera, resultando de reações fotoquímicas entre compostos precursores, sendo a sua produção favorecida em períodos de elevada temperatura e insolação (Seinfeld e Pandis, 2006). A vegetação é simultaneamente uma fonte de precursores e um consumidor de ozono. Os precursores de ozono emitidos são, por exemplo, compostos orgânicos voláteis (COV), e o ozono é removido através da absorção pelos estomas, por deposição seca<sup>1</sup>.

Os efeitos fisiológicos da absorção de ozono pela vegetação manifestam-se através da redução da fotossíntese, aumento do envelhecimento ao nível celular e através de danos nos processos reprodutivos (Ainsworth et al., 2012), potenciando um aumento da suscetibilidade a doenças, uma diminuição do crescimento e da capacidade reprodutiva das plantas, bem como a perda de biodiversidade. Por conseguinte, os níveis elevados de ozono podem conduzir à perda de produtividade e qualidade dos campos agrícolas, e consequentemente, a elevadas perdas económicas (Avnery et al., 2011a; Black et al., 2000; Feng et al., 2008).

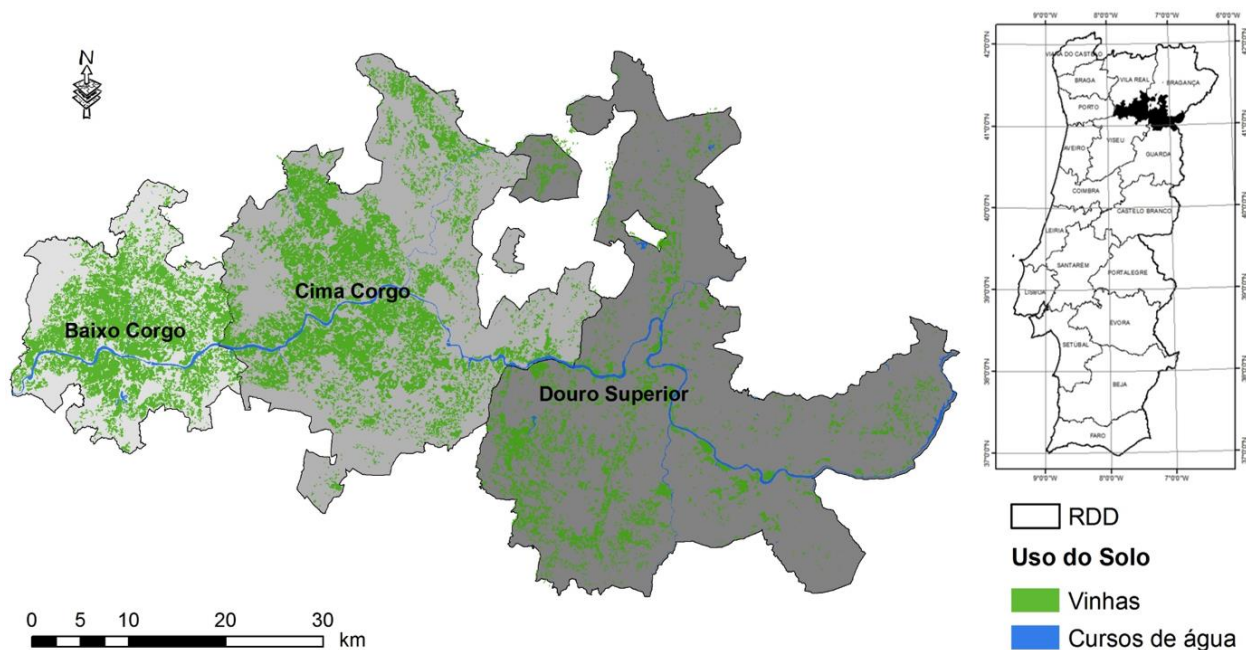
A assimilação de ozono pelos estomas depende de vários fatores ambientais, tais como a temperatura, precipitação, concentração de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) na atmosfera e disponibilidade de azoto (Ainsworth et al., 2012). Em condições meteorológicas muito quentes e secas, que proporcionam níveis elevados de ozono, o fluxo estomático é mínimo (Emberson et al., 2000). Ao estudar os efeitos do  $O_3$  na vegetação é necessário contemplar não só as concentrações de ozono, que determinam a exposição das culturas, mas também a deposição de ozono na vegetação, que condiciona a entrada do ozono via estomas (Pleijel et al., 2007).

A produção de vinho em Portugal é uma atividade económica de elevada importância. Das regiões portuguesas produtoras de vinho destaca-se a Região Demarcada do Douro (RDD), onde é produzido o famoso Vinho do Porto, que representa mais de 60% do valor total das exportações de vinho em Portugal (Santos et al., 2011). A RDD é a região vitivinícola demarcada e regulamentada mais antiga do mundo. Foi criada em 1756 quando o Marquês de Pombal instituiu a Companhia Geral da Agricultura das Vinhas do Alto Douro. Em 2001, o Alto Douro Vinhateiro foi classificado pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, na sigla inglesa) como Património Mundial da Humanidade, pela sua “paisagem cultural, evolutiva e viva”. Situada no nordeste de Portugal, na bacia hidrográfica do Douro, a RDD abrange 21 concelhos dos distritos de Bragança, Vila Real, Guarda e Viseu (Bateira et al., 2011), encontrando-se dividida em 3 sub-regiões: o Baixo Corgo, o Cima Corgo e o Douro Superior (Figura 1).

A sua localização em vales profundos proporciona à RDD as condições gerais que determinam uma aptidão climática para a viticultura (temperaturas entre os 12 e 22°C), com uma temperatura média durante o ciclo vegetativo de 17,8°C (Jones, 2013; Santos et al., 2011). A precipitação, distribuída assimetricamente, decrece no sentido Baixo Corgo – Douro Superior e apresenta uma mediana anual de 950 mm (Jones, 2013).

---

<sup>1</sup> A deposição a seca é o processo pelo qual partículas ou gases atmosféricos são transferidos para superfícies. A deposição seca de gases é calculada segundo três resistências, sendo uma delas a resistência da canópis que considera a absorção dos gases por parte das plantas.



**FIGURA 1:** Limite e localização da Região Demarcada do Douro.

As três sub-regiões diferem em termos climáticos, o Douro Superior apresenta o clima mais mediterrânico, enquanto nas restantes sub-regiões é visível a influência do Oceano Atlântico. O Baixo Corgo, embora seja a sub-região mais pequena é a que detém a maior área de vinha, sendo também considerada a região mais fértil, devido à elevada precipitação e à natureza da rocha-mãe (Magalhães, 2012). O Cima Corgo é caracterizado por um clima húmido a seco, com moderado excesso de água no inverno. O Douro Superior é a maior das sub-regiões, mas a que apresenta menor percentagem de área cultivada de vinha, devido ao seu clima semi-árido. A Região engloba 250 mil hectares de superfície total, com 43 mil hectares de vinha para produzir dois tipos de vinhos: Porto e Douro (IVV, 2016).

Ao verão quente, na região do Douro, associam-se níveis elevados de ozono no ar ambiente. Em contexto de alterações climáticas (AC), tais como as projetadas para o sul da Europa (EEA, 2018), esperam-se condições meteorológicas mais quentes e secas, que poderão contribuir para uma maior produção de ozono. Atendendo aos potenciais impactos negativos da exposição da vinha ao ozono e ao interesse económico da região, é importante conhecer a distribuição espaço temporal deste poluente na camada mais baixa da troposfera, em clima atual e em cenários de alteração climática, e perceber os seus efeitos nas vinhas durienses.

A modelação da qualidade ao ar apresenta-se como uma importante abordagem para estudar os impactos da exposição da vegetação ao ozono. Vários autores têm avaliado estes impactos em clima presente (Avnery et al., 2011b; Colette et al., 2007; Emberson et al., 2000) e futuro (Feng et al., 2008; Fuhrer, 2009; Klingberg et al., 2011). No entanto, ainda são poucos os estudos focados na videira e a disponibilidade de informação sobre funções exposição-resposta é reduzida (Ascenso, 2017). Este trabalho tem como objetivo avaliar o risco

de exposição da vinha duriense ao ozono troposférico, através da aplicação do modelo químico de transporte multi-escala CHIMERE, usando o modelo WRF para forçamento meteorológico<sup>2</sup>.

O presente artigo encontra-se dividido em 6 secções. Na secção seguinte é sucintamente descrita a metodologia para aplicação do sistema de modelação da qualidade do ar. A avaliação do sistema de modelação, por comparação entre os seus resultados e valores medidos, é apresentada na secção 3. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na secção 4 e 5, respetivamente. Por fim, são apresentadas sugestões de trabalho futuro.



## METODOLOGIA

Para estimar a concentração e deposição de ozono na Região Demarcada do Douro aplicou-se o modelo químico de transporte CHIMERE (Schmidt et al., 2001), usando como forçamento meteorológico os resultados do modelo WRF. Para além da meteorologia, são também necessários dados de entrada relativos a: inventário de emissões (antropogénicas e biogénicas), condições iniciais e fronteira, topografia e uso do solo. Informação mais detalhada sobre as parametrizações usadas pelo modelo pode ser encontrada em Ascenso (2017). A área da Região Demarcada do Douro foi simulada com uma resolução horizontal de 1 por 1 km<sup>2</sup>.

O sistema de modelação WRF-CHIMERE foi aplicado para o clima presente (2003; 2004; 2005), futuro a médio prazo (2049; 2064) e futuro a longo prazo (2096; 2097). As simulações futuras foram realizadas com base no cenário climático RCP8.5<sup>3</sup> (cenário mais gravoso). Os valores horários de concentração de O<sub>3</sub>, estimados pelo modelo para o ano 2004, foram comparados com os valores medidos em estações de monitorização de fundo (vide secção seguinte para a caracterização e localização destas estações), pois este ano é o que apresenta maior percentagem de dados medidos válidos.

Para poder avaliar isoladamente o efeito das alterações climáticas, estimou-se a concentração e deposição de ozono, considerando que as emissões atmosféricas no futuro se manteriam constantes em relação ao clima presente.

Os resultados foram avaliados através da aplicação do indicador de exposição acumulada AOT40, o indicador estabelecido na Diretiva Quadro da Qualidade do Ar (Diretiva 2008/507EC) para proteção da vegetação. O AOT40 é calculado como a soma da diferença entre os valores das concentrações horárias superiores a 80 µg/m<sup>3</sup> e o valor 80 µg/m<sup>3</sup>, entre as 8 e as 20 horas de cada dia, no período entre maio e julho. O valor-alvo de AOT40 para a proteção da vegetação é 18000 (µg/m<sup>3</sup>)·h.

Este indicador foi calculado para cada cenário e aplicado na avaliação do potencial dano em termos de produtividade e qualidade (percentagem de açúcar na uva). Esta análise foi feita através da aplicação das funções de exposição-resposta apresentadas por Soja et al. (2004) no seu estudo experimental de três anos

<sup>2</sup> O CHIMERE é um modelo euleriano que simula a dispersão e transporte de poluentes atmosféricos, assim como as reações químicas que ocorrem entre eles. Para tal, o modelo necessita de dados meteorológicos (forçamento meteorológico), como temperatura, precipitação e velocidade do vento, que neste trabalho foram fornecidas pelo modelo meteorológico WRF.

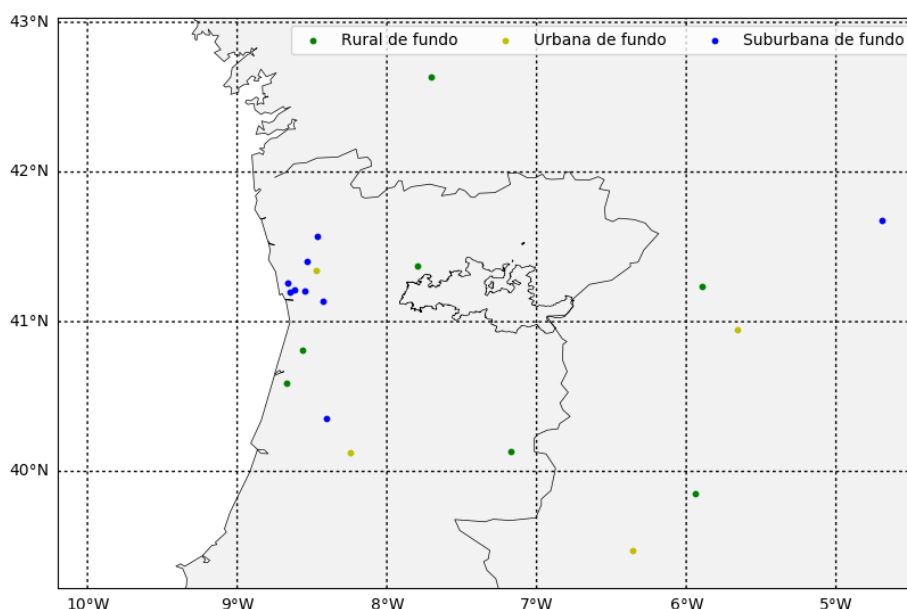
<sup>3</sup> “Representative Concentration Pathways” (RCP) são cenários/ trajetórias de concentração de gases com efeito de estufa, adotados pelo Painel Intergovernamental para as Alterações (IPCC). O RCP8.5 é o cenário que representa o maior forçamento radiativo (superior a 8,5 W/m<sup>2</sup>).

sobre os efeitos da exposição a longo prazo de videiras ao  $O_3$ . A função aplicada neste estudo representa a resposta da videira no terceiro ano consecutivo de exposição, que representa o maior dano na vinha. Os resultados do nível de deposição foram baseados no total de deposição seca de  $O_3$  acumulado de maio a julho, o mesmo período estabelecido para o cálculo do indicador AOT40.

## AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MODELAÇÃO

O desempenho do modelo foi avaliado para o ano 2004, recorrendo ao cálculo de vários parâmetros estatísticos: viés (BIAS); coeficiente de correlação ( $r$ ); e erro quadrático médio (EQM). O viés indica o desvio existente entre as concentrações simuladas e as medidas, em termos sistemáticos, permitindo tirar conclusões sobre a tendência dos erros cometidos pelo modelo; o seu valor ideal é zero. O coeficiente de correlação traduz a relação linear entre as concentrações simuladas e medidas, e fornece informação sobre a qualidade da reprodução dos processos físicos e químicos atmosféricos; o seu valor ideal é um. O EQM indica a magnitude dos erros da simulação; o seu valor ideal é zero.

O procedimento de validação consistiu em comparar os resultados da simulação com os valores medidos por estações de monitorização. As estações de monitorização da qualidade do ar constam da base de dados europeia de estações de qualidade do ar (AirBase) (EEA, 2014). Foram selecionadas estações de influência de fundo<sup>4</sup>, pois refletem melhor as variações dos níveis de ozono. A Figura 2 apresenta a localização das estações de monitorização selecionadas num raio de 200 km da RDD.



**FIGURA 2:** Mapa da localização das estações de monitorização da qualidade do ar usadas na validação do modelo de qualidade do ar.

<sup>4</sup> As estações de qualidade do ar são classificadas consoante a sua representatividade. As estações de fundo são as que não são influenciadas diretamente pelas emissões, do tráfego automóvel, nem por outras fontes de emissão locais.

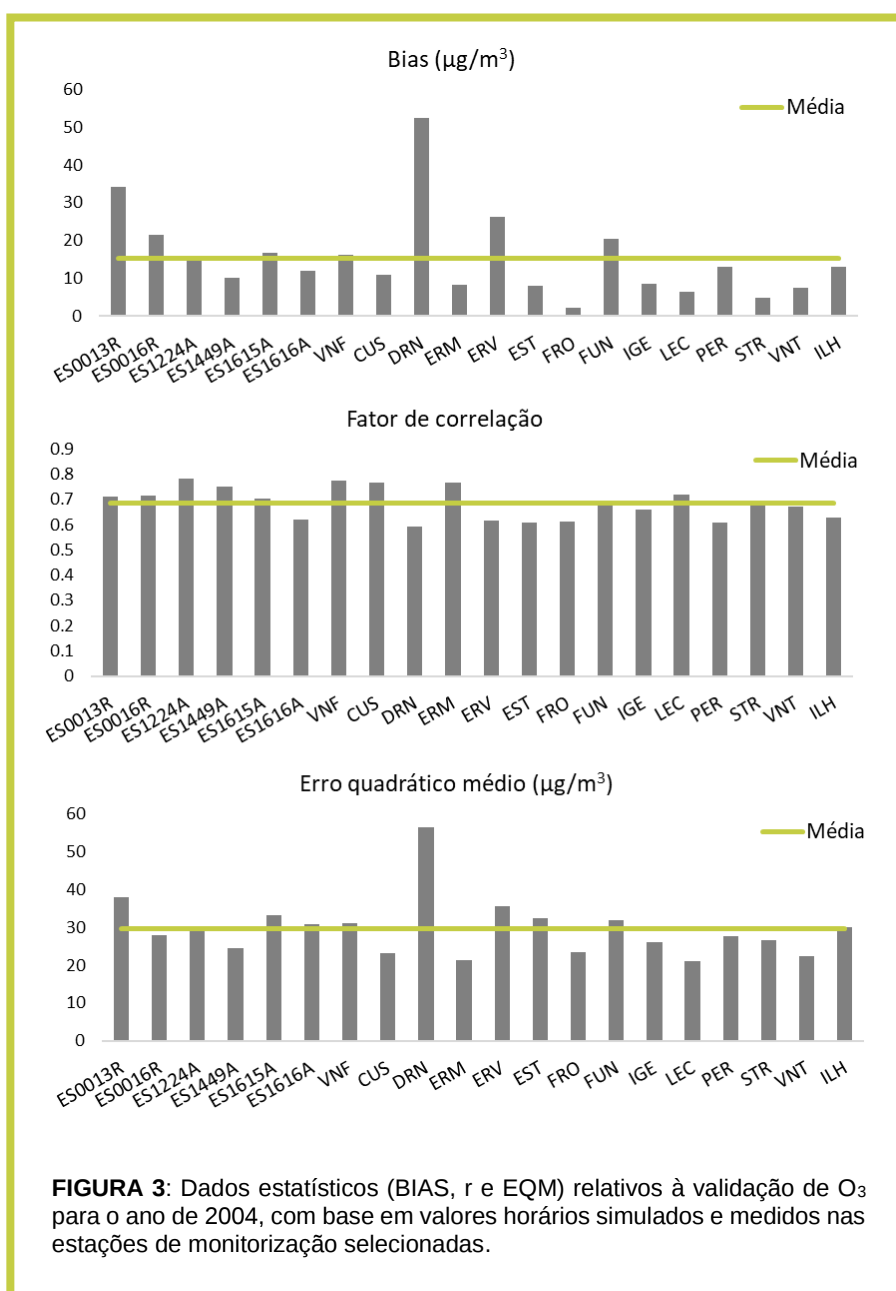
Os resultados dos parâmetros estatísticos calculados para as séries anuais de valores horários de ozono, simulados e medidos, estão compilados na Figura 3.

O coeficiente de correlação encontra-se entre 0,60 e 0,75, revelando que o modelo está a representar adequadamente a química e física do ozono, isto é, o modelo acompanha a variação temporal das concentrações medidas nas diversas estações. No entanto, é visível um enviesamento entre os valores medidos e simulados (BIAS médio de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), que se reflete também nos resultados de EQM (variam entre 21 e 56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Embora estes parâmetros sejam relativamente elevados, são semelhantes aos obtidos por outros estudos de simulação com o modelo CHIMERE (e.g. Monteiro et al., 2005).

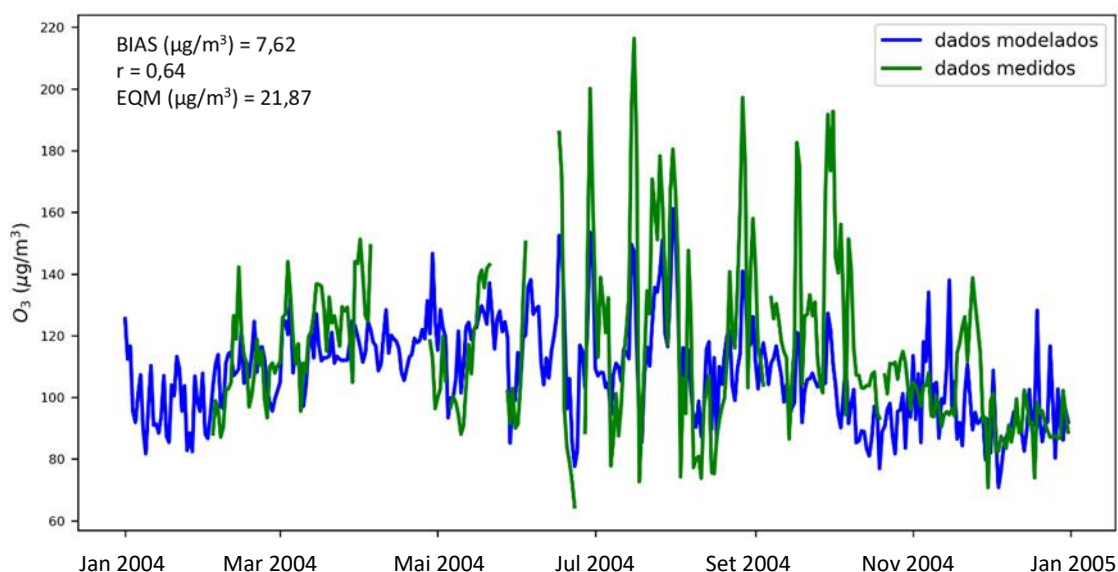
A estação de monitorização Douro Norte (rural de fundo) é a estação mais próxima da RDD e a que apresenta piores resultados, relativa-mente aos parâmetros esta-tísticos. Esta

estação é conhecida por reportar níveis elevados de  $\text{O}_3$ , que têm sido discutidos em vários estudos e que mostram a dificuldade em simular o seu comportamento (Borrego et al., 2016; Monteiro et al., 2012, 2015).

Para ilustrar a capacidade do modelo em representar os picos de ozono na proximidade da RDD, a Figura 4 apresenta a série temporal dos valores máximos diários das médias octo-horárias calculadas para o ano de 2004 nesta estação, para os dados medidos e modelados.



**FIGURA 3:** Dados estatísticos (BIAS, r e EQM) relativos à validação de  $\text{O}_3$  para o ano de 2004, com base em valores horários simulados e medidos nas estações de monitorização seleccionadas.



**FIGURA 4:** Série temporal da média máxima diária por períodos de 8 horas para o  $O_3$ , durante o ano 2004, para a estação Douro Norte e respectivos parâmetros estatísticos.

Apesar das falhas de continuidade nos dados medidos, é visível que o modelo (dados modelados) consegue acompanhar a tendência dos dados medidos ( $r=0,64$ ), embora subestime a estimativa dos picos de  $O_3$  mais elevados. Após cuidadosa comparação dos dados modelados e medidos, e tendo sempre presente a incerteza associada ao processo de modelação, é possível afirmar que os resultados do modelo reúnem as condições necessárias para serem considerados com um grau de confiança adequado.

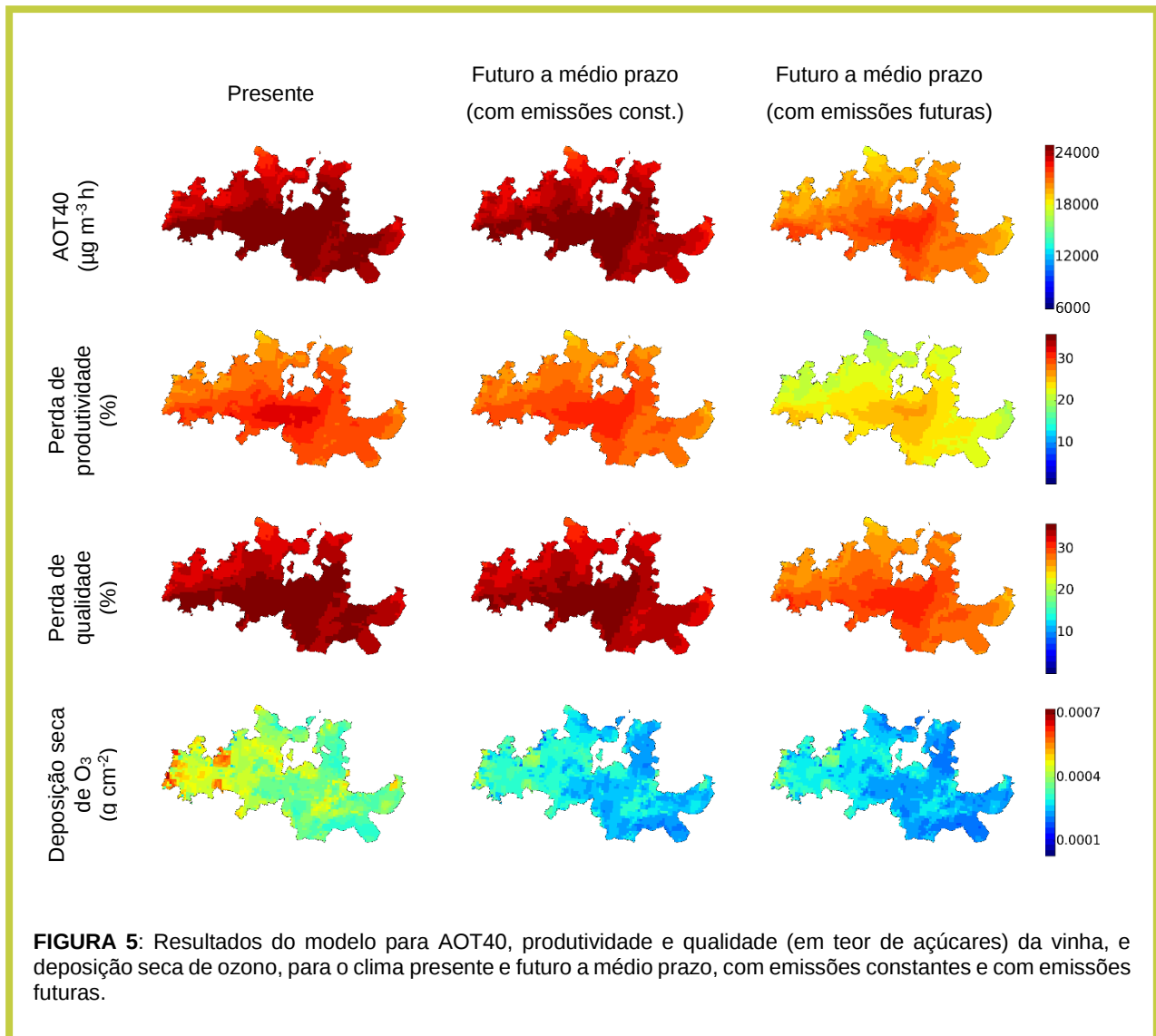


## RESULTADOS

Nesta secção são analisados os níveis de AOT40 e de deposição seca de ozono, obtidos com o modelo de qualidade do ar CHIMERE. A Figura 5 apresenta um resumo dos resultados para o presente (média de 2003, 2004 e 2005) e futuro a médio-prazo (média de 2049 e 2064), na RDD. A perda de qualidade refere-se à diminuição dos teores de açúcares da uva.

No cenário presente e em termos médios, o valor de AOT40 é  $22500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ , a perda de produtividade é de 27%, a perda de qualidade é de 32% e os níveis de deposição seca acumulada são de  $0,00040 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ . No cenário de médio prazo (com emissões constantes), não são observadas diferenças significativas em relação ao presente, estimando-se uma diminuição média de 1% nos níveis de AOT40 e uma diminuição de 1% nas perdas de produtividade e de qualidade. No cenário com emissões projetadas para o futuro, os níveis de AOT40 diminuem em média 20%, indicando que a redução dos níveis de AOT40 é principalmente influenciada pela redução de emissões. O valor alvo para a proteção da vegetação ( $18\,000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ ) ainda é excedido em toda a RDD, mas as perdas de produtividade e de qualidade vão diminuir, em relação ao presente, em 6 e 5%, respetivamente.

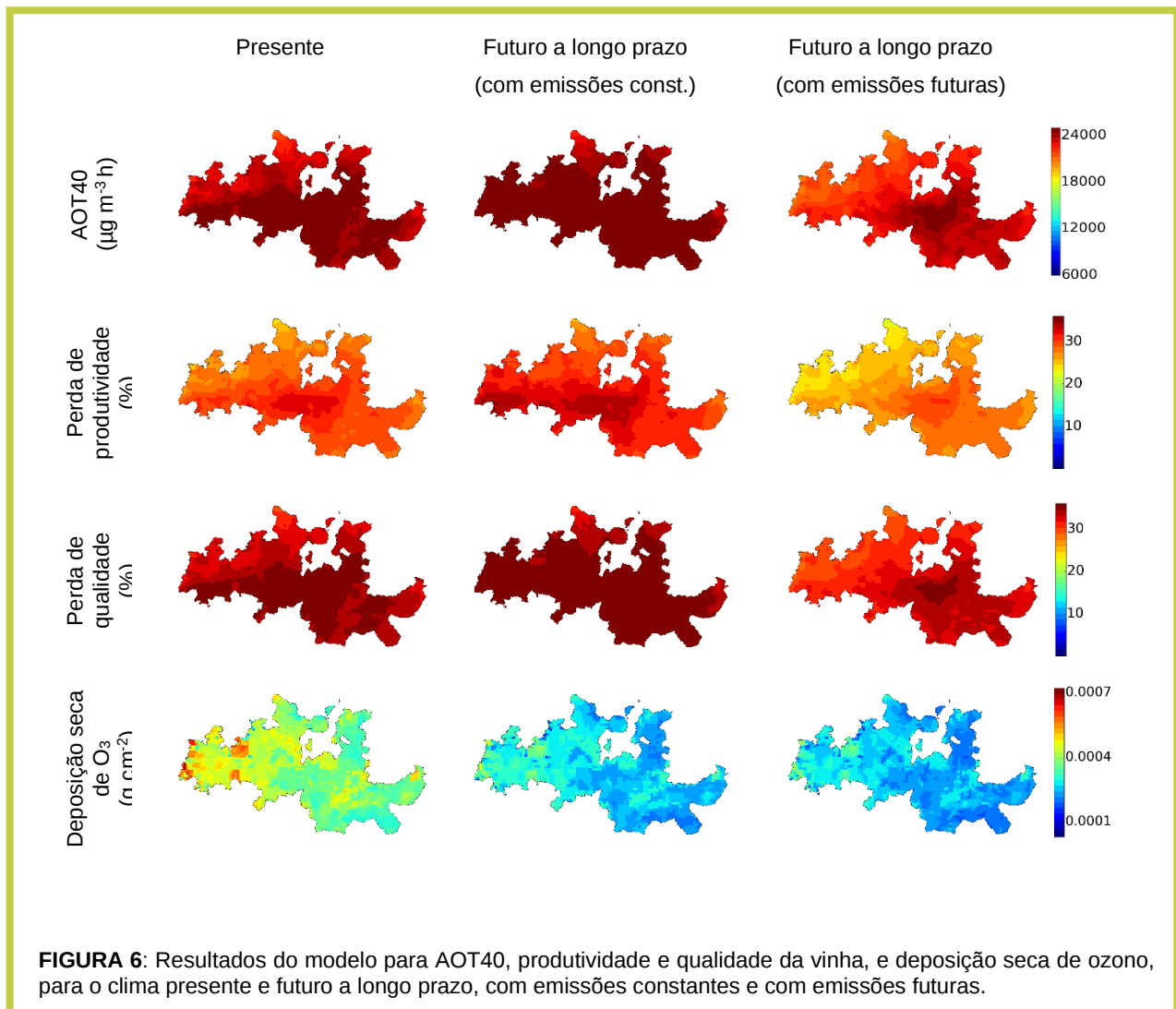
Relativamente à deposição seca de ozono, ambos os cenários de futuro a médio prazo apresentam resultados semelhantes, diminuindo em relação ao presente 33% e 37% no cenário de AC e no cenário com novas emissões, respetivamente. Estes resultados mostram que, ao contrário dos níveis de AOT40, a deposição seca é maioritariamente influenciada por fatores meteorológicos.



A Figura 6 apresenta um resumo dos resultados obtidos para o presente e futuro a longo prazo (média de 2096 e 2097) para a RDD.

As maiores diferenças nos níveis de AOT40 e danos para a vinha deverão acontecer num futuro a longo prazo. Ao considerar apenas o impacto das AC na concentração de  $\text{O}_3$ , os resultados do modelo mostram um aumento médio de 7% nos níveis de AOT40, que se reflete num aumento de 9% e 7% nas perdas de produtividade e de qualidade. Embora os níveis de AOT40 continuem a exceder o valor alvo para a proteção da vegetação, quando as emissões futuras são consideradas, os níveis de AOT40 diminuem em média 8%, refletindo uma diminuição de 8% e 7% na perda de produtividade e de qualidade.

Os níveis de deposição seca de ozono aumentam ligeiramente em relação aos valores simulados para médio prazo, mas no geral os resultados do modelo indicam uma diminuição de 30% e 34% no cenário de AC e no cenário com novas emissões, respetivamente. Como Klingberg et al. (2011) apontam, mesmo com o aumento das concentrações de  $O_3$ , prevê-se no sul da Europa uma diminuição do risco de dano na vegetação, principalmente devido às condições mais secas e às temperaturas mais elevadas esperadas no futuro.



## DISCUSSÃO

Os resultados do modelo indicam a possível tendência para a diminuição, no futuro, dos níveis de AOT40 e da deposição seca de ozono, caso sejam cumpridas as reduções projetadas de emissões de poluentes para a atmosfera. É evidente a importância do cumprimento dos objetivos da legislação vigente no que se refere a emissões atmosféricas, que potenciará a minimização dos danos na vegetação.

No entanto, mesmo sem considerar a redução de emissões, os resultados do modelo apresentam uma diminuição nos níveis de deposição seca de ozono. Assim, os danos na vinha calculados com base no indicador AOT40 podem ter sido sobrestimados. É importante lembrar que, embora o AOT40 seja um indicador importante para avaliar o risco de exposição da vegetação ao ozono, apresenta algumas limitações. Como indicador de exposição, o AOT40 tende a sobrestimar os danos na vegetação, pois a relação exposição-dose não é linear. O período do dia em que as concentrações de ozono são mais elevadas corresponde às horas em que a absorção da planta é menor, não sendo considerado pelo AOT40 a absorção de ozono pela planta, que depende do fluxo estomático. Além disso, o valor limite definido na legislação foi estabelecido para uma espécie agrícola genérica e o período de cálculo não abrange todo o período vegetativo da videira.

Para clima presente as funções exposição-resposta de Soja et al. (2004) indicam que os níveis de ozono podem estar a provocar uma perda de produtividade superior a 30% e uma perda de qualidade (rendimento de açúcares nos mostos) de até 40%, se a exposição aos níveis registados de ozono ocorrer de forma recorrente em três anos consecutivos. No futuro, com redução das emissões, estes valores poderão diminuir até 8%. A aplicação destas funções implica incertezas adicionais, pois a variedade e a idade das videiras influenciam a sua resposta à exposição ao ozono. Soja et al. (2004) é o único estudo que apresenta este tipo de funções, tendo sido realizado em condições meteorológicas continentais (Áustria). Adicionalmente, as funções foram definidas em ambiente controlado e, portanto, não têm em conta a influência das condições meteorológicas e de humidade do solo, fatores importantes na avaliação do desempenho da vinha.

Em síntese, este artigo teve com objetivo avaliar pela primeira vez o risco de exposição da vinha duriense ao ozono troposférico, em clima presente e em cenários de AC. Em clima presente, constata-se, apesar das incertezas, que existe um potencial elevado para perda de produtividade e uma diminuição dos teores de açúcares das uvas, devido aos elevados níveis de ozono troposférico na RDD. Em cenário de AC, esses efeitos poderão ser menores, caso haja uma redução relevante de emissões de gases para a atmosfera.



## APLICAÇÕES e PERSPETIVAS FUTURAS

A poluição atmosférica, as alterações climáticas e a resposta da vegetação estão intimamente relacionadas, mas são reduzidos os estudos de modelação que incorporam as possíveis interações entre estes três aspetos. Tanto a vegetação como o ser humano respondem às mudanças nos campos agrícolas. A videira pode responder com um adiantamento fenológico<sup>5</sup> a condições de maior heliotermicidade<sup>6</sup>, e o Homem adapta-se através de novas práticas de cultivo, como a seleção de variedades de videira mais apropriadas e o ajuste da irrigação. Este avanço fenológico ou o uso de irrigação pode, no entanto, aumentar o risco do efeito fitotóxico do ozono na videira. Assim, as relações entre ozono e o clima e os efeitos na vinha não são lineares e compreendem um sem número de variáveis que os sistemas de modelação de qualidade do ar não têm ainda

---

<sup>5</sup> O adiantamento fenológico é observado quando o desenvolvimento normal da vinha ocorre de forma mais acelerada do que seria desejado.

<sup>6</sup> O conceito de heliotermicidade está relacionado com o índice heliotérmico (IH), indicador bastante utilizado na viticultura, que relaciona indiretamente a radiação solar e a temperatura durante o processo fotossintético

em consideração, sendo importante associar à modelação numérica trabalho experimental e monitorizar o comportamento da videira ao longo do tempo.

O presente estudo permitiu confirmar que a exposição ao ozono não é a métrica mais adequada para avaliar o efeito na vinha, pois não considera a resposta da própria planta às condições meteorológicas e de stresse ambiental. É, portanto, importante definir um limiar para a proteção da vegetação que considere a potencial absorção de ozono pela vegetação, isto é, através da aplicação de indicadores de dose em vez de exposição. Sugere-se, como trabalho futuro, um estudo aprofundado da relação dose-resposta, baseado em monitorização da vinha duriense e acompanhado por trabalho de modelação, que permita alargar o âmbito dos resultados obtidos.

Apesar das limitações apresentadas, o presente estudo é de grande interesse para o setor da agricultura, pretendendo sensibilizar os viticultores para os potenciais danos do ozono e contribuir para uma gestão das vinhas mais informada. Este estudo visa também constituir um ponto de partida para mais investigação sobre os efeitos da exposição das vinhas ao ozono troposférico.

---

**agradecimentos** • Ao projeto DOUROZONE (PTDC/AAG-MAA/3335/2014; POCI-01-0145-FEDER-016778) financiado por fundos nacionais pela FCT/MEC e cofinanciado pelo FEDER sob o acordo de parceria PT2020. São devidos agradecimentos à FCT pelo apoio financeiro ao CESAM (UID/AMB/50017/2019) através de fundos nacionais e co-financiamento FEDER, dentro do Acordo de Parceria dos programas PT2020 e Compete 2020.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ainsworth E, Yendrek CR, Sitch S, Collins WJ, Emberson LD (2012). The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Annual Review of Plant Biology* 63: 637–61.
- Ascenso A (2017). Avaliação da exposição da vinha duriense ao ozono troposférico. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, Aveiro, 82 pp.
- Avnery S, Mauzerall DL, Liu J, Horowitz, LW (2011a). Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage. *Atmospheric Environment* 45: 2284–2296.
- Avnery S, Mauzerall DL, Liu J, Horowitz LW (2011b). Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O<sub>3</sub> pollution. *Atmospheric Environment* 45: 2297–2309.
- Bateira C, Martins L, Santos M, Pereira S (2011). Cartografia da Susceptibilidade a Movimentos de Vertente na Região Demarcada do Douro, Universidade Lusófona, Porto, Portugal, 38 pp.
- Black VJ, Black CR, Roberts JA, Stewart CA (2000). Impact of ozone on the reproductive development of plants. *New Phytologist* 147:421–447.
- Colette A, Granier C, Hodnebrog, Jakobs H, Maurizi A, Nyiri A, Tampieri F (2011). Air quality trends in Europe over the past decade: A first multi-model assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11:11657–11678.
- Borrego C., Monteiro A, Martins H, Ferreira J, Fernandes A P, Rafael S, Miranda AI, Guevara M, Baldasano JM (2016). Air quality plan for ozone: an urgent need for North Portugal. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 9: 447–460.
- EEA (2014). AirBase - The European air quality database. Retrieved December 5, 2016, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/airbase-the-european-air-quality-database-8>
- EEA (2018). Global and European Temperature. Retrieved January 29, 2019 from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature-4/assessment>
- Emberson LD, Ashmore MR, Cambridge HM, Simpson D, Tuovinen JP (2000). Modelling Stomatal Ozone Flux across Europe. *Environmental Pollution* 109: 403–13.

- Feng Z, Kobayashi K, Ainsworth EA (2008). Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analysis. *Global Change Biology* 14:2696–2708.
- Fuhrer J (2009). Ozone risk for crops and pastures in present and future climates. *Naturwissenschaften* 96:173–194.
- IVV. (2016). Vinhos e Aguardentes de Portugal - Anuário 2016. Instituto da Vinha e do Vinho, I.P, Lisboa, Portugal, 256 pp.
- Jones G (2013). Uma Avaliação do Clima para a Região Demarcada do Douro: uma análise das condições climáticas do passado, presente e futuro para a produção de vinho. ADVID - Associação para o Desenvolvimento da Viticultura Duriense, Porto, Portugal, 91 pp.
- Klingberg J, Engardt M, Uddling J, Karlsson PE, Pleijel H (2011). Ozone risk for vegetation in the future climate of Europe based on stomatal ozone uptake calculations. *Tellus A* 63: 174–187.
- Magalhães N. (2012). Manual de Boas Práticas na Região Demarcada do Douro. Instituto dos Vinhos do Douro e do Porto, Porto, 53 pp.
- Monteiro A, Vautard R, Borrego C, Miranda AI (2005). Long-term simulations of photo oxidant pollution over Portugal using the CHIMERE model. *Atmospheric Environment* 39: 3089–3101.
- Monteiro A, Gouveia S, Scotto MG, Lopes J, Gama C, Feliciano M, Miranda AI (2015). Investigating ozone episodes in Portugal: a wavelet-based approach. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1–9.
- Monteiro A, Strunk A, Carvalho A, Tchepel O, Miranda AI, Borrego C, Saavedra S, Rodríguez A, Souto J, Casares J, Friese E, Elbern H (2012). Investigating a high ozone episode in a rural mountain site. *Environmental Pollution*, 162:176–189.
- Pleijel H, Danielsson H, Emberson L, Ashmore MR & Mills G (2007). Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux-response relationships for European wheat and potato. *Atmospheric Environment* 41: 3022–3040.
- Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V, Fischer G, Rafaj P (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109: 33–57.
- Santos JA, Malheiro AC, Karremann MK, Pinto JG (2011). Statistical modelling of grapevine yield in the Port Wine region under present and future climate conditions. *International Journal of Biometeorology* 55: 119–131.
- Schmidt H, Derognat C, Vautard R, Beekmann M (2001). A comparison of simulated and observed ozone mixing ratios for the summer of 1998 in western Europe. *Atmospheric Environment* 35: 2449– 2461.
- Seinfeld JH, Pandis SN (2006). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Wiley, Universidade de Michigan, 1232 pp.
- Soja G, Reichenauer TG, Eid M, Soja AM, Schaber R, Gangl H (2004). Long-term ozone exposure and ozone uptake of grapevines in op. *Atmospheric Environment* 38: 2313–2321.