

Modelo regional da previsão da produção da amêndoa na região agrária de Trás-os-Montes

Regional model for predicting almond production in the Trás-os-Montes agrarian region

Teresa R. Freitas*, João A. Santos, Ana P. Silva e Helder Fraga

Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas (CITAB), Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Vila Real, Portugal
(*E-mail: trf@utad.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.31320>

RESUMO

A amendoeira (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb) é uma espécie com elevada importância económica e social, em Portugal. Em 2020, Portugal continental produziu aproximadamente 32×10^3 toneladas de amêndoa, para uma área de 52340 ha. Embora, atualmente o país apresente condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento da espécie, no futuro, os efeitos das alterações climáticas podem alterar os padrões climáticos e afetar a produção da espécie. No presente estudo, desenvolveu-se um modelo regional da previsão da produção da amendoeira, para Trás-os-Montes. Esta região, situada a nordeste de Portugal, é caracterizada por práticas agrícolas e culturas tradicionais, de sequeiro. Aplicou-se o método de *stepwise*, com modelos de regressão múltipla. Como variáveis de entrada utilizaram-se: soma da precipitação, temperatura média, radiação, amplitude térmica, humidade relativa e produção do ano anterior. No caso das variáveis climáticas, utilizou-se a base de dados histórica – E-OBS (1986–2020), no futuro utilizou-se o modelo – CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, RCP4.5 (2021–2080). Os valores foram calculados para a média bissemanais, de janeiro a maio. Como resultado, o modelo ($R^2 = 0,75$) destacou as variáveis mais representativas da produção de amêndoa: precipitação na 2ª quinzena de maio, a radiação da 1ª quinzena de janeiro, a radiação da 1ª quinzena de maio e a produção do ano anterior. Quando aplicado o modelo para os dados futuros, este indica que ocorrerá uma variação acentuada da produção. Este modelo é uma ferramenta viável para a previsão da produção. Para complementar o estudo, sugere-se o desenvolvimento de novas metodologias.

Palavra-chave: amendoeira, método *Stepwise*, precipitação, radiação, cenários futuros, histórico

ABSTRACT

The almond tree (*Prunus dulcis*) is a species with high economic and social importance in Portugal. In 2020, mainland Portugal produced approximately 32×10^3 t of almonds, for an area of 52340 ha. Currently, the country presents favourable climatic conditions for the development of the species. However, in the future, the effects of climate change may alter the weather patterns and consequently affect the species' productivity. In the present study, a regional model was developed to predict the almond tree productivity, for the Trás-os-Montes. This region, situated in the northeastern of Portugal, is characterized by traditional agricultural practices and rainfed crops. The stepwise method was applied, with multiple regression models. As input variables were used: precipitation sum, mean temperature, radiation, thermal amplitude, relative humidity and production of the previous year. In the case of climate variables, the historical database - E-OBS (1986: – 2020) was used, in the future the model – CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, RCP4.5 (2021: – 2080) was used. The values were calculated for the bi-weekly average, from January to May. As a result, the model ($R^2 = 0.75$) highlighted the most representative variables: precipitation in the 2nd fortnight of May, the radiation of the 1st fortnight of January, the radiation of the 1st fortnight of May and the productivity of the previous year. When the model is applied to future data, it indicates that a sharp variation in productivity will occur. This model is a viable tool for production forecasting. To complement the study, the development of new methodologies is suggested.

Keywords: almond tree, stepwise method, precipitation, radiation, future scenarios, historic

INTRODUÇÃO

A amendoeira [*Prunus dulcis* M. (D.A Webb) syn. *Prunus amygdalus* Batsch] pertence à família *Rosacea* e ao sub-gênero *Amygdalus* (L.) (Ribeiro e Silva, 2020). É originária das regiões quentes e áridas do sudoeste asiático e das encostas montanhosas mais baixas da Ásia central (Benmoussa *et al.*, 2017). De acordo com os dados sobre alimentação e agricultura (FAOSTAT, 2022), em 2020, 4 milhões toneladas de amêndoa (com casca) foram produzidas, no mundo inteiro. A amendoeira é uma das espécies mais representativas da economia mundial, sendo produzida em vários pontos do planeta, com destaque para os continentes: América (2 milhões t), Ásia (648×10^3 t) e Europa (561×10^3 t). Na Europa, a região do Mediterrâneo, é caracterizada por apresentar condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento da espécie. Portugal continental, tem revelado um crescimento na produção de amêndoa nos últimos anos, com uma área correspondente de 52×10^3 ha e uma produção de 32×10^3 t, em 2020 (FAOSTAT, 2022).

Em Portugal, as condições edafoclimáticas, as práticas de cultivo, e as variedades de amendoeira utilizadas definem a individualidade de cada região agrícola (Ribeiro e Silva, 2020). Como referência, região de Trás-os-Montes, situada a nordeste de Portugal, exhibe uma longa tradição no cultivo da espécie amendoeira, com relevância para a preservação da rusticidade das variedades autóctones e das práticas agrícolas (Santos e Teixeira, 2020). As variedades autóctones que definem a região são “José Dias”, “Duro da Estrada Grado”, “Duro Amarelo Grado” e “Casa Nova”, entre outras (Oliveira *et al.*, 2018; Santos e Teixeira, 2020). Além disso, as condições climáticas e a disponibilidade de água caracterizam a região com invernos frios e chuvosos e verões quentes e secos (Ribeiro e Silva, 2020), favoráveis ao cultivo do amendoal.

Efetivamente, o clima é um fator determinante para o desenvolvimento de qualquer espécie vegetal, e como tem vindo a ser referido, as alterações climáticas têm afetado cada vez mais as culturas agrícolas (Palanivel e Surianarayanan, 2019). As geadas e as chuvas de primavera, bem como, o aumento da temperatura e a redução da precipitação têm contribuído para o aumento dos riscos associados à sustentabilidade do amendoal (Doll *et al.*,

2021). Como consequência, a produção é afetada negativamente, e por isso, os produtores e a comunidade científica têm procurado soluções para anular e reduzir os efeitos das alterações climáticas sobre a cultura (Freitas *et al.*, 2021). Desta forma, o recurso a *machine learning* tem sido uma opção para determinar estes impactos. Entre as aplicações de *machine learning*, os métodos de regressão, como o *stepwise*, são empregues na agricultura para desenvolver modelos de previsão de: produção, períodos de floração e colheita, e ocorrência de doenças (Fraga *et al.*, 2016; Mishra *et al.*, 2016; Ansarifar *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Ali *et al.*, 2022).

Assim, com o intuito de prever a produção da amendoeira para a região de Trás-os-Montes, em condições futuras, recorreu-se ao método matemático *stepwise (forwards & backwards)*. Em Portugal, estudos que recorrem à previsão da produção da amendoeira são incipientes, e consideram-se de elevada importância para a viabilidade dos amendoais e da economia do país, no futuro. Além disso, este estudo pode ser extrapolado para outras regiões do planeta, que apresentem características semelhantes às da região em estudo. Os objetivos deste estudo são: (1) descrever a região de estudo; (2) determinar as variáveis climáticas que influenciam a produção da amendoeira; (3) determinar o modelo que melhor descreve a produção; (3) aplicar o modelo em condições futuras.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

A região agrícola de Trás-os-Montes, situada a noroeste de Portugal, é composta por zonas agrícolas: Alto Tâmega-Barroso, Marão-Padrela, Terra Fria, Planalto Mirandês, e Terra Quente, que apresentam características edafoclimáticas diferenciadas, e que por consequência, permitem o desenvolvimento de culturas com necessidades distintas e com práticas agrícolas diferenciadas (Lima, 1999). A amendoeira é uma das espécies que se destaca na região. Desde 1986 até 2021, a variabilidade da área e de produção de amêndoa têm sido observáveis na região agrícola de Trás-os-Montes. Em 2021, produziu-se cerca de 17×10^3 t (Figura 1c), para uma área de 26 225 ha (INE, 2022). Na região ainda se encontram variedades autóctones e a sua produção

é tradicionalmente de sequeiro (Ribeiro e Silva, 2020; Doll *et al.*, 2021). No presente estudo, a caracterização da distribuição do amendoal enquadra-se no inventário digital fornecido pelo Instituto Geográfico de Portugal (Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental-COS 2007) (Fonte: Direção-Geral do Território, <http://www.dgterritorio.pt/> (acedido em 24 de fevereiro de 2022)). Áreas com a designação “Pomares de amendoeira”, “Pomares de amendoeira com vinha” e “Pomares de amendoeira com olival” foram selecionadas como fonte de dados.

Método de stepwise

A recorrência a técnicas de *machine learning* para previsão da produção da amendoeira é cada vez mais frequente (Beigi *et al.*, 2022). As previsões provenientes de *machine learning* são desenvolvidas a partir de dados externos à planta, que não dependem de mecanismos fisiológicos específicos da cultura (i.e., variáveis climáticas, dados de produção) (Zhang *et al.*, 2019). Utilizou-se o método de *stepwise*, que consiste na aplicação da metodologia de regressão linear múltipla para variáveis independentes/explicativas que possam descrever a variável dependente/observada (Ansarifar *et al.*, 2021; StatisticsSolutions, n.d.). Assim, como variáveis explicativas utilizaram-se parâmetros de clima: temperatura média (°C); soma da precipitação (mm); humidade relativa (%); amplitude térmica e radiação (W/m²), e produção do ano anterior (t), para o período de 1986 a 2020. Relativamente às variáveis climáticas, os valores bissemanais introduzidos correspondem ao período de janeiro a maio. Este período corresponde à ocorrência da diferenciação floral, estados de floração, vingamento e desenvolvimento do fruto. Submeteram-se 41 variáveis independentes para 35 anos. A variável dependente é a produção (t) anual disponibilizada pelo Instituto Nacional de Estatística (INE, 2022), desde 1986 a 2020. Na aplicação do método, devido ao grande número de potenciais preditores, foi realizada uma regressão multivariada por etapas (*forwards* e *backwards*) para a seleção das quatro variáveis mais representativas do modelo (Fraga *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2021). Ainda, foi aplicado um esquema de validação cruzada de *leave-one-out* para contabilizar o sobre ajustamento do modelo (Fraga *et al.*, 2016). Com base nos preditores selecionados

pela metodologia, adaptou-se um modelo linear. Para a validação do modelo foram determinados o coeficiente de determinação (R² e R² ajustado) e a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) (Ali *et al.*, 2022). Posteriormente, aplicou-se o modelo obtido às condições climáticas futuras.

Variáveis meteorológicas e projeção climática futura

Para se obter os valores das variáveis climáticas estabelecidas recorreu-se a bases de dados de clima. Consideraram-se dois períodos: histórico (E-OBS; 1986-2005) e futuro (EURO-CORDEX; 2021: – 2080). E-OBS, versão 24.0e, é uma base de dados de clima, que incorpora um vasto número de estações meteorológicas Europeias (Santos *et al.*, 2017). Os dados diários estão disponíveis numa grelha de 0,25° de latitude × 0,25° de longitude (~25 km de espaçamento da grelha). Para a base de dados do futuro, proveniente do projeto EURO-CORDEX (0,11° latitude × 0,11° longitude grelha regular, ~12,5 km de resolução espacial), utilizou-se o modelo CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 – RCA4 (Modelo Climático Global – Modelo Climático Regional) (Freitas *et al.*, 2022). Considerou-se, para o futuro, o cenário RCP4.5 (*Representative Concentration Pathway* 4.5), que considera um aumento de temperatura até aproximadamente 2 °C. Este cenário, especifica um forçamento radiativo de 4,5 W/m² com estabilização após meados do século XXI (Thomson *et al.*, 2011; Barredo *et al.*, 2017). Para os dois períodos consideraram-se as variáveis climáticas indicadas anteriormente: temperatura média, soma da precipitação, humidade relativa, amplitude térmica e radiação. Utilizou-se a base de dados histórica para calibrar as variáveis do modelo climático com o método de “Mapeamento Empírico de Quantidades” (Cofiño *et al.*, 2018). Para tal, foi necessário colocar as duas bases de dados à mesma resolução, através de uma interpolação bilinear. Esta metodologia assegura que o viés entre o valor observado e o simulado seja corretamente ajustado (Fraga *et al.*, 2020a). Os dados históricos foram aplicados no método *stepwise* para determinação do modelo de previsão da produção. Depois do modelo estar determinado, aplicaram-se os dados do futuro para avaliar a evolução da produção do amendoal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Área de estudo

O clima na região de Trás-os-Montes é subatlântico/continental e mediterrânico (Lima 1999). Geralmente, os invernos são frios e chuvosos, por contraste os verões são quentes e secos (Ribeiro e Silva, 2020). Para a região esperam-se alterações climáticas como o aumento da temperatura, aumento do risco de geadas até maio, e chuvas na primavera e no início do outono (Doll *et al.*, 2021; Freitas *et al.*, 2021). De acordo com a Figura 1a, em Trás-os-Montes a elevação varia de 250 a 1250 m. No total, 23 % da área corresponde à classe de elevação 251–500 m, 44 % corresponde a 501–750 m, 24 % corresponde a 751–1000 m e 4 % corresponde a < 250 m e 1001–1250 m. Maioritariamente, o amendoal encontra-se nos distritos de Bragança e Viseu, mais especificamente na Zona Agrícola da Terra Quente (Figura 1b). A produção de amêndoa, tem revelado uma variação acentuada desde 1986 até

1997. A partir deste ano, observou-se uma diminuição da produção até 2013, segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE, 2022). Sugere-se que esta diminuição esteja associada ao desenvolvimento da produção na Califórnia, que até aos dias de hoje, é um dos maiores produtores de amêndoa. Deste 2016, a tendência foi aumentar a produção até 2021, atingindo aproximadamente 17×10^3 t (Figura 1c).

A área de produção de amêndoa também tem apresentado alguma alternância durante o período histórico, com valores a variar entre 17 310 até 26 225 ha. No entanto, no estudo foi apenas considerada a evolução da produção (t). Trás-os-Montes é uma região tradicional no cultivo da amendoeira, que tem como características a preservação das variedades mais rústicas e a prática de sequeiro (Ribeiro e Silva, 2020). Estas condições de cultivo poderão ser ou não vantajosas no futuro. Como se tem vindo a verificar noutros locais como o Algarve, os impactes da reduzida precipitação têm sido

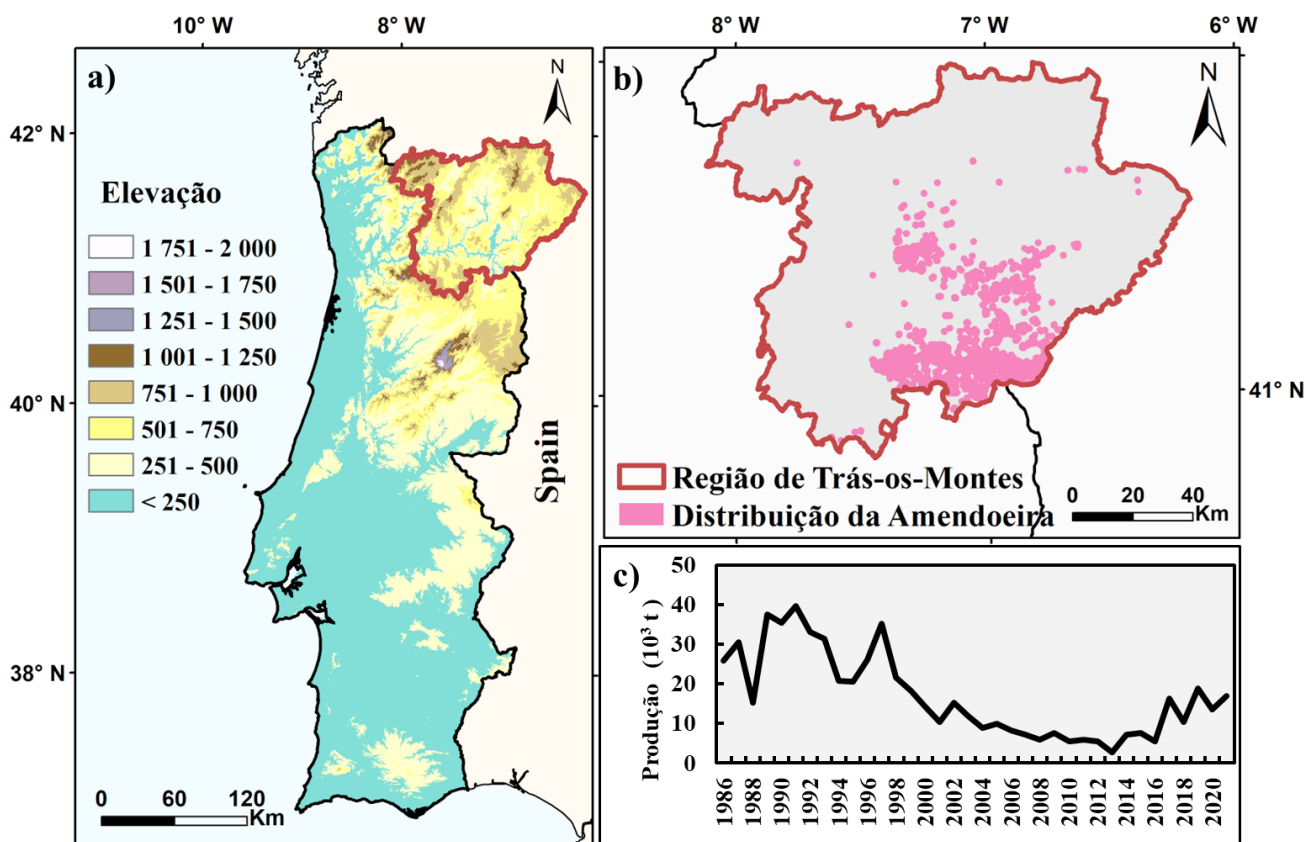


Figura 1 - (a) Localização da região agrícola de Trás-os-Montes em Portugal continental e (b) distribuição da amendoeira na região em estudo, (c) produção da amendoeira na região, desde 1986 a 2021.

minimizados com a implementação de sistemas de rega, e com a implementação de variedades mais resistentes às temperaturas altas de inverno e às geadas tardias na primavera (Doll *et al.*, 2021).

Modelo de produção

A recorrência a ferramentas de previsão da produção das culturas é cada vez mais frequente, uma vez que, são um utensílio indispensável nos dias de hoje, devido ao aumento da incidência de alterações climáticas, às necessidades de consumo da população e às transformações da economia mundial (Freitas *et al.*, 2021). De acordo com os resultados: o método de *stepwise* (*forwards* e *backwards*) selecionou as 4 variáveis independentes, domo da precipitação na 2ª quinzena de maio (A), radiação da 1ª quinzena de janeiro (B), radiação da 1ª quinzena de maio (C) e produção do ano anterior (D), que mais influencia têm na produção, obtendo um modelo que explica 75 % da variância da série de produção de amêndoa regional ($R^2 = 0,75$), com um R^2 ajustado de 0,718 (Figura 2). Quanto maior o coeficiente de determinação (R^2), melhor o modelo consegue explicar a produção (Ali *et al.*, 2022). A Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) explica o quão longe estão os valores previstos, em média, dos valores observados (Liu *et al.*, 2021). Neste estudo, o RMSE é de 30.

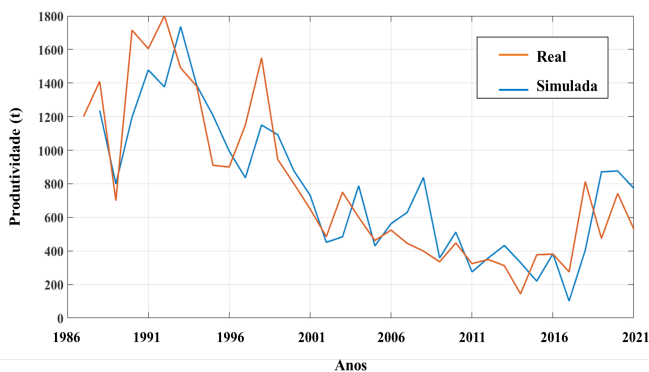


Figura 2 - Produtividade (t) real e simulada para o período de 1986 a 2021, de acordo com o método *stepwise* (*forwards* e *backwards*).

Para a variável precipitação na 2ª quinzena de maio o *p-value* foi de 0,0290, na radiação da 1ª quinzena de janeiro *p-value*=0,0069, na radiação da 1ª quinzena de maio *p-value*=0,0177 e na produção do ano

anterior *p-value*=6,46e⁻⁰⁸, com correlações positivas. A produção (t) com as variáveis independentes e a variável Z, que corresponde ao valor da produção do conjunto de entrada, são representadas na seguinte equação:

$$\text{Produção (t)} = ((-3,5827) + (0,0129 * X(A)) + (0,0237 * X(B)) + (0,0075 * X(C)) + (0,6917 * X(D))) * \text{std}(Z) + \text{mean}(Z)$$

De acordo com a Figura 3, no período histórico (1986–2020), a variável: precipitação na 2ª quinzena de maio variou entre a 1,2 a 3,1 mm. Em relação à radiação da 1ª quinzena de janeiro os valores alteram entre 59 e 70 W/m². E os da radiação da 1ª quinzena de maio variam entre 227 e 252 W/m². A seleção destas variáveis, para além de ser fundamentada pelo modelo matemático, também pode ser justificada em termos fisiológicos da planta. Com efeito, as variáveis enquadram-se com os estados fisiológicos da planta, em especial com o período de crescimento vegetativo, em que a precipitação e a radiação são um suporte de crescimento e contribuem para uma maior atividade da planta (Ribeiro e Silva, 2020; Doll *et al.*, 2021). A variável com maior influência é a produção do ano anterior (n), que afeta a produção do ano seguinte (n+1), uma vez que, durante o ano n ocorre o processo de diferenciação floral para o ano n+1.

Aplicação do modelo de produção no futuro

As variáveis climáticas, selecionadas pelo modelo, apresentam alterações significativas no futuro (2021–2080). De acordo com a Figura 3, os valores da precipitação observados na 2ª quinzena de maio são de 0,6 a 1,7 mm. A radiação da 1ª quinzena de janeiro é de 63 a 75 W/m² e a radiação da 1ªquinzena de maio é de 253 a 272 W/m². De acordo com as diferenças determinadas, os valores de precipitação tendem a diminuir no futuro, com uma diferença entre -2 a 0,5 mm. Pelo contrário, a radiação tende a aumentar, para a 1ª quinzena de janeiro a diferença corresponde a -5 a 15 W/m² e para a 1ª quinzena de maio é de 10 a 35 W/m².

De acordo com a Figura 4, a maior variância observada corresponde ao primeiro período do histórico (1991–2005), associada à diminuição acentuada da

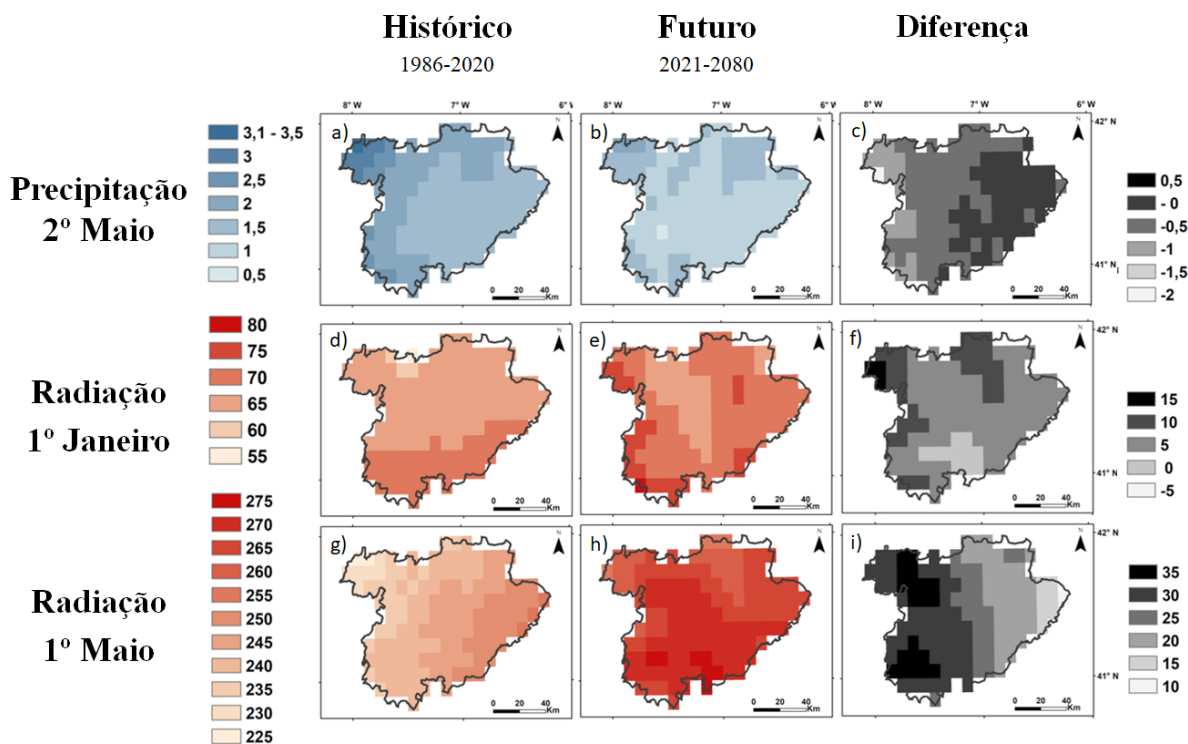


Figura 3 - Evolução das variáveis climáticas selecionadas pelo modelo: precipitação na 2ª quinzena de maio (a – histórico; b – futuro; c – diferença entre o futuro e o histórico), radiação da 1ª quinzena de janeiro (d; e; f) e radiação da 1ª quinzena de maio (g; h; i).

produção. Quando aplicado o modelo no futuro (2021 a 2080; RCP4.5), verificou-se que a produção da amendoeira irá ter um aumento em relação ao último período histórico, acompanhada por um aumento da variabilidade. Para as projeções, a variabilidade interanua é visível ao longo do futuro e poderá estar associada à instabilidade do clima e às alterações climáticas. As projeções até 2080 mostram que os valores de produtividade irão estar na ordem do primeiro período histórico.

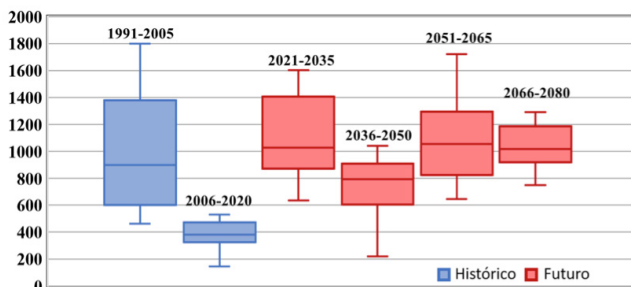


Figura 4 - Aplicação do modelo de produção (t) da amendoeira, para os períodos histórico (1991–2005 e 2006–2020) e futuro (2021–2035, 2036–2050, 2051–2065 e 2066–2080).

De acordo com Ansarifar *et al.* (2021), este método apresenta uma precisão relativamente elevada, no entanto, devido à natureza de caixa negra destes modelos, a precisão da previsão é sensível à estrutura do modelo e à calibração dos parâmetros, e pode ser difícil explicar por que razão as previsões são precisas ou imprecisas. No entanto, no presente estudo, as 4 variáveis selecionadas pelo modelo, são importantes para o desenvolvimento da amendoeira, o que é relevante nestes estudos em que os modelos são de carácter essencialmente matemático (Aguiar *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019).

Estes resultados são uma ferramenta importante para o produtor, associações agrícolas e para os gestores do setor. A recorrência a estes resultados poderá ser um auxílio para prever os impactos das alterações climáticas, bem como definir as medidas de adaptação mais indicadas a cada situação (Fraga *et al.*, 2020b; Freitas *et al.*, 2021).

No entanto, novos estudos devem ser realizados para suplementar os resultados obtidos, com a introdução de outras variáveis independentes como: práticas de

cultivo, sistemas de rega, características orográficas e índices bioclimáticos (Mishra *et al.*, 2016). Também, pode ser extrapolado para outras regiões, como o Algarve. Ainda, o estudo pode ser complementado com recurso a outros modelos/métodos de análise estatística (Zhang *et al.*, 2019; Jin *et al.*, 2020). Outros estudos, para determinar o impacto das alterações climáticas na amendoeira podem ser realizados, como determinar as porções de frio e graus hora de crescimento para a região de Trás-os-Montes.

CONCLUSÕES

A amendoeira é uma das espécies mais representativas da região agrária de Trás-os-Montes. A subsistência desta cultura no presente e futuro é prioritária para a sustentabilidade do setor agrícola da região. Para tal, a utilização de metodologias de *machine learning* (i.e., método de *stepwise*) é cada vez mais recorrente, devido á facilidade de utilização dos métodos, possibilidade de trabalhar com várias variáveis e obter rápidos resultados. Associar este método às projeções de clima permite antever possível eventos que causem impactos para

a cultura, e desenvolver medidas de adaptação ou mitigação.

Os resultados obtidos comprovaram que as variáveis de clima e a produção do ano anterior podem explicar a evolução da produção, podendo prever as produções futuras. Acredita-se que outros fatores possam ter interferência nesta variável, e por isso novos estudos recomendados para complementar esta investigação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo projeto CoaClimateRisk “O impacto das alterações climáticas e medidas de adaptação para as principais culturas agrícolas na região do Vale do Côa” (COA/CAC/0030/2019) financiado por Fundos Nacionais pela Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT). Este trabalho foi apoiado por Fundos Nacionais pela FCT, no âmbito dos projetos UIDB/04033/2020 e LA/P/0126/2020. HF agradece à FCT pelo contrato CEECIND/00447/2017 e 2022.02317.CEECIND.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, Y.; Raza, A.; Iqbal, S.; Khan, A.A.; Aatif, H.M.; Hassan, Z.; Hanif, C.M.S.; Ali, H.M.; Mosa, W.F.A.; Mubeen, I. & Sas-Paszt, L. (2022) - Stepwise Regression Models-Based Prediction for Leaf Rust Severity and Yield Loss in Wheat. *Sustainability*, vol.14, n. 21, art. 13893. <https://doi.org/10.3390/su142113893>
- Ansarifar, J.; Wang, L. & Archontoulis, S.V. (2021) - An interaction regression model for crop yield prediction. *Scientific Reports*, vol. 11, art. 17754. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97221-7>
- Arrobas, M. (2017) - *Amendoeira: Estado de produção, Capítulo 3 - Adaptação ecológica*, p.98-126: Centro Nacional de Competências dos Frutos Secos. ISBN: 978-989-99857-9-7.
- Barredo, J.I.; Caudullo, J.I. & Mauri, G. (2017) - *Mediterranean habitat loss under RCP4.5 and RCP8.5 climate change projections*. European Commission; JRC Technical Reports.
- Beigi, M.; Torki, M.; Safarina, H.; Kaveh, M.; Szymanek, M.; Khalife, E. & Dziwulska-Hunek, A. (2022) - Prediction of Almond Nut Yield and Its Greenhouse Gases Emission Using Different Methodologies. *Applied Sciences*, vol. 12, n. 4, art. 2036. <https://doi.org/10.3390/app12042036>
- Benmoussa, H.; Ghrab, M.; Ben, M. & Luedeling, E. (2017) - Chilling and heat requirements for local and foreign almond (*Prunus dulcis* Mill .) cultivars in a warm Mediterranean location based on 30 years of phenology records. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 239, p. 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.030>
- Cofiño, A.S.; Bedia, J.; Iturbide, M.; Vega, M.; Herrera, S.; Fernández, J.; Frías, M.D.; Manzanos, R. & Gutiérrez, J.M. (2018) - The ECOMS User Data Gateway: Towards seasonal forecast data provision and research reproducibility in the era of Climate Services. *Climate Services*, vol. 9, p. 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.07.001>
- Doll, D.A.; Freire De Andrade, J. & Serrano, P. (2021) - *Produção de amêndoa em Portugal: Tendências de plantação e desafios de produção num sector em desenvolvimento*. Agro.Ges.

- FAOSTAT (2022) - FAOSTAT - Crops and livestock products. [cit. 2022-02-21].
<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Fraga, H.; Molitor, D.; Leolini, L. & Santos, J.A. (2020a) - What is the impact of heatwaves on European viticulture? A modelling assessment. *Applied Sciences*, vol. 10, n. 9, art. 3030. <https://doi.org/10.3390/app10093030>
- Fraga, H.; Moriondo, M.; Leolini, L. & Santos, J.A. (2020b) - Mediterranean Olive Orchards under Climate Change: A Review of Future Impacts and Adaptation Strategies. *Agronomy*, vol. 11, n. 1, art. 56.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>
- Fraga, H.; Santos, J.A.; Moutinho-Pereira, J.; Carlos, C.; Silvestre, J.; Eiras-Dias, J.; Mota, T. & Malheiro, A.C. (2016) - Statistical modelling of grapevine phenology in Portuguese wine regions: Observed trends and climate change projections. *Journal of Agricultural Science*, vol. 154, n. 5, p. 795–811.
<https://doi.org/10.1017/S0021859615000933>
- Freitas, T.R.; Santos, J.A.; Silva, A.P. & Fraga, H. (2021) - Influence of climate change on chestnut trees: A review. *Plants*, vol. 10, n. 7, art. 1463. <https://doi.org/10.3390/plants10071463>
- Freitas, T.R.; Santos, A.; Silva, A.P.; Martins, J. & Fraga, H. (2022) - Climate Change Projections for Bioclimatic Distribution of *Castanea sativa* in Portugal. *Agronomy*, vol. 12, n. 5, art. 1137.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12051137>
- INE (2022) - INE - Produção de amendoa [cit. 2022-08-08].
https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0000020&xlang=pt&contexto=bd&selTab=tab2
- Jin, Y.; Chen, B.; Lampinen, B.D. & Brown, P.H. (2020) - Advancing Agricultural Production With Machine Learning Analytics: Yield Determinants for California's Almond Orchards. *Frontiers in Plant Science*, vol. 11, art. 290. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00290>
- Lima, C. (1999) - *A agricultura de Trás-os-Montes e Alto Douro - Diagnóstico Prospetivo*. Instituto Nacional de Estatística.
- Liu, Y.; Heuvelink, G.B.M.; Bai, Z.; He, P.; Xu, X.; Ding, W. & Huang, S. (2021) - Analysis of spatio-temporal variation of crop yield in China using stepwise multiple linear regression. *Field Crops Research*, vol. 264, art. 108098. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108098>
- Mishra, S.; Mishra, D. & Santra, G.H. (2016) - Applications of machine learning techniques in agricultural crop production: A review paper. *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, n. 38, p. 1-14.
<https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i38/95032>
- Oliveira, I.; Meyer, A.; Afonso, S.; Ribeiro, C. & Gonçalves, B. (2018) - Morphological, mechanical and antioxidant properties of Portuguese almond cultivars. *Journal of Food Science and Technology*, vol. 55, p. 467–478. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2955-3>
- Palanivel, K. & Surianarayanan, C. (2019) - An approach for prediction of crop yield using machine learning and big data techniques. *International Journal of Computer Engineering and Technology*, vol. 10, n. 3, p. 110–118.
<https://doi.org/10.34218/ijcet.10.3.2019.013>
- Ribeiro, A.C. & Silva, A.P. (2020) - *Manual prático da amendoeira*. Bragança: Centro Nacional de Competências dos Frutos Secos. ISBN 978-989-99878-9-0.
- Santos, A.L. & Teixeira, S.M. (2020) - Panorama nacional do amendoal. *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 43, n.sp.2, p. 3–9. <https://doi.org/10.19084/rca.19684>
- Santos, J.; Costa, R. & Fraga, H. (2017) - Climate change impacts on thermal growing conditions of main fruit species in Portugal. *Climatic Change*, vol. 140, p. 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1835-6>
- StatisticsSolutions (n.d.) - *Stepwise Regression: What is it and should you use it?* [cit. 2022-15-12].
<https://www.statisticssolutions.com/stepwise-regression-what-is-it-and-should-you-use-it/>
- Thomson, A.M.; Calvin, K. V.; Smith, S.J.; Kyle, G.P.; Volke, A.; Patel, P.; Delgado-Arias, S.; Bond-Lamberty, B.; Wise, M.A.; Clarke, L.E. & Edmonds, J.A. (2011) - RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, vol. 109, art. 77. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- Zhang, Z.; Jin, Y.; Chen, B. & Brown, P. (2019) - California almond yield prediction at the orchard level with a machine learning approach. *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, art. 809. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00809>