

APLICACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA PREDECIR EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA FENOLOGÍA DE LA VID EN BORGOÑA (FRANCIA): IMPLICACIONES PARA LA SOSTENIBILIDAD VITIVINÍCOLA

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO PREDICT THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON VINE PHENOLOGY IN BURGUNDY (FRANCE): IMPLICATIONS FOR WINE SUSTAINABILITY

Sofania M. ROJAS-LANDACAY¹, Juan M. NÚÑEZ V.², José-Abel FLORES³
y Fernando DE LA PRIETA⁴

¹ *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castille and León, España*

✉ sofania@usal.es

🌐 <https://orcid.org/0009-0009-1788-9233>

² *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castille and León, España*

✉ jmnunez@usal.es

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-3165-6200>

³ *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castille and León, España*

✉ flores@usal.es

🌐 <https://orcid.org/0000-0003-1909-293X>

⁴ *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castille and León, España*

✉ fer@usal.es

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-8239-5020>

RESUMEN: El cambio climático ha afectado significativamente a las etapas fenológicas, adelantando especialmente las etapas que influyen directamente en la calidad y la composición de la uva. Este estudio evaluó cómo el cambio climático influyó en las fases fenológicas de la viticultura de Bourgogne, en parcelas de Pinot Noir a través de la comparación de datos climáticos históricos (1966-2023) con información fenológica. Empleamos modelos de regresión por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) y modelos avanzados de inteligencia artificial para modelar las relaciones no lineales entre las variables climáticas y las etapas fenológicas. Estos resultados subrayan el potencial de los modelos basados en IA como herramienta robusta y

escalable para la viticultura de precisión, la adaptación al cambio climático y el mantenimiento de la actividad vitivinícola como motor socioeconómico en territorios rurales.

Palabras clave: inteligencia artificial; cambio climático; viticultura.

ABSTRACT: Climate change has significantly affected phenological stages, particularly advancing those stages that directly influence grape quality and composition. This study evaluated how climate change influenced the phenological phases of viticulture in Burgundy, on Pinot Noir plots. This was done by comparing historical climate data (1966-2023) with phenological information. We used ordinary least squares (OLS) regression models and advanced artificial intelligence models to model the non-linear relationships between climate variables and phenological stages. These results highlight the potential of AI-based models as a robust and scalable tool for precision viticulture, climate change adaptation, and the maintenance of wine production as a socio-economic driver in rural areas.

Keywords: artificial intelligence; climate change; viticulture.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático está transformando el panorama de la viticultura mundial, con efectos especialmente notorios en las regiones del Mediterráneo europeo, como España, Francia e Italia. Estas áreas, que históricamente han sido propicias para la producción vitivinícola de alta calidad, enfrentan un aumento sostenido de las temperaturas y una creciente aridez, factores que amenazan la viabilidad del cultivo de la vid. Se ha estimado que, en un futuro cercano, algunas de estas zonas podrían volverse inadecuadas para la producción, obligando a los viticultores a adaptar sus estrategias o incluso a migrar a regiones con condiciones más favorables [1, 2].

Estos cambios no solo afectarían la producción de vino en términos de volumen y calidad, sino que también tendrían un impacto socioeconómico en las regiones cuya economía depende en gran medida de esta actividad. Ante la creciente incertidumbre climática y sus efectos en la producción vitivinícola, se torna crucial el desarrollo de herramientas predictivas que permitan a los productores anticipar cambios fenológicos, facilitando la adaptación y la optimización de las estrategias de manejo. En este contexto, la aplicación de técnicas avanzadas de inteligencia artificial se presenta como un enfoque altamente prometedor para incrementar la precisión de las predicciones y mejorar la gestión vitivinícola en escenarios de cambio climático [2, 3, 4].

Los modelos predictivos aplicados en viticultura, en particular aquellos que integran inteligencia artificial (IA), han demostrado un alto potencial para mejorar la precisión de las predicciones fenológicas y de rendimiento de la uva, al aprovechar datos climáticos, fenológicos y geoespaciales [5]. Varias aplicaciones impulsadas por la IA en la viticultura, incluidos los modelos de predicción y los enfoques basados en datos para optimizar la gestión del agua y los nutrientes, están impulsando colectivamente la transición hacia

prácticas más sostenibles en el sector vitivinícola, permitiendo avanzar en la predicción de calidad de la uva y la respuesta de la vid al cambio climático [6, 7].

Frente a esto, el objetivo del estudio consistió en evaluar cómo el cambio climático influyó en las fases fenológicas de la viticultura en la región de Bourgogne, específicamente en las parcelas de *Pinot Noir* en la Côte de Beaune.

2. METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en la Côte de Beaune (47,0244° N, 4,8410° E), en el este de Borgoña (Francia), una región vinícola reconocida por su diversidad topográfica y climática que influyen directamente en la fenología de variedades como *Pinot Noir* [8, 9]. Los datos fenológicos de *Pinot Noir* (brotamiento, floración, envero y vendimia) fueron proporcionados por el BIVB (Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne). Los datos climáticos diarios (temperatura y precipitaciones) para el periodo 1966-2023 se obtuvieron de la estación de Dijon-Longvic a través del portal API de Météo-France. Los análisis se realizaron en Python y se evaluaron utilizando R^2 y RMSE. Las variables dependientes fueron los eventos fenológicos, mientras que las variables independientes fueron las variables bioclimáticas. El modelo OLS sigue la metodología descrita en [8], mientras que la aplicación de Random Forest se basa en los estudios de [10] y [11].

3. RESULTADOS

Los resultados revelaron que, debido al aumento de las temperaturas, las etapas fenológicas se han adelantado en promedio en las últimas décadas, confirmando que el cambio climático está alterando significativamente la fenología de la vid. Esta aceleración de las etapas fenológicas afecta directamente a la calidad y la producción del vino. Los gráficos generados por el análisis de regresión lineal (OLS) y Random Forest reflejan la evolución de las variables meteorológicas de temperatura y precipitación, mostrando esta tendencia. En particular, las temperaturas máximas (TX) muestran un aumento significativo a partir de 1970, lo que indica un cambio hacia un clima más cálido. Del mismo modo, se observa que las temperaturas mínimas [Figura 1 (a) y (b)] han experimentado un aumento progresivo, lo que sugiere una disminución de la amplitud térmica y favorece una maduración más rápida de la uva.

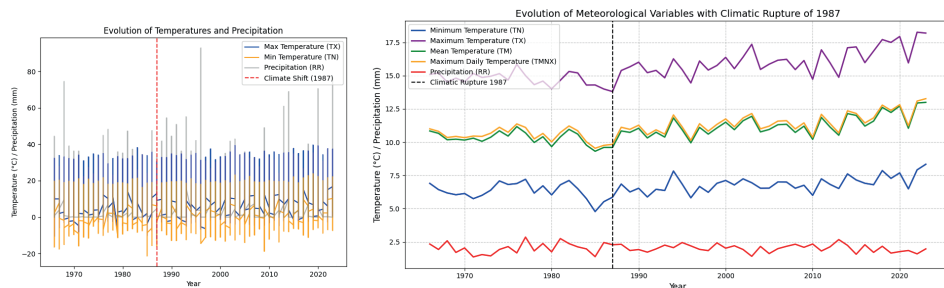


Figura 1. (a) y (b) Evolución de las variables meteorológicas con la ruptura climática de 1987 en la zona de Côte de Beaune (1966-2023)

Los resultados de este estudio validan la hipótesis de que el cambio climático, al aumentar las temperaturas, tiene un impacto directo en la fenología de la vid, acelerando las etapas fenológicas [12, 13]. Este fenómeno demuestra que las temperaturas más altas favorecen la acumulación de calor durante la temporada de crecimiento, acelerando la maduración de la uva y adelantando la cosecha [7]. El aumento implica un mayor estrés térmico en las vides, lo que afecta a su composición química, especialmente al equilibrio de azúcares, acidez y compuestos fenólicos, lo que podría alterar las características organolépticas del vino producido en la región [14].

En este estudio, el modelo permitió identificar variables climáticas clave, como la temperatura máxima con influencia directa sobre las fases fenológicas. Esta capacidad predictiva, junto con la posibilidad de escalar el modelo a otras regiones o condiciones climáticas futuras, convierte a la IA en una herramienta estratégica para anticipar impactos y diseñar respuestas adaptativas en viticultura de precisión. La integración de inteligencia artificial en la viticultura no solo permite mejorar la producción, sino que también ofrece soluciones para la revitalización de zonas rurales, asegurando que las comunidades agrícolas puedan adaptarse a los cambios climáticos y seguir siendo viables desde el punto de vista económico y social. Este tipo de estudios permite que los viñedos continúen siendo una actividad productiva viable en áreas rurales, contribuyendo a fijar población y fomentar el empleo local.

4. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del Proyecto de Cátedra Internacional sobre Inteligencia Artificial Fiable y Reto Demográfico dentro de la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA), en el marco del Plan Europeo de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Referencia: TSI-100933-2023-0001. Este proyecto está financiado por la Secretaría de Estado para la Digitalización y la Inteligencia Artificial y por la Unión Europea (Next Generation). Adicionalmente, queremos agradecer a BIVB por proporcionarnos

los datos fenológicos de *Pinot Noir* de Côte de Beaune. Estos datos fueron amablemente facilitados por Christine Monamy.

5. REFERENCIAS

1. Cardell, M. F., Amengual, A., & Romero, R. (2019). Future effects of climate change on the suitability of wine grape production across Europe. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2299-2310. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01502-x>
2. Moriondo, M., Jones, G. V., Bois, B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G., & Bindi, M. (2013). Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic Change*, 119(3-4), 825-839. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0739-y>
3. Perrot, N., Baudrit, C., Brousset, J. M., Abbal, P., Guillemin, H., Perret, B., & Picque, D. (2015). A decision support system coupling fuzzy logic and probabilistic graphical approaches for the agri-food industry: Prediction of grape berry maturity. *PLoS ONE*, 10(7), Artículo e0134373. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134373>
4. Shanmuganathan, S., Sallis, P., & Narayanan, A. (2010). Data mining techniques for modelling seasonal climate effects on grapevine yield and wine quality. In 2010 *2nd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks* (pp. 84-89). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CICSyN.2010.16>
5. Newlands, N. K. (2021). Artificial intelligence and big data analytics in vineyards: A review. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99862>
6. 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. *The Journal of Agricultural Science*, 154(5), 795-811. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000933>
7. Fraga, H., Freitas, T. R., Moriondo, M., Molitor, D., & Santos, J. A. (2024). Determining the climatic drivers for wine production in the C a region (Portugal) using a machine learning approach. *Land*, 13(6), Artículo 749. <https://doi.org/10.3390/land13060749>
8. Madelin, M., Bois, B., & Chabin, J.-P. (2010). Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole li e au r chauffement climatique. *EchoG o*, 14. <https://doi.org/10.4000/echogeo.12176>
9. Zito, S., Caffarra, A., Richard, Y., Castel, T., & Bois, B. (2018). Climate change and vine protection: The case of mildews management in Burgundy. *E3S Web of Conferences*, 50, Artículo 01006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185001006>
10. Lacueva-P rez, F. J., Ilarri, S., Barriuso, J. J., Balduque, J., Labata, G., & del-Hoyo, R. (2022). Grapevine phenology prediction: A comparison of physical and machine learning models. In *International Conference on Big Data Analytics and Knowledge Discovery* (pp. 263-269). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12670-3_24
11. De Ress guier, L., Mary, S., Le Roux, R., Petitjean, T., Qu    l, H., & Van Leeuwen, C. (2020). Temperature variability at local scale in the Bordeaux area: Relations with environmental factors and impact on vine phenology. *Frontiers in Plant Science*, 11, Artículo 515. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00515>
12. Venios, X., Korkas, E., Nisiotou, A., & Banilas, G. (2020). *Grapevine responses to heat stress and global warming*. *Plants*, 9(12), Artículo 1754. <https://doi.org/10.3390/plants9121754>

13. Alikadic, A., Pertot, I., Eccel, E., Dolci, C., Zarbo, C., Caffarra, A., de Filippi, R., & Furlanello, C. (2019). The impact of climate change on grapevine phenology and the influence of altitude: A regional study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.030>
14. Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1-2), 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>