

APROXIMACIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ÍNDICES BIOCLIMÁTICOS A LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR VITIVINÍCOLA DE LA REGIÓN DEL DUERO (CASTILLA Y LEÓN)

Astrid MARCOS SANZ

Facultad de Humanidades y Comunicación. Universidad de Burgos (UBU)

astridms@ubu.es

RESUMEN

En el contexto del cambio climático, la Región del Duero en Castilla y León –de gran tradición e importancia vitivinícola con doce Denominaciones de Origen Protegidas (DOP), está experimentando cambios en las condiciones ambientales y en los ritmos agroecológicos que revelan un potencial efecto distorsionador en la producción y calidad de la uva y del vino. Los índices bioclimáticos, entre los que se encuentran el Índice de Winkler o grados día crecimiento (GDD) (1944) y el Índice Heliotérmico de Huglin (1978) constituyen una herramienta eficaz para detectar posibles alteraciones en las condiciones climáticas de un área vitícola. En este sentido, el análisis, mediante estos índices bioclimáticos de las temperaturas diarias y de las precipitaciones anuales de un número representativo de estaciones meteorológicas del área de estudio, ha evidenciado cambios de tendencia que parecen consolidarse. El incremento de las temperaturas y la reducción de los recursos hídricos disponibles por el aumento de la evapotranspiración potencial plantean desafíos que repercutirán en el sector vitivinícola, afectando a todos los agentes implicados, tanto en los procesos de producción/elaboración, como en las actividades de la cadena de valor asociadas al sector. Estos retos van desde los cambios en la evolución fenológica de la vid e incremento de las necesidades hídricas, hasta el posible desplazamiento en altitud de los viñedos hacia las zonas climáticamente menos adversas para el cultivo, todo ello con posibles efectos sobre las características de los vinos.

Palabras clave: Cambio ambiental, índices bioclimáticos, adaptación, mitigación, viñedo, Duero.

ABSTRACT

In the context of climate change, the Duero Region in Castilla y León - a region with a great wine-growing tradition and importance with twelve Protected Designations of Origin (PDO) - is experiencing changes in environmental conditions and agro-ecological rhythms that reveal a potential distorting effect on grape and wine production and quality. Bioclimatic indices, including the Winkler Index or Growing Degree Day (GDD) (1944) and Huglin's Heliothermal Index (1978), are an effective tool for detecting possible alterations in the climatic conditions of a viticultural area. In this sense, the analysis by means of these bioclimatic indices of the daily temperatures and annual rainfall of a representative number of weather stations in the

study area, has revealed changes in trends that appear to be consolidating. The increase in temperatures and the reduction in available water resources due to the increase in potential evapotranspiration pose challenges that will have an impact on the wine sector, affecting all the agents involved, both in the production/processing processes and in the value chain activities associated with the sector. These challenges include changes in the phenological evolution of the vine and increased water requirements, to the possible shift in altitude of the vineyards towards climatically less adverse areas for cultivation, with possible effects on the characteristics of the wines.

Keywords: Environmental change, bioclimatic indices, adaptation, mitigation, vineyard, Douro

1. INTRODUCCIÓN.

Los efectos del cambio climático en los cultivos han sido ampliamente estudiados, tanto en los aspectos fenológicos (Zahradníček et al., 2024) como en los fisiológicos (Forkel et al, 2016). No obstante, sigue existiendo una gran incertidumbre respecto a sus consecuencias dada la complejidad y posibles cambios de tendencia de las variables que influyen en el comportamiento de las plantas bajo unas condiciones climáticas cambiantes y sus interacciones por el aumento de los gases de efecto invernadero de origen antrópico (Lesk et al., 2022).

La producción vitivinícola se ve afectada de manera directa por el calentamiento global. Las cada vez más cálidas temperatura medias y extremas, junto con los cambios en los regímenes de precipitación, entre otros factores, hacen a este sector especialmente vulnerable al cambio climático por la potencial variabilidad de la producción en cantidad y calidad (Jägermeyr et al., 2021). Además, los riesgos relacionados con el clima, como olas de calor, sequías o inundaciones, que, bien de manera aislada o combinada, ocurren con cada vez mayor frecuencia en el tiempo y en el espacio, plantean nuevos retos que solo podrán solventarse, y quizá en parte, a través de una correcta adaptación (IPCC, 2021; Lesk et al., 2022).

El viñedo, uno de los cultivos de mayor importancia económica a nivel mundial (Costa et al., 2020), tiene en el clima la razón principal de su territorialización (Biasi et al., 2019). La literatura científica señala como uno de los efectos más preocupantes derivados del cambio climático las limitaciones en la aptitud productiva de amplias zonas de distribución clásica de la vid (Schultz, 2010; Van Leeuwen y Destrac-Irvine, 2017). Y es que las regiones vitícolas, clasificadas tradicionalmente por índices bioclimáticos en función de su potencial climático para la producción de uva de vinificación (Winkler, 1962; Huglin 1978; Jones y Davis, 2000; Monteverde y De Sales, 2020), están experimentando cambios que ya están siendo registrados. Hasta el momento, las principales regiones vitivinícolas se encontraban ubicadas en las latitudes medias bajas, donde el clima favorece la producción de vino de calidad, que cuenta con gran salida en los mercados nacionales e internacionales (Lasanta et al., 2022). Sin embargo, amplias zonas, especialmente de la región mediterránea, pueden ver limitada, para finales de siglo, su idoneidad productiva debido a unas condiciones climáticas cada vez más cálidas y a sequías más extremas en beneficio de otras regiones situadas en latitudes más altas, con climas más fríos, como el sur de Reino

Unido, donde el incremento térmico global permite ya una mejor maduración de la uva y una menor afección de algunas enfermedades de la vid relacionadas con una humedad elevada (Mora et al., 2015; Van Leeuwen et al., 2024). Asimismo, las temperaturas elevadas favorecen unas mayores concentraciones de azúcar en la uva y, por tanto, mayor potencial alcohólico, además de niveles desequilibrados en acidez, color y aroma, comprometiendo la calidad de los vinos y su estabilidad (Costa et al., 2020; Van Leeuwen et al., 2019).

Los ritmos fenológicos de las plantas, y por tanto de la vid, están fuertemente ligados a la temperatura (Hufkens et al., 2012). El incremento térmico, que ha propiciado un inicio más temprano de los tipos de tiempo primaverales, adelanta los estados fenológicos durante todo el ciclo de desarrollo y acorta los intervalos de crecimiento (Cook y Wolkovich, 2016; Menzel et al., 2006; Jones y Davis, 2000). Este hecho, que puede afectar al rendimiento, supone potencialmente un problema adicional, ya que el desarrollo temprano y acelerado de los cultivos aumenta la magnitud de los daños por episodios de heladas tardías, cuya afección es especialmente peligrosa cuando las plantas se encuentran en las primeras etapas del ciclo biológico tras el periodo de latencia (Hufkens et al., 2012; Zahradníček et al., 2024).

La aparición más temprana de la brotación, además de por la temperatura, también se ve amenazada por unas condiciones de sequía más extremas (Cook y Wolkovich, 2016; Van Leeuwen et al., 2009). Y es que la cantidad y distribución de la precipitación anual también influye en la calidad de la uva; mientras que el estrés hídrico moderado propio del clima mediterráneo permite una acumulación óptima de los niveles de azúcar en la baya, un estrés hídrico excesivo limita la fotosíntesis y reduce su desarrollo (Van Leeuwen et al., 2009). Por tanto, y según las proyecciones del IPCC (2021), el descenso “probable” de las precipitaciones en las regiones secas de latitud media y subtropical, incluida España, supondrá un riesgo para la producción y los estilos del vino.

El estrés hídrico y el térmico severo también afectan a la productividad de la vid (Fraga et al., 2013). Además, cada una de las variedades tiene diferentes demandas de luz, calor y agua. En este sentido, con los cambios en las condiciones climáticas previstos, no todas las variedades cultivadas tradicionalmente en cada una de las zonas vitícolas van a poder adaptarse, por lo que verán alterada su capacidad productiva (Ghantous et al., 2024; Parker et al., 2011). Por ejemplo, mientras que la variedad Garnacha resiste unas condiciones más secas, la variedad Merlot es más sensible a estas (Van Leeuwen et al., 2009).

Según el IPCC (Bezner et al., 2022), la viabilidad de las regiones vitivinícolas y su capacidad productiva dependerá del conocimiento de la variabilidad climática local y de la puesta en marcha de medidas de mitigación y adaptación. Prácticas de gestión de los viñedos como la poda más tardía o el adelantamiento de la cosecha, u otras como la selección de material vegetal más resistente a las temperaturas más cálidas y a las sequías, la incorporación de regadío, o la propia reubicación del viñedo hacia altitudes más elevadas, son algunas de las estrategias que ya se plantean con frecuencia (Van Leeuwen et al., 2024).

1.1. Objetivos-hipótesis

Considerando este marco general, la presente aportación tiene por objeto mostrar los resultados del análisis climático llevado a cabo en la Región vitivinícola del Duero, como ámbito de estudio en el que se constatan cambios de tendencia en las variables climáticas con potenciales efectos en el sector vitivinícola. Es un punto de partida necesario para estudiar la viabilidad del cultivo en nuevos contextos ambientales en una región vinatera de gran importancia en España, así como las posibles estrategias de adaptación/mitigación para hacer frente y/o moderar los impactos del cambio ambiental en curso.

Las hipótesis que se plantean son:

- El calentamiento global, y específicamente regional en el área de estudio, tendrán un impacto significativo en el cultivo de la vid.
- Metodológicamente, los índices bioclimáticos son buenos indicadores para estudiar el impacto del cambio climático en la vid.

2. ÁREA DE ESTUDIO, DATOS Y MÉTODOS

El área de estudio es la Región vitivinícola del Duero en Castilla y León. Se toman como base territorial para el estudio de las variables climáticas las provincias de Soria, Burgos, Valladolid, Zamora y Salamanca por las que discurre el Duero. Con larga tradición vitivinícola, la zona de estudio incluye doce Denominaciones de Origen Protegidas (DOP) en torno al Duero: las Denominaciones de Origen (DO) «Ribera de Duero», «Arlanza», «Cigales», «Rueda», «Toro», «Tierra del Vino de Zamora» y «Arribes»; los Vinos de Calidad (VC) de «Valtiendas» y «Valles de Benavente»; y, los Vino de Pago (VP) de «Abadía de Retuerta», «Dehesa Peñalba» y «Urueña». En esta zona, con una superficie de viñedo total aproximada de 65.383 ha, la mayor parte del viñedo es de secano.

Las condiciones climáticas de este sector central de la cuenca sedimentaria castellanoleonesa se corresponden con un clima mediterráneo de interior, de inviernos largos y rigurosos, y veranos cortos, secos, con días calurosos y contrastados diariamente, con matices en los Arribes del Duero, donde la menor altitud y configuración geomorfológica de abrigo favorece unos inviernos más suaves y unos veranos más largos y calurosos (Calonge, 1990). En el resto de la cuenca, son habituales las advecciones muy frías, con episodios de heladas tardías en los meses de marzo y abril, altamente dañosas para los cultivos (Gil y Olcina, 2017). En relación a las precipitaciones, no son muy abundantes, aunque con diferencias apreciables entre unos sectores y otros, entre 325 y 600 mm.

Para determinar la magnitud de los cambios en las condiciones climáticas, se analizaron las temperaturas diarias y anuales, además de las precipitaciones anuales, de 10 estaciones meteorológicas durante el período de 1950 a 2022. Los datos fueron extraídos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Para la selección de las estaciones meteorológicas se realizó una búsqueda de las que, siendo representativas del área de estudio, tuvieran series climáticas largas y superasen el período de 30 años de registro recomendado por la Organización Meteorológica Mundial. Algunas series climáticas presentaban una ausencia de datos

en determinados periodos. Para solventar dicho problema, se procedió a su reconstrucción mediante correlación lineal tomando para ello la estación con datos más próxima a la estudiada.

Con la finalidad de observar la tendencia de las temperaturas y los posibles cambios en la idoneidad climática para el cultivo de la vid en la región vitivinícola del Duero, se utilizaron índices bioclimáticos, como el índice de Winkler o grados días de crecimiento (GDD) (Winkler, 1962), y el índice Heliotérmico de Huglin (Huglin, 1978), que permiten evaluar la idoneidad zonal para el cultivo de la vid. Ambos índices se basan en el cálculo de los grados-día por encima de 10°C a partir de 1 de abril. Se estudiaron también las temperaturas y precipitaciones medias anuales para examinar su evolución. A las series obtenidas se les aplicó el test no paramétrico de Mann-Kendall a fin de comprobar si la tendencia apreciada era estadísticamente significativa. Con los datos obtenidos, y a fin de observar la tendencia a futuro, se realizaron proyecciones lineales a 2050 utilizando, para ello, la recta de regresión lineal ofrecida por el mismo test estadístico:

$$f(\text{year}) = Q * (\text{year} - \text{firstDataYear}) + B$$

Donde:

(Q) es la magnitud de la pendiente por año. Si este valor es positivo, indica una tendencia creciente. Si el valor es negativo, indica una tendencia decreciente (Jiqin et al., 2023).

(B) es una constante

(firstDataYear) es el primer año de la serie climática estudiada. En este caso, 1950.

Una vez calculados los índices y las proyecciones climáticas, se procedió a la representación cartográfica de los resultados. Para ello, se descargó la capa Shapefile de estaciones climatológicas de la AEMET. Tras la selección de los observatorios objeto de estudio, se asignó, a cada uno de los años de la serie temporal 1950-2022, los resultados de cada índice y se realizó una interpolación inversa a la distancia (IDW). Se incorporó, además, el modelo digital del terreno (MDT) (200 metros), extraído del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

3. RESULTADOS

Partiendo de la caracterización climática indicada anteriormente, el estudio de la evolución de las variables climáticas mediante los índices de Winkler y de Huglin, dio resultados evidentes de una tendencia de incremento de las temperaturas diarias en nueve de los diez observatorios analizados. Esta tendencia térmica al alza es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 99,9%, mientras que, en el restante, lo es con un nivel de confianza del 95%. Del mismo modo, el análisis de la temperatura media anual, así como las proyecciones a 2050, muestran una clara tendencia creciente en la totalidad del territorio analizado (Figura 1). Los datos obtenidos de los índices dan lugar, además, a cambios en la categorización vitivinícola seguida por ambos índices, de manera que es probable que en el futuro se produzcan cambios en la aptitud agroecológica de las variedades a cultivar.

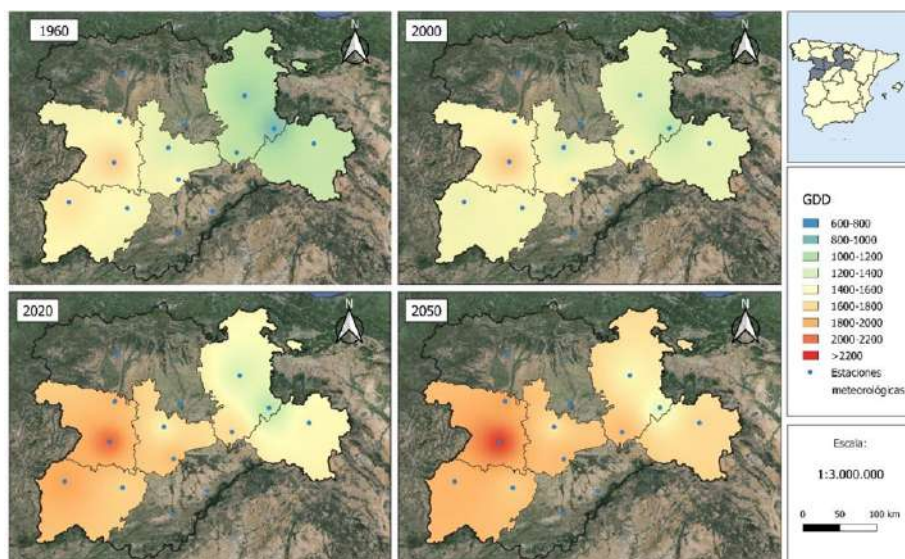


Fig.1: Evolución del índice bioclimático GDD en la Región vitivinícola del Duero en Castilla y León. Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de la AEMET.

El análisis de las temperaturas ha evidenciado, también, un aumento de las denominadas por algunos autores “temperaturas negativas para la vid”, esto es, temperaturas superiores a los 35°C a la sombra, que, en función de su duración y frecuencia, pueden tener efectos perjudiciales en la fisiología del cultivo e, incluso, inhibir de manera parcial o total las funciones de la planta (Monteverde y De Sales, 2020). Como ejemplo, en el observatorio climatológico de Burgos aeropuerto se registraron, para el período 1950-1999, un total de 60 días con temperaturas iguales o superiores a los 35°C, mientras que, para el período 2000-2022, el número de días asciende a 114. Lo mismo ocurre en otros observatorios como el de Salamanca, donde para el período 1950-1999, 231 días registraron temperaturas iguales o superiores a los 35°C, dato que asciende a 252 días para el período 2000-2022.

En el caso de las precipitaciones, los resultados del mismo test muestran que prácticamente llueve lo mismo que hace 50 años, a excepción de León y Ávila, que presentan un descenso, pero solo con un nivel de confianza del 90%. No obstante, sí puede observarse, en todos los casos, una cierta reducción.

4. DISCUSIÓN

La Región vitivinícola del Duero ha experimentado un incremento paulatino de las temperaturas desde el año 1950. Teniendo en cuenta los cambios observados en los propios índices bioclimáticos, donde se ha registrado un aumento de los días con temperaturas superiores a 10°C, y de cumplirse tanto las proyecciones climáticas del IPCC como las tendencias lineales a 2050 analizadas en el área de estudio, la idoneidad zonal productiva, la superficie apta para el cultivo, el rendimiento de la vid

y la viabilidad de las variedades cultivadas tradicionalmente pueden verse gravemente afectados. Como ejemplo, un estudio desarrollado por Ghantous et al. (2024) demostró que, para la zona del Líbano, la variedad Cabernet Sauvignon, cultivada también en el área de estudio del Duero, ha experimentado unos descensos drásticos en los rendimientos y en la calidad de la uva bajo unas condiciones cada vez más cálidas. En otras zonas, como en Burdeos, donde ya se han observado cambios en el estilo del vino, se han adelantado sustancialmente las fechas de vendimia.

La tendencia al alza de las temperaturas, con una cuantía de precipitaciones que no varía en gran medida, provocará un incremento del déficit hídrico fruto del aumento de la evapotranspiración potencial. Todo ello, junto con el descenso de la humedad del suelo, derivará en una mayor demanda de agua por parte de la agricultura en general, y del cultivo de la vid en particular.

Para hacer frente a unas condiciones climáticas cada vez más cálidas y secas, y dada la sensibilidad de la vid a los cambios en las condiciones climáticas e importancia socioeconómica del sector, es fundamental la puesta en marcha de medidas de mitigación y adaptación que minimicen el impacto del cambio climático. Técnicas como una poda más tardía o la propia cobertura del suelo con material vegetal, pueden favorecer una maduración más controlada y, por tanto, un fruto más equilibrado. Sin embargo, y dadas las proyecciones, es probable que sea necesario implantar otras medidas como la cobertura de regadío para paliar las situaciones de estrés hídrico, cambios en las variedades o en la propia ubicación del viñedo. De hecho, todas ellas, que serán analizadas en investigaciones futuras poniendo en valor la capacidad de respuesta de los diferentes agentes implicados en torno a la producción vitícola y elaboración de vinos de calidad con identidad de origen Duero, ya se están efectuando en algunas zonas, como en La Rioja, donde la superficie de viñedo en regadío se ha incrementado de manera considerable, desde 1990 hasta 2018, y donde también se ha extendido el viñedo cultivado a mayor altitud (Lasanta et al., 2022). No obstante, la capacidad de adaptación dependerá no sólo del ritmo de adopción de las medidas, sino también del ajuste reglamentario de las Denominaciones de Origen y de la propia capacidad de los diferentes agentes del sector para responder a los retos del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido realizada en el marco del contrato predoctoral de personal investigador de la Junta de Castilla y León (convocatoria 2022), cofinanciado con el Fondo Social Europeo Plus (FSE+).

REFERENCIAS

- Biasi, R., Brunori, E., Ferrara, C., Salvati, L. (2019): Assessing Impacts of Climate Change on Phenology and Quality Traits of *Vitis vinifera* L.: The Contribution of Local Knowledge, Plants (Basel), 8(5):121. doi: <https://doi.org/10.3390/plants8050121>
- Bezner Kerr, R., T. Hasegawa, R. Lasco, I. Bhatt, D. Deryng, A. Farrell, H. Gurney-Smith, H. Ju, S. Lluch-Cota, F. Meza, G. Nelson, H. Neufeldt, and P. Thornton (2022): Food, Fibre, and Other Ecosystem Products. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 713–906. doi <https://doi.org/10.1017/9781009325844.007>
- Calonge, G. (1990): La excepcionalidad climática de los Arribes del Duero, ERIA, 21, 45-59. <https://doi.org/10.17811/er.0.1990.45-60>
- Cook, B., Wolkovich, E.M. (2016): Climate change decouples drought from early wine grape harvests in France, Nature Climate Change, 6, 715-719. doi: <https://doi.org/10.1038/nclimate2960>
- Costa, C., Graça, A., Fontes, N., Teixeira, M., Gerós, H., Santos, J. (2020): The Interplay between Atmospheric Conditions and Grape Berry Quality Parameters in Portugal, Applied sciences, 10(14). <https://doi.org/10.3390/app10144943>
- Forkel, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Feeling, R., Heimann, M., Zaehle, S., Reichstein, M. (2016): Enhanced seasonal CO₂ exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems. Science, 351(6274), 696–699. doi: <https://doi.org/10.1126/science.aac4971>
- Fraga, H., Malheiro, A.C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J.A. (2013): An overview of climate change impacts on European viticulture, Food and Energy Security, 1, 94-110. doi: <https://doi.org/10.1002/fes3.14>
- Ghantous, G., Popov, K., El Sebaaly, Z., Sassine, Y.N. (2024): Changes in Cabernet Sauvignon yield and berry quality as affected by variability in weather conditions in the last two decades in Lebanon, Scientific Reports, 14(6992). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57665-z>
- Gil, A., Olcina, J. (2017): Tratado de climatología. Publicaciones Universitat d'Alacant.
- Hufkens, K., Friedl, M., Keenan, T.F., Sonnentag, O., Bailey, A., O'Keefe, J., Richardson, A. (2012): Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out, Global Change Biology, 18(7). doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02712.x>
- Huglin, P. (1978): Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France, 64, 1117-1126. CR_Académie_agriculture_1978_64_Huglin.pdf (univ-brest.fr)
- IPCC (2021): Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb,

- M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.
- Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A.C., Elliot, J., Balkovic, J., Castillo, O., Faye, B., Foster, I., Folberth, C., Franke, J.A., Fuchs, K., Guarin, J.R., Heinke, J., Hoogenboom, G., Lizumi, T., Jain, A.K., Kelly, D., Khabarov, N., Lange, S., Lin, T.-S., Liu, W., Mialyk, O., Minoli, S., Moyer, E.J. (...) Rosenzweig, C.: (2021): Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food*, 2, 873–885. doi: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>
- Jiqin, H., Temesgen, F., Chaka, S. (2023): Application of MK trend and test of Sen's slope estimator to measure impact of climate change on the adoption of conservation agriculture in Ethiopia, *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 977-988. doi: <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.508>
- Jones, G.V., Davis, R.: (2000): Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition and Wine Production and Quality for Bordeaux, France, *American Journal of Enology and Viticulture*, 51, 249-261. doi: <https://doi.org/10.5344/ajev.2000.51.3.249>
- Lasanta, T., Bardoja, C., Cortijos, M. Nadal, E., Martín, I., García, E. (2022): Estrategias de adaptación al Cambio Climático en el viñedo de la cuenca mediterránea: El caso de la Rioja. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 48(1), 133-156. doi: <http://doi.org/10.18172/cig.5062>
- Lesk, C., Anderson, W., Rigden, A., Coast O., Jägermeyr, J., McDermid, S., Davis, K., Konar, M. (2022): Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change, *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 872-889. doi: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8>
- Menzel, An., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, E., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briedge, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnell, A., Flella, Y., Jateczak, K., ... Zust, A. (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern, *Global Change Biology*, 12(10). doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- Monteverde, C., De Sales, F. (2020): Impacts of global warming on southern California's winegrape climate suitability, *Advances in Climate Change Research*, 11, 279-293. doi: <https://doi.org/10.1016/j.accr.2020.08.002>
- Mora, C., Cladwell, I.R., Caldwell, J.M., Fisher, M.R., Genco, B.M., Running, S.W. (2015): Suitable Days for Plant Growth Disappear under Projected Climate Change: Potential Human and Biotic Vulnerability, *PLOS BIOLOGY*, 10, 1-15. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002167>
- Parker, A.K., de Cortázar-Atauri, I.G., van Leeuwen, C., Chuine, I. (2011): General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L., *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17, 206-216. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x>
- Schultz, H. (2010): Climate Change and Viticulture: Research Needs for Facing the Future, *Journal of Wine Research*, 21(2-3), 113-116. doi: <https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530093>
- Van Leeuwen, C., Treoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., Gaudillère, J-P. (2009): Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux

wine. how can it be assessed for vineyard management purposes?, *Journal international des sciences de la vigne et du vin*, 43(3), 121-134. doi: <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>

Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A. (2017): Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard, *OENO One*, 51(2), 147-154. doi: <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1647>

Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., Rességuier, L., Ollat, N. (2019): An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations, *Agronomy*, 9(9), 1-20. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>

Van Leeuwen, C., Sgubin, G., Bois, B., Ollat, N., Swingédouw, D., Zito, S., Gabetta, G. (2024): Climate change impacts and adaptations of wine production, *Nature reviews earth & environment*, 5, 258-275. doi: <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00521-5>

Winkler, A.J. (1962): *General Viticulture* University of California Press, Berkeley
Zahradníček, P., Brázdil, R., Řehoř, J., Trnka, M., Bartošová, L., Rožnovský, J. (2024): Past and present risk of spring frosts for fruit trees in the Czech Republic, *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 965-984. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04671-2>