

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitatea Publikoa

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS AGRÓNOMOS

*NEKAZARITZA INGENIARITZAREN GOI
MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA*

Diseño de modelos fenológicos para variedades de vid adaptados
a las condiciones climáticas de Navarra

presentado por

Sara Valencia Sanz(e)k

aurkeztua

GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO
RURAL

Mención en Ingeniería del Medio Rural

*GRADUA NEKAZARITZAKO ELIKAGAIEN ETA LANDA
INGURUNEAREN INGENIARITZAN*

Mayo 2019

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
NAFARROAKO UNIBERTSITATE PUBLIKOA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

NEKAZARITZA INGENIARITZAREN GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA

Diseño de modelos fenológicos para variedades de vid adaptados
a las condiciones climáticas de Navarra

Trabajo de Fin de Grado presentado por Sara Valencia Sanz al objeto de optar al título de
Graduada en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. Dirigido por Carlos Miranda
Jiménez

Director
Zuzendaria

Autora
Egilea

Carlos Miranda Jiménez

Sara Valencia Sanz

AGRADECIMIENTOS

A Carlos Miranda, director del trabajo, por haberme ayudado con mi trabajo y su plena disponibilidad en todo momento.

A Ana, Félix e Iker, trabajadores de Evena, por haberme facilitado los datos de mi trabajo, su ayuda y su disponibilidad en todo momento.

A mis padres, Ángel y Ángela, y a mi hermano Rubén, por haberme dado la oportunidad de estudiar lo que me gusta, haber confiado en mí y haber sido un pilar fundamental de apoyo, no solo en este trabajo sino también durante toda la carrera.

A mi novio, Borja, por haber confiado en mí y haberme apoyado tanto durante estos años.

Finalmente, a mis amigas y amigos de San Martín y Pamplona, y mis compañeros de carrera por haber sido también un gran apoyo durante toda la carrera.

Resumen

La vid es un cultivo muy plástico, capaz de adaptarse a un amplio rango de situaciones climáticas y por eso se extiende por gran parte del mundo, pero dependiendo de la zona en la que esté se comporta de diferente forma en cuanto a su desarrollo fenológico, por lo que es necesario disponer de modelos fenológicos adaptados a las condiciones climáticas de cada zona. El objetivo de este estudio ha sido ajustar modelos fenológicos para los estados brotación, floración y envero de la vid, que estén adaptados a las condiciones climáticas de Navarra, comparando su eficiencia con la del modelo fenológico más extendido en la actualidad. Para ello se ha utilizado una base de datos de fenología tomada desde el año 1985 hasta 2018, de cinco variedades (Tempranillo, Garnacha, Graciano, Merlot y Chardonnay) en varias parcelas y localidades de Navarra. Se ha comprobado que el modelo de referencia estima el ciclo de la vid con mucho adelanto (hasta 15 días) respecto a la realidad. Ajustando los parámetros del modelo con las observaciones de Navarra se consigue mejorar notablemente la eficiencia y reducir los errores de predicción. Los modelos de tipo secuencial ensayados no han supuesto una mejora de la eficiencia de predicción frente a los modelos de tipo tiempo termal.

Palabras clave: Vid, Fenología, Modelización, Temperatura, Cambio climático

Abstrac

Grapevine is a very plastic crop, capable of adapting to a wide range of climatic situations and therefore it is grown throughout the world but depending on the region it behaves differently in terms of phenological development, so it is necessary to adjust phenological models adapted to the climatic conditions of each area. The aim of this study has been to adjust phenological models for budbreak, flowering and veraison stages, adapted to the climatic conditions of Navarre, comparing their efficiency with the most widespread phenological model. For this purpose, a phenology database was used, taken from 1985 to 2018, of five varieties (Tempranillo, Grenache, Graciano, Merlot and Chardonnay) in several plots and localities of Navarre. It has been shown that the reference model estimates the cycle of the vine well ahead of reality (up to 15 days). Adjusting the parameters of the model with the observations of Navarre considerably improves efficiency and reduces prediction errors. The sequential type models tested have not meant an improvement in prediction efficiency compared to thermal time type models.

Key words: Grapevine, Phenology, Modeling, Temperature, Climate change

ÍNDICE GENERAL

1.	Antecedentes	1
1.1.	La vid.	1
1.1.1.	Importancia en el mundo y en Navarra	1
1.2.	Necesidades climáticas. Fenología.....	4
1.2.1.	Fenología y temperatura.....	4
1.2.2.	Necesidades climáticas.....	8
1.3.	Modelización de la fenología en vid	9
1.3.1.	Estimación de la satisfacción del reposo invernal.....	9
1.3.2.	Estimación de la acumulación de calor de forzado	10
1.3.3.	Modelos fenológicos en vid	12
2.	Objetivos	16
3.	Material y métodos.....	17
3.1.	Material	17
3.1.1.	Datos fenológicos.....	17
3.1.2.	Datos climáticos	17
3.2.	Métodos.....	18
3.2.1.	Caracterización del clima	18
3.2.2.	Modelos fenológicos evaluados	19
3.2.3.	Validación de los modelos obtenidos	20
4.	Resultados y discusión	22
4.1.	Caracterización climática	22
4.2.	Fechas de ocurrencia de los estados	23
A.	Brotación.....	23
B.	Floración	24
C.	Envero	25
4.3.	Modelización de la fenología	27
4.3.1.	Ajuste de los parámetros	27
4.3.2.	Modelos ajustados	30
a)	Brotación.....	30
b)	Floración	31
c)	Envero	32
5.	Conclusiones	35
6.	Bibliografía	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de la superficie (ha) del cultivo del viñedo en España entre las diferentes comunidades. Elaboración propia con los datos de (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2018).....	2
Figura 2. Distribución de comarcalización agraria en Navarra (Vicente y Donézar 2004)	2
Figura 3. Distribución de las zonas climáticas en Navarra (Vicente y Donézar 2004)....	3
Figura 4. Distribución espacial de la superficie cultivada de viñedo en España en función al IH para el periodo de 1980-2010 (Honorio et al., 2018)	9
Figura 5. Ejemplo de acumulación de GDH durante dos días con una Tb de 4,5°C (Miranda et al., 2018)	12
Figura 6. Gráfica genérica de los tipos de modelos de acumulación GDH en la que se muestra la diferencia de contabilización de GDH entre ambas (Zhang and Taylor 2015)	12
Figura 7. Enfoque conceptual de los modelos fenológicos más empleados en fruticultura (Miranda et al., 2018)	14
Figura 8. Evolución del Índice de Huglin en las localidades estudiadas para el periodo 1984-2018.....	22
Figura 9. Evolución de las fechas de brotación de a/Chardonnay, b/ Graciano, c/Merlot, d/Tempranillo y e/ Garnacha en Olite durante el periodo de años comprendido entre 1985-2018. En el eje Y se representa el día del estado fenológico brotación y en el eje X la serie de años.....	23
Figura 10. Evolución de las fechas de floración de a/Chardonnay, b/ Graciano, c/Merlot, d/Tempranillo y e/ Garnacha en Olite durante el periodo de años comprendido entre 1985-2018. En el eje Y se representa el día del estado fenológico floración y en el eje X la serie de años.....	25
Figura 11. Evolución de las fechas de envero de a/Chardonnay, b/ Graciano, c/Merlot, d/Tempranillo y e/ Garnacha en Olite durante el periodo de años comprendido entre 1985-2018. En el eje Y se representa el día del estado fenológico envero y en el eje X la serie de años.....	26
Figura 12. Eficiencia del modelo SEQ en función de Tb para el estado brotación (B) de la variedad CH.....	27
Figura 13. Eficiencia del modelo SEQ en función de Topt para el estado brotación (B) de la variedad CH.....	27
Figura 14. Eficiencia del modelo SEQ en función de Creq para el estado brotación (B) de la variedad CH.....	28
Figura 15. Error RMSE del modelo SEQ en función de Tb para el estado brotación (B) de la variedad CH.....	28
Figura 16. Error RMSE del modelo SEQ en función de Topt para el estado brotación (B) de la variedad CH.....	29

Figura 17. Error RMSE del modelo SEQ en función de C_{req} para el estado brotación (B) de la variedad CH 29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de la superficie dedica al viñedo en las diferentes Comarcas Agrarias (Agricultura, Ganadería y Medio Rural, 2017).....	3
Tabla 2. Clasificación de climas a partir del valor del Índice Huglin (IH) propuesta por Tonietto and Carbonneau (2004).....	8
Tabla 3. Unidades de frío acumuladas según la temperatura. Modelo de Unidades de Frío (UF). Fuente: Adaptado de (Miranda et al., 2018)	10
Tabla 4. Resumen de datos fenológicos empleados en el estudio	17
Tabla 5. Serie de datos climáticos disponibles para el empleo de los modelos fenológicos	18
Tabla 6. Clasificación de climas a partir del valor del Índice Huglin (IH) propuesta por Tonietto and Carbonneau (2004).....	18
Tabla 7. Requerimientos de calor (GDD) desde el día 60 necesarios para que cada variedad alcance la floración (I) y el envero (M) según el modelo GFV (Parker et al., 2013).....	19
Tabla 8. Parámetros ajustados y validación de los modelos los modelos secuencial y GFV ajustado, para el estado brotación.....	31
Tabla 9. Parámetros ajustados y validación de los modelos secuencial, GFV y GFV ajustado, para el estado floración de cada una de las variedades.	32
Tabla 10. Parámetros ajustados y validación de los datos calculados según los modelos secuencial, GFV y GFV ajustado, para el estado envero de cada una de las variedades.	34

1. Antecedentes

1.1. La vid.

1.1.1. Importancia en el mundo y en Navarra

La vid (*Vitis vinífera L.*) es una planta cultivada desde la antigüedad y es uno de los cultivos leñosos perennes más importante y relevantes del mundo. La superficie mundial dedicada al cultivo de la vid ronda las 7,9 millones de ha y el número de variedades de *Vitis vinífera L.* registradas en el mundo y surgidas por evolución natural es de alrededor de 5.000 (Tessier et al. 1999). Según Fregoni (2007), más del 60% (4.900.000 ha) de la superficie de viñedo se encuentra en Europa, seguido de Asia con un 20,4% (1.727.000 ha), América con un 12,1% (967.000 ha), África un 4,5% (395.000 ha) y finalmente Oceanía con un 2,2% (192.000 ha). Estas superficies de viñedo están distribuidas en regiones climáticas muy diferentes, lo que hace que haya situaciones muy distintas en cuanto a su desarrollo fenológico. Esto se debe a que el comportamiento fenológico de la vid depende en gran medida de la climatología (Fernández et al. 2012). De hecho, existen estudios en los que utilizan la vid como indicador de variaciones asociadas al cambio climático debido a que es considerado como un cultivo muy sensible a fluctuaciones climáticas. En ellos se ha observado que hay fluctuaciones en el número de días que tarda en completarse el ciclo vegetativo de la vid, y como consecuencia la fecha de vendimia, lo cual puede afectar a la calidad de la uva y al rendimiento (Marais, Calitz, and Haasbroek 2017).

En el caso de España, la vid (*Vitis vinífera L.*), es un cultivo característico de la cultura y el paisaje agrario en la mayor parte del territorio español, además, es uno de los cultivos más importantes en España, país que se sitúa a la cabeza mundial en cuanto a extensión del cultivo de la vid con 974.550 ha, un 13% del total de la superficie dedicada al cultivo en el mundo y un 30% del total en Europa. La vid ocupa el tercer lugar en extensión de los cultivos españoles, detrás del cereal y del olivo. Las comunidades con mayores superficies (ha) dedicadas al viñedo son, en primer lugar, Castilla la Mancha con una superficie del 49% del total. En segundo lugar, Extremadura con una superficie del 9% del total. Y finalmente, Valencia y Castilla León con un 7% del total ambas dos (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2018). El cultivo de la vid tiene una repercusión importante en la economía del país, por lo que es importante seleccionar las variedades que mejor se adapten a las condiciones climatológicas de la zona, ya que el comportamiento fenológico de este cultivo depende en gran medida de la climatología

En la Figura 1 se muestra la distribución de la superficie de España dedicada al cultivo de la vid entre las diferentes comunidades.

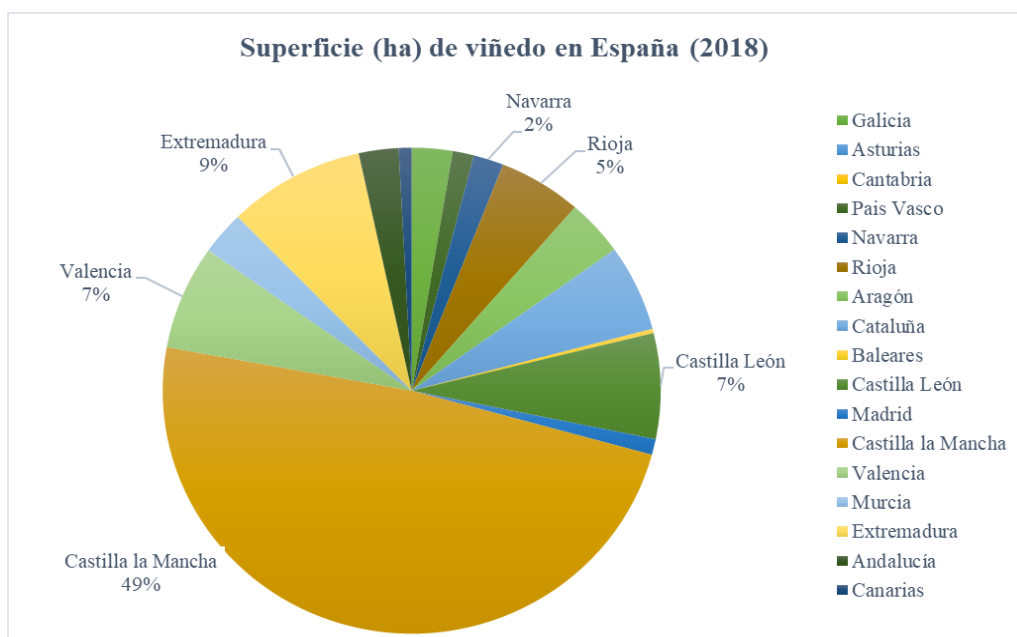


Figura 1. Distribución de la superficie (ha) del cultivo del viñedo en España entre las diferentes comunidades. Elaboración propia con los datos de (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2018).

Navarra ocupa el 2% de la superficie nacional de cultivo de vid, siendo el cultivo leñoso más importante de la comunidad. La vid en Navarra ocupa 19.191 ha, repartidas por toda la geografía de la comunidad, de las cuales 7.490 ha de superficie están dedicadas al viñedo en secano y 11.702 ha están dedicadas a viñedo en regadío (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2018). El cultivo de la vid es un cultivo característico de la cultura y el paisaje agrario en la Comunidad Foral de Navarra. Además, tiene una repercusión económica importante en algunas zonas de la comunidad, por lo que es importante seleccionar y adaptar las variedades a las condiciones climatológicas de la zona. Navarra está dividida en siete Comarcas Agrarias, caracterizadas por unas condiciones físicas del suelo y una climatología propia. Estas se visualizan en la Figura 2 son las siguientes (Vicente and Donézar 2004):

- Comarca I o Noroccidental
- Comarca II o Pirineos
- Comarca III o Cuenca de Pamplona
- Comarca V o Navarra Media
- Comarca VI o Ribera Alta
- Comarca VII o Ribera Baja



Figura 2. Distribución de comarcalización agraria en Navarra (Vicente y Donézar 2004)

La distribución de superficie ocupada por el viñedo en estas Comarcas Agrarias se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de la superficie dedica al viñedo en las diferentes Comarcas Agrarias (Agricultura, Ganadería y Medio Rural, 2017)

Comarca	Superficie (ha)		Total
	Regadío	Secano	
I		0	4
II		6	91
III	147	379	526
IV	793	2982	3775
V	1361	2032	3393
VI	5802	1974	7776
VII	2981	272	3253
Total	11090	7734	18824

Una de las principales características del clima de Navarra sin duda es su gran variabilidad climática en el territorio. Esta variabilidad se ve representada en la Figura 3. Para describir de forma general las condiciones climáticas, basando la descripción en la comarcalización agraria, se consideran cuatro zonas (Vicente y Donézar, 2004):

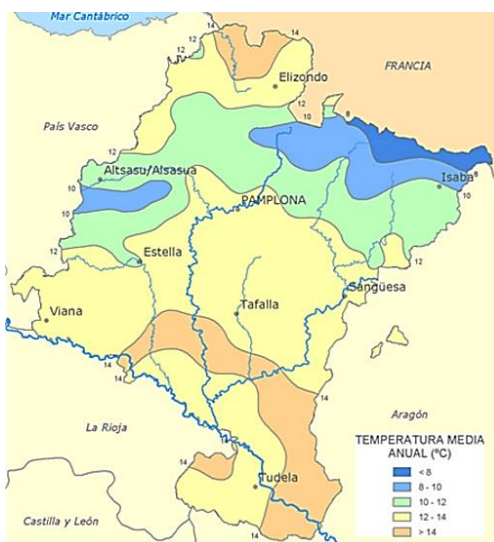


Figura 3. Distribución de las zonas climáticas en Navarra (Vicente y Donézar 2004)

- **Zona Noroeste:** Es la Navarra Atlántica, que abarca todo el cuadrante noroccidental y que se corresponde con la Comarca Agraria I y la parte norte de la Comarca IV. La precipitación media anual varía de 1.100 a 2.500 mm y la temperatura media anual oscila entre 8,5 y 14,5 °C.

- **Zona Alpina:** incluye los valles pirenaicos y prepirenaicos y coincide con la Comarca Agraria II. La precipitación media anual varía de 700 a 2.200 mm y la temperatura media anual oscila entre 7 y 13 °C.
- **Zona Media:** De oeste a este, abarca el área menos montañosa y más meridional de la Comarca Agraria IV y la totalidad de las Comarcas Agrarias III y V. La precipitación media anual varía entre los 450 y los 1.100 mm y la temperatura media anual entre los 11 y los 14 °C.
- **Ribera del Ebro:** incluye las Comarcas Agrarias VI y VII y se corresponde con la zona de clima mediterráneo más seco de Navarra. la precipitación media anual es menor a los 500 mm y la temperatura media anual oscila en torno a los 14 °C.

Esta distribución tan amplia del cultivo por toda la comunidad hace que el viñedo esté cultivado en situaciones climáticas muy distintas, desde zonas frescas y húmedas en el norte hasta zonas cálidas y secas en la ribera. Esto va a dar lugar a muchas situaciones distintas en cuanto a su desarrollo fenológico, ya que este depende en su gran mayoría de la climatología (Fernández et al. 2012). Este desarrollo heterogéneo va a dar lugar a fluctuaciones en las fechas en las que se alcanzan los diferentes estados fenológicos.

Sumado a todo esto de la gran variabilidad climática en el territorio, durante las últimas décadas se ha observado como se ha incrementado la temperatura en Navarra como consecuencia al cambio climático, dando lugar a fechas de vendimia más tempranas y ciclos fenológicos más cortos. Los índices bioclimáticos más utilizados e importantes para la viticultura han cambiado significativamente desde el año 1951, haciendo que los efectos perjudiciales de la maduración avanzada sobre la composición de la uva y el vino mencionados anteriormente sean un problema cada vez mayor y que debe buscar una solución (Alonso y Martín 2011; Santesteban et al. 2017). Por todo ello, la adaptación de la viticultura a este cambio es fundamental y necesario para completar de forma adecuada el ciclo fenológico de la vid y evitar pérdidas económicas a causa de daños en cosechas por altas temperaturas, sequías durante la época de brotación y floración, heladas durante el periodo de brotación, etc.

Para poder mejorar y adaptarse a esta situación, sería conveniente disponer de formas de modelizar los procesos biológicos del cultivo.

1.2. Necesidades climáticas. Fenología.

1.2.1. Fenología y temperatura

La fenología es la ciencia que estudia el crecimiento y el desarrollo de la vid durante un periodo de tiempo (ciclo). Esta evalúa el desarrollo, diferenciación e iniciación de órganos y estructuras (Mullins, Bouquet, y Williams. 1992). El estudio de la fenología de la vid es una referencia y una herramienta necesaria y recomendada a la hora del manejo del cultivo. Este ayuda a conocer los estados por los cuales pasa el cultivo y cómo es el desarrollo y crecimiento de los órganos de la vid. Determinar cuándo se van a dar los diferentes estados por los que pasa la vid es importante para el correcto desarrollo del cultivo, estimación de la producción y vendimia y para ayudar al viticultor a que las técnicas de cultivo que utilice sean las adecuadas en cada momento.

El ciclo fenológico de la vid se caracteriza por la necesidad de tener un periodo llamado reposo invernal en el que es necesario que se satisfagan unas necesidades de frío (necesidades de frío bajas para el caso del cultivo de vid) para superar este periodo y que la planta brote, seguido de la necesidad de acumular unas necesidades de calor para alcanzar los diferentes estados del ciclo.

La determinación del estado fenológico en el que se encuentra el viñedo en un momento dado es bastante difícil, ya que la evolución de los órganos no se realiza de manera simultánea en el conjunto del viñedo, ni siquiera en una misma cepa.

El desarrollo de la vid, el rendimiento y composición del fruto, y por consiguiente de la calidad del vino, están influenciados por una serie de factores como son la variedad, la ubicación y por consiguiente el clima y los factores climáticos (temperatura, la disponibilidad de agua y el fotoperiodo), etc. Sin embargo, los factores más importantes en el desarrollo fenológico de la vid son la variedad y la temperatura, siendo esta última la más importante.

Una característica importante a tener en cuenta a la hora de estimar el desarrollo fenológico del cultivo son los requerimientos térmicos de la vid necesarios para alcanzar los distintos estados fenológicos. Los requerimientos térmicos, permiten prever la posible fecha de un determinado estado de acuerdo con los datos de las temperaturas de la zona. Los requerimientos serán alcanzar unas necesidades de frío para superar el periodo de reposo invernal y posteriormente acumular unas necesidades de calor para alcanzar los diferentes estados del ciclo. Es fundamental satisfacer estas necesidades térmicas para poder completar de forma adecuada el ciclo fenológico completo. Estos requerimientos térmicos serán diferentes para cada variedad. Por lo tanto, tal y como indica Reynier (1995), la temperatura es el factor determinante para cada estado fenológico. Esta temperatura va a influir de diferentes formas a lo largo de todo el ciclo fenológico y dependiendo del estado fenológico en el que se encuentre el cultivo, necesitará unos requerimientos de temperatura distintos. A la hora de explicar los requerimientos térmicos según su estado, dividimos en dos fases el ciclo fenológico: reposo invernal y crecimiento posterior al reposo.

Reposo invernal

El ciclo fenológico de la vid se caracteriza por la necesidad de tener un periodo llamado reposo invernal con unas necesidades de frío relativamente bajas. El reposo invernal se produce desde la caída de hojas hasta la brotación. Este es inducido principalmente por los estímulos medioambientales, el descenso de la temperatura y la disminución del fotoperiodo, provocando así que los procesos metabólicos del interior de la yema se reduzcan gradualmente hasta un mínimo necesario para conseguir que la planta se mantenga viva. Los niveles de humedad en las yemas bajan de un 80 a un 50%. En este periodo se inhibe el crecimiento de la vid y las yemas entran en dormancia, proceso fundamental para que la vid pueda sobrevivir durante el invierno si se dan condiciones desfavorables en la zona como las bajas temperaturas (capaz de soportar hasta -20°C) y las heladas que provocan estas (Lavee y May 1997; Howell 2000). Por lo tanto, también se puede añadir que el cultivo utiliza también esta fase de reposo como un mecanismo de

defensa para sobrevivir en condiciones adversas. Este periodo de reposo invernal es necesario para completar el ciclo vital del cultivo, y la acumulación de frío para satisfacer las necesidades de frío será fundamental para superar la fase de reposo invernal y destruir los inhibidores de crecimiento, por lo que podemos afirmar que el frío durante el invierno es necesario para que el cultivo de la vid complete su ciclo vital. Aunque, estas necesidades de frío tampoco son muy altas en el caso del cultivo de la vid y dependerán de la variedad con la que se esté trabajando. Conforme va aumentando la acumulación de frío, la concentración de inhibidores de crecimiento va descendiendo. Una vez satisfechas estas necesidades o requerimientos de frío, comienza la fase de fin de reposo invernal, periodo en el cual la capacidad de resistencia a condiciones adversas de la vid disminuye poco a poco siendo otra vez susceptible a las bajas temperaturas y heladas y vuelve a reanudar su crecimiento. En la última fase del reposo invernal se han degradado por completo los inhibidores de crecimiento y se reanudan los procesos metabólicos del interior de la yema (su nivel de humedad vuelve a subir el 80%), la cual es manifestada mediante el “lloro”. Este se observa como una exudación en los cortes de la poda. Los lloros corresponden a la entrada en actividad del sistema radicular a consecuencia del aumento de la temperatura en el suelo, dando paso al comienzo del ciclo de crecimiento vegetativo y posterior fase de brotación (Rivera y Devoto 2003). Solamente alcanzará la fase de brotación cuando los inhibidores se hayan degradado por completo y las primeras temperaturas máximas sobrepasen los 20° C. La falta de acumulación de horas frío da lugar a brotaciones reducidas y desuniformes y retraso en la maduración de frutos (Pinto et al. 2003)

Crecimiento posterior al reposo

Una vez satisfecho el periodo de reposo, la vid crece y se desarrolla en función de las temperaturas. Dependiendo del estado en el que se encuentre la vid, las características climáticas y los requerimientos térmicos necesarios serán distintos. A continuación, se muestra una breve descripción de las fases de crecimiento de más interés del crecimiento posterior al reposo y la influencia de la temperatura en cada una de ellas.

Ciclo vegetativo

Está representado por el crecimiento y desarrollo de los órganos vegetativos (raíces, pámpanos, hojas, zarcillos, nietos, chupones), (Reynier 1995). El proceso fotosintético aumenta con la temperatura hasta los 30 °C, temperatura a partir de la cual el valor comienza a decrecer y se detiene a los 38 °C. Las fases más características del crecimiento vegetativo son la brotación y el reposo invernal (explicado anteriormente).

- **Brotación:** Fase del crecimiento vegetativo. Las heladas antes a brotación pueden dañar la yema primaria, con pérdidas de producción (rendimiento y calidad), pero no de crecimiento. Los requisitos de frío varían según la variedad. La T^a base = 10 °C, que es la temperatura media diaria por encima de la cual se produce crecimiento y desarrollo vegetativo. La temperatura óptima para la apertura de yemas de 8 a 12 °C (Antonacci, Ramos, y Dalla 2001; Oliveira 1998; Wilson y Barnett 1983).

Ciclo reproductivo

El ciclo reproductivo ocurre simultáneamente con el ciclo vegetativo y hace referencia a la formación y desarrollo de los órganos reproductores de la vid (inflorescencia, flores, bayas y semillas) y su maduración (Salazar y Melgarejo 2005). Por ser ciclos simultáneos, los órganos vegetativos y reproductores están en continua competencia por la utilización de sustancias nutritivas. Las fases de crecimiento más importantes del ciclo reproductivo son:

- **Floración:** fase del ciclo reproductivo. Iniciación floral, resultante de la acción de factores externos e internos, ligados a la planta. La iniciación floral es el resultado de dos fenómenos distintos (Salazar y Melgarejo 2005): el primero es la inducción floral, que es el fenómeno fisiológico que determina la diferenciación de un meristemo hacia la formación de una inflorescencia, y el segundo es, la iniciación floral, propiamente dicha, que es el fenómeno morfológico de la diferenciación de la inflorescencia y de las flores. La temperatura óptima para floración de 18 a 22 °C. Es necesario que las temperaturas sean estables para que no se paralice el crecimiento de flores (Almanza, 2011).
- **Envero:** Ocurre en la última fase del crecimiento herbáceo de la baya y es el momento en que la uva cambia de color. Durante el proceso de maduración de la uva, los ácidos van cediendo terreno a los azúcares procedentes de la actividad fotosintética ejercida por las hojas (Martinez de Toda y Sancha 1997). Generalmente se produce a principios de agosto. La temperatura óptima desde floración a envero es de 22-26 °C. Se necesitan gradientes de temperatura marcados entre el día y la noche. Las condiciones ideales son temperaturas moderadas, y ambiente seco para evitar la entrada de enfermedades en la uva, pero sin un estrés excesivo. Las variedades de uva blanca son menos exigentes en temperatura que las de uva tinta durante esta fase.
- **Maduración de la baya:** la temperatura óptima es de 20-24 °C. Lo ideal para este periodo es que se de en épocas frescas, con temperaturas nocturnas bajas, pero con calor suficiente para que se dé la acumulación de azúcares y desarrollo de aromas de las bayas (Almanza, 2011). Una maduración lenta bajo estas condiciones desarrolla aromas intensos y produce vinos finos afrutados, a diferencia que, en zonas de periodo de maduración más corto, propios de climas cálidos y soleados, en donde no hay una amplia diferencia en temperaturas, produce uvas azucaradas y menos ácidas (Resco 2015)

La fecha de inicio de vendimia suele ser a finales de septiembre, principios de octubre, aunque en los últimos años (Fernández et al. 2012) se ha observado como se ha adelantado este momento debido al aumento de temperaturas. La temperatura óptima para el periodo de vendimia es de 18 a 22 °C.

1.2.2. Necesidades climáticas

La vid es un cultivo muy plástico, capaz de adaptarse a un amplio rango de situaciones climáticas y por eso se extiende por gran parte del mundo, siempre y cuando se den las condiciones mínimas para que cumpla sus necesidades requeridas. Algunas de sus características climáticas limitantes son: sensibilidad a heladas primaverales durante los primeros estadios de brotación, granizadas primaverales y de verano, altas temperaturas en verano, las lluvias en la época de la vendimia y el calor húmedo durante todo su ciclo vegetativo (Antonio y García 2015).

Dependiendo de la zona en la que esté la vid se puede comportar de diferente forma en cuanto a su desarrollo fenológico. El cultivo de la vid se extiende desde zonas tropicales como Tailandia, con temperaturas medias en el mes más fresco superiores a los 18 °C, hasta zonas de climas fríos como Canadá con temperaturas medias de 10-20 °C (Abando, 2018). El 70,5% de la superficie dedicada a la viticultura está ubicada en las regiones de climas cálidos y templados, el 20,3% a regiones de climas fríos y el 6,3% de regiones ubicados un climas tropicales y subtropicales (Fregoni 2007).

La mayoría de la superficie de plantación de vid mundial se encuentran donde predominan los climas continental y mediterráneo. El clima mediterráneo abarca la región propia del mar Mediterráneo, con veranos calurosos y secos e inviernos fríos y húmedos. El clima continental predomina por Europa central y América del norte. Se trata de un clima con grandes gradientes de temperatura diaria y estacionaria, donde los veranos se caracterizan por ser calurosos durante el día y frescos por la noche. Sin embargo, los inviernos son fríos (Jackson, 2001).

Para caracterizar el clima de la zona y medir la influencia del clima en el desarrollo de la vid (Jimenez 2015), se utilizan índices climáticos. Existen diferentes índices pero los más utilizados para el cultivo de la vid son el índice de Huglin (*Huglin Index*, HI) (Huglin 1983), el índice de Frescor Nocturno (*Cold Niggth Index*, CI) (Tonietto 1999; Tonietto and Carbonneau 2004) y en índice de Sequía (*Dryness Index*, DI) (Riou et al. 1994; Tonietto 1999; Tonietto and Carbonneau 2004). Estos índices se utilizan también para clasificar climas, por ejemplo, Tonietto y Carbonneau desarrollaron la clasificación climática en función de los valores del índice de Huglin que se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de climas a partir del valor del Índice Huglin (IH) propuesta por Tonietto and Carbonneau (2004)

Clase de clima	Sigla	Intervalo de clase
Muy fresco	HI - 3	> 1500
Fresco	HI - 2	> 1500 d>> 1800
Templado	HI - 1	> 1800 d>> 2100
Templado cálido	HI + 1	> 2100 d>> 2400
Cálido	HI + 2	> 2400 d>> 3000
Muy cálido	HI + 3	> 3000

En la Figura 4 se muestra la superficie española clasificada climáticamente en función del índice de Huglin y se superpone en negro las zonas en las que se cultiva vid

(Honorio et al., 2018). En el caso de Navarra se observa cómo hay una gran variación del índice de Huglin con valores desde 1500 hasta los 2400, lo que equivale a climas entre HI -2 “climas frescos” y HI + 2 “climas templado-cálidos”, pero la mayoría de la superficie cultivada de viñedo se encuentra en zonas con climas de tipo HI -1 “templado” y HI + 1 “templado-cálido”.

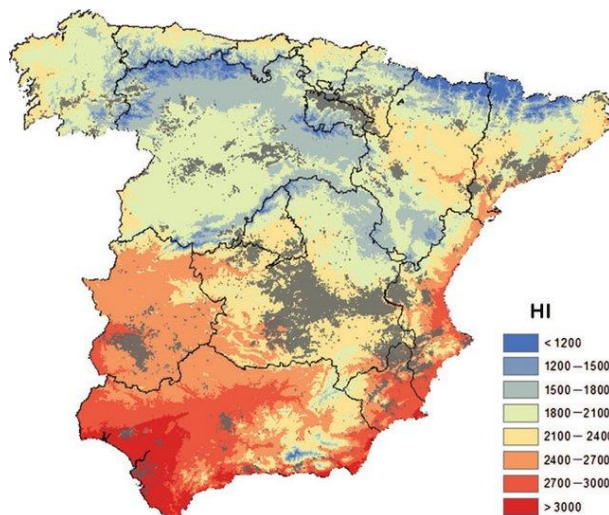


Figura 4. Distribución espacial de la superficie cultivada de viñedo en España en función al IH para el periodo de 1980-2010 (Honorio et al., 2018)

1.3. Modelización de la fenología en vid

Dado que, como se ha indicado anteriormente, la temperatura es el principal factor que permite explicar la evolución fenológica de un cultivo, la mayoría de los modelos que tratan de explicar la evolución fenológica tienen a la temperatura como único o principal parámetro explicativo. Los modelos desarrollados tratan de explicar el momento de superación de las necesidades de frío invernal (satisfacción del reposo), la ocurrencia de los estados fenológicos a partir de brotación (acumulación de calor de forzado), o ambas cosas.

1.3.1. Estimación de la satisfacción del reposo invernal

Lo que se trata en este caso es contabilizar temperaturas capaces de acabar con esos inhibidores de frío. Los tipos de modelos más empleados en vid para estimar la satisfacción de las necesidades de frío son los siguientes:

- **Horas de frío (*Chill hours*):** se trata del método más sencillo de acumulación de frío. Consiste en la contabilización del número de horas en que la temperatura ha estado entre un rango determinado. Uno de los más utilizados es el modelo de Weinberger (1956), que tiene en cuenta las temperaturas entre un rango de 0-7°C. Las horas del día que estén entre este rango de temperatura contabilizan una hora de frío, mientras que horas por encima y por debajo no. Tiene la ventaja que es un

método fácil y sencillo, pero la limitación de que considera que todas las temperaturas dentro del rango son igualmente efectivas.

- **Modelo de Unidades-Frío (UF):** refinamiento del modelo anterior y uno de los más conocidos es el modelo de Utah (Anderson, Richardson, y Kesner 1986). Contempla, a partir de evidencia experimental, que hay temperaturas superiores a 7°C que siguen contribuyendo a la acumulación de frío, por lo que el rango de temperaturas efectivas es mayor. Además, asume también que dependiendo de la temperatura la efectividad de acumulación de frío es distinta y se pondera de forma diferente según los rangos de temperatura en los que se encuentre, tal como se indica en la Tabla 3 (Miranda et al. 2018). Para este modelo es necesario el uso de datos de Tª horaria.

Tabla 3. Unidades de frío acumuladas según la temperatura. Modelo de Unidades de Frío (UF). Fuente: Adaptado de (Miranda et al., 2018)

Temperatura (°C)	C. U.
< 1,5	0
1,6 - 2,5	0,5
2,6 - 9	1
9,1 - 12,5	0,5
12,6 - 16	0
16,1 -18	-0,5
> 18	-1
22 - 23	-2

- **Modelo dinámico (Dynamic model or Chill portions):** este modelo asume que la acumulación de frío se lleva a cabo en dos fases. Al igual que el modelo de Utah, asume que hay un rango de temperaturas óptimas para la acumulación de frío y por otro lado que temperaturas muy elevadas o muy bajas tienen un peso negativo a la hora de acumular unidades de frío. Pero en este caso, una vez que se acumule cierta cantidad de frío se asume que se ha acumulado una porción de frío, a la cual no le afectan las temperaturas próximas ya que se empieza a contar desde 0 (Erez et al. 1990). Este método también es conocido como el método de porciones de frío (CP).

1.3.2. Estimación de la acumulación de calor de forzado

Los modelos siguientes calculan la acumulación de calor del cultivo en un momento dado en base a la temperatura exterior. La unidad con la que se contabiliza la acumulación de calor son los llamados “*Growing degrees (GD)*” definido como la suma de grados superiores a una cierta temperatura llamada temperatura base (T_b). Estos GD se pueden contabilizar de dos formas dependiendo de si se utiliza temperatura horaria o diaria: acumulación de grados diaria (GDD) y acumulación de grados horaria (GDH). A continuación, se explica de forma más detallada:

A. **GDD (*Growing degree days*):** se calcula restando la T_b a la T^a media diaria para cada día. Si la T^a media diaria es inferior a la T_b , entonces decimos que la acumulación de grados para ese día es 0 (GDD = 0).

B. **GDH (*Growing degree hours*):** se calcula restando la T_b a la T^a media horaria (Figura 5). Si la T^a media horaria es inferior a la T_b , entonces decimos que la acumulación de grados para esa hora es 0 (GDH = 0). A día de hoy existen dos formas de contabilizar GDH:

- **GDH lineal:** este modelo asume que temperaturas inferiores a la T_b se contabiliza como GHD = 0, pero a partir de ahí cuanto mayor sea la temperatura más GDH se acumulan, siendo un incremento constante de GDH acumulados en base al incremento de la temperatura (Figura 6).
- **Modelo Asymcur** (Anderson et al. 1986): En este modelo, a diferencia del modelo anterior, se asume que a diferentes temperaturas varía la efectividad de la acumulación de calor (GDH), tal como se muestra en la Figura 6. Los parámetros necesarios para este modelo son:
 - **T^a base:** temperatura por encima de la cual se produce crecimiento y desarrollo de la vid y será diferente entre especies y variedades.
 - **T^a óptima:** temperatura ideal a la que el crecimiento y desarrollo de la vid va a su máxima velocidad.
 - **T^a crítica:** temperatura a partir de la cual se detiene el crecimiento.

Esta acumulación se pondera de forma diferente según los rangos de temperatura en los que se encuentre. Para ello, Anderson estableció las dos ecuaciones con las que se consigue calcular los GDH acumulados según la temperatura. Una ecuación para temperaturas menores a la T^a óptima y otra para temperaturas mayores que la T^a óptima.

- Expresión para T^a entre la T_b y la T^a óptima:

$$\text{Asymcur GDH} = \frac{T_{opt} - T_b}{2} * \left(1 + \cos \left(\pi + \pi * \frac{T_h - T_b}{T_{opt} - T_b} \right) \right)$$

- Expresión para T^a entre la T^a óptima y la T^a crítica:

$$\text{Asymcur GDH} = T_{opt} - T_b * \left(1 + \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} * \frac{T_h - T_{opt}}{T_c - T_{opt}} \right) \right)$$

Siendo los parámetros de estas ecuaciones: T_b : Temperatura base, T_{opt} : Temperatura óptima, T_c : Temperatura crítica y T_h : Temperatura horaria real.

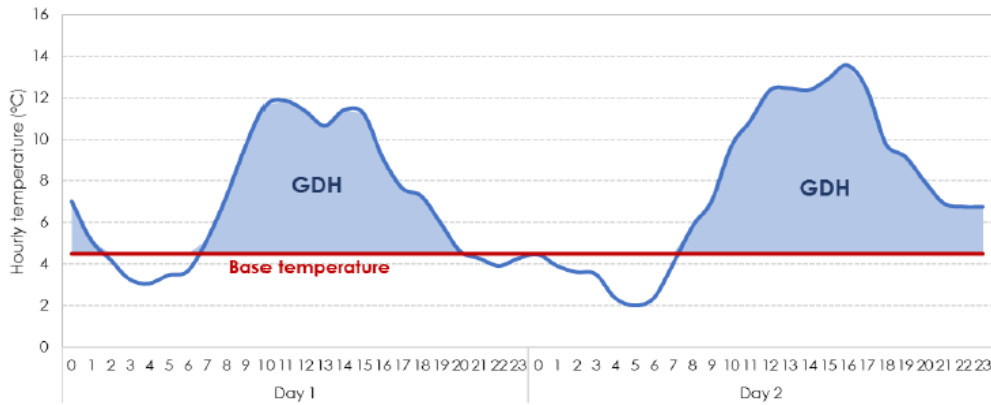


Figura 5. Ejemplo de acumulación de GDH durante dos días con una T_b de $4,5^{\circ}\text{C}$ (Miranda et al., 2018)

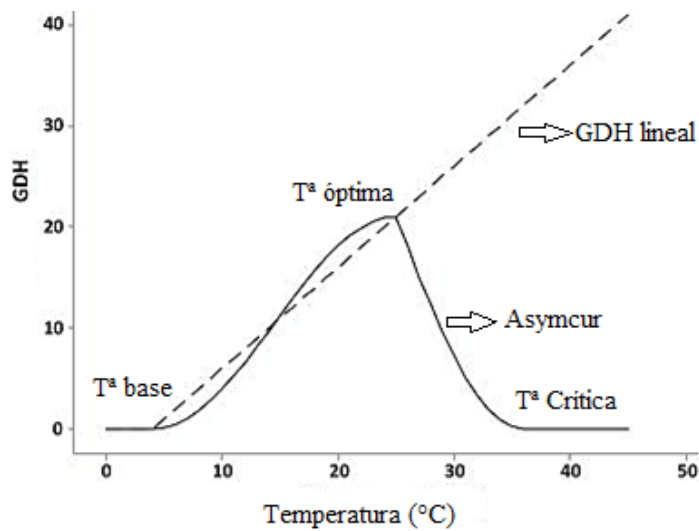


Figura 6. Gráfica genérica de los tipos de modelos de acumulación GDH en la que se muestra la diferencia de contabilización de GDH entre ambas (Zhang and Taylor 2015)

Como se muestra en la Figura 6, a diferencia del modelo lineal, en el que hay un constante incremento de GDH sin ninguna limitación, el modelo Asymcur, tiene en cuenta que esto es muy simplista, e integra los parámetros de T_b , T_{opt} y T_c para contabilizar GDH de una forma más ajustada a la biología de las plantas.

1.3.3. Modelos fenológicos en vid

Un modelo fenológico es una herramienta para predecir la fenología de un cultivo en diferentes condiciones climáticas, que asume que la temperatura es el principal factor que influye en las respuestas y el desarrollo de la planta. Además, estos tienen mucho interés a la hora de estimar las fechas de estados críticos para poder evitar situaciones de riesgo durante estos periodos y ayudar a los viticultores para que puedan realizar sus técnicas de cultivo de una manera más adecuada en cada momento.

Actualmente existen diferentes tipos de modelos fenológicos para frutales capaces de comparar cómo afecta el clima a la fenología del cultivo en cada caso. Estos modelos combinan métodos de estimar necesidades de frío y necesidades de calor de formas distintas para estimar la fecha de un estado fenológico concreto. La diferencia más significativa entre ellos es cómo satisfacen las necesidades de frío. En unos casos se contabiliza frío tratando de acercarse al momento en el que se satisfacen los requerimientos de frío necesarios para superar el periodo de reposo invernal, y en otros casos, se concreta siempre un determinado momento a partir del cual, al ser bajas las necesidades de la vid, se da por hecho que las necesidades de frío están más que satisfechas (García de Cortázar, Brisson, y Gaudillere 2009; Miranda et al. 2018; Parker et al. 2013).

Los modelos más utilizados en frutales son (Figura 7):

- **Modelo de Tiempo Termal (*Thermal time*):** en este modelo se considera que, al ser bajas las necesidades de frío de la vid, los requerimientos de frío están más que satisfechos para una fecha determinada fija (t_0) y considera que únicamente la suma de acumulación de calor a partir de esa fecha explica la aparición del estadio fenológico en ese momento. La acumulación de grados acumulados se calcula generalmente mediante GDD.
- **Modelo Secuencial (*Sequential*):** a diferencia del modelo anterior, no hay una fecha fija a partir de la cual se comienza a contabilizar calor, sino que, este modelo se considera la acumulación de frío y la acumulación de calor tienen efectos independientes y consiste en estimar cuándo se satisfacen los requerimientos de frío necesarios para superar el periodo de reposo invernal y a partir de ahí se empieza a acumular y contabilizar calor (Miranda et al. 2018). Esta fecha se llamará fecha de inicio (t_0), y puede variar dependiendo de las condiciones de clima.
- **Modelo de Solape (*Chill overlap*):** tiene una metodología similar a la del modelo secuencial, pero supone que existe un rango en el que hay una relación parcialmente compensatoria entre la acumulación del frío y la acumulación de calor de forzado, en el que se puede compensar la cantidad de calor necesaria con más acumulación de frío y viceversa (Miranda et al. 2018).



Figura 7. Enfoque conceptual de los modelos fenológicos más empleados en fruticultura (Miranda et al., 2018)

En el caso de la vid, la mayoría de los modelos fenológicos que se utilizan son de tipo Tiempo Termal. Esto es debido a que generalmente la mayoría de los modelos se han parametrizado en zonas con climas frescos, donde la acumulación de frío no es un problema gracias a las características climáticas y las bajas necesidades de la especie, y se puede asumir sin problema que a partir del momento en el que se empieza a contabilizar la acumulación de calor los requerimientos de frío están más que satisfechos.

Las diferencias que hay entre los modelos de este tipo son el momento a partir del cual se empieza a acumular calor (t_0) y la temperatura base (T_b). Los modelos de Tiempo Termal utilizados más comúnmente para el cultivo de la vid son:

- **GFV (*Grapevine Flowering Veraison*):** (Parker et al., 2013) se trata del modelo más completo y con más referencias disponible para el cultivo de la vid actualmente. Este modelo ha sido ajustado para unas 100 variedades de vid, con una serie de datos de unos 55 años, en más de 100 sitios, principalmente en las regiones vitícolas más importantes de centro Europa (Francia, norte de Italia, Suiza) y en algunas variedades también para Grecia. El modelo asume que a partir del 1 de marzo (día 60) se empieza a sumar calor (GDD) utilizando una T_b de 0°C . Este modelo funciona con bastante precisión sobre todo para las regiones de clima frescos y templado-frescos en un gran número de variedades de *Vitis vinifera L.*
- **Modelo de GDD:** se trata del modelo clásico. Existen diferentes variantes, pero en general las referencias disponibles en bibliografía han sido ajustadas para las variedades más comunes empleadas en las principales zonas vitícolas de Francia. En este caso se asume que para el 1 de enero se han satisfecho los requerimientos de frío y comienza a sumar los grados acumulados (GDD) (García de Cortázar et al. 2009; Van Leeuwen 2008), usando T_b generalmente de entre 7°C y 10°C .

Como se ha indicado, generalmente los modelos existentes hasta el momento se han parametrizado zonas con climas fundamentalmente frescos. Por ejemplo el modelo GFV, la mayoría de los datos con los que se ha parametrizado los requerimientos de las variedades son zonas de clima como mínimo frescos (países de centro Europa), que corresponden a climas según Tonietto y Carbonneau (2004) entre HI - 3 y HI - 1, de forma que los climas cálidos y templado-cálidos se encuentran infrarrepresentados en las bases de datos de ajuste. De hecho, en estudios sobre el efecto del cambio climático y sobre el comportamiento fenológico de la vid en climas más cálidos se ha encontrado que los modelos no funcionan adecuadamente (Cuccia et al. 2014; Miranda et al. 2018), y se

sugiere la conveniencia de parametrizar los modelos fenológicos incluyendo datos de regiones más cálidas.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es ajustar modelos fenológicos en vid para los estados brotación, floración y envero, que estén adaptados a las condiciones climáticas de Navarra, comparando su eficiencia con la del modelo fenológico más extendido en la actualidad (GFV).

3. Material y métodos

3.1. Material

3.1.1. Datos fenológicos

En este estudio se ha empleado una base de datos, proporcionados por Evena, que abarca un rango de datos de entre 1985-2018. Los datos corresponden a los estados fenológicos de brotación, floración y envero de las variedades Tempranillo, Graciano, Garnacha, Chardonnay y Merlot localizadas en diferentes parcelas en Olite, Sada y Mendavia. Todas ellas contaban con una formación en espaldera. En la Tabla 4 se detalla el número de observaciones de que se dispone para cada variedad y sitio.

Tabla 4. Resumen de datos fenológicos empleados en el estudio

Localidad y parcela		Periodo observado	<u>nº de observaciones/variedad</u>				
			TE ¹	GA	GR	CH	ME
Olite	Estremal	1996-2018	18	18	18	18	18
	Chiviri	1986-1989	4	4	-	-	-
	Jeringa	1985-1992	8	8	-	-	-
Sada		1986-1989	4	4	-	-	-
Mendavia		1986-1989	4	4	-	-	-
Total de observaciones			38	38	18	18	18

¹ TE: Tempranillo, GA: Garnacha, GR: Graciano, CH: Chardonnay y ME: Merlot

Las observaciones se corresponden al estado mayoritario observado en 4-5 cepas representativas de la parcela. Se han empleado las variedades Tempranillo, Garnacha, Graciano, Chardonnay y Merlot, además de su importancia en Navarra, por ser de las que se disponía de datos más completos. Además, de las variedades empleadas existe variabilidad en sus ciclos, disponiendo de variedades precoces como Chardonnay (menos de 145 días), medias como Tempranillo y Merlot (156-170 días), y finalmente tardías como Garnacha y Graciano (171-185 días) (Guisado 2016).

3.1.2. Datos climáticos

En el caso de los datos meteorológicos, se obtuvieron a través de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas del Gobierno de Navarra (Tabla 5). Para cada campaña con observaciones fenológicas disponibles, se tomaron los datos de temperatura de las estaciones correspondientes para el periodo 1 de noviembre del año anterior al 31 de diciembre del año con las observaciones.

Tabla 5. Serie de datos climáticos disponibles para el empleo de los modelos fenológicos

Ubicación parcela	Estación
Olite	Olite MAN (1984-2002)
	Olite INTIA (2002-2018)
Sada	Aibar MAN (1985-1989)
Mendavia	Viana (1985-1989)

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterización del clima

Para la caracterización del verano se utilizó el índice de Huglin, el cual permite evaluar las posibilidades heliotérmicas de un medio vitícola, al considerar la integral térmica y el fotoperiodo, ambos influenciados por la latitud (Guerrico et al. 2016). Se calcula para todos los años para un periodo de seis meses comprendido entre el 1 de abril y el 31 de octubre. El índice se calculó mediante la siguiente expresión:

$$IH = \sum_{\text{Abril}}^{30\text{Oct}} [(T_a - 10^\circ) + (T_m - 10^\circ)] \cdot K/2$$

Donde: T_a: temperatura media diaria

T_m: temperatura máxima diaria

K: Coeficiente de longitud de días, que varía de 1,02 a 1,06 entre 40 y 50 grados de latitud. En este caso como los viñedos se encuentran entre las latitudes (Olite 42.3875°, Aibar 42.6422° y Viana 42.494°) se usó K=1,03.

Además, cada campaña fue clasificada por su valor de índice de Huglin empleado la clasificación de Tonietto y Carbonneau (2004), que se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de climas a partir del valor del Índice Huglin (IH) propuesta por Tonietto and Carbonneau (2004)

Clase de clima	Sigla	Intervalo de clase
Muy fresco	HI - 3	> 1500
Fresco	HI - 2	> 1500 d >> 1800
Templado	HI - 1	> 1800 d >> 2100
Templado cálido	HI + 1	> 2100 d >> 2400
Cálido	HI + 2	> 2400 d >> 3000
Muy cálido	HI + 3	> 3000

3.2.2. Modelos fenológicos evaluados

A/ GFV (*Grapevine Flowering Veraison*)

Este modelo se ha utilizado como referencia. Se han calculado para cada uno de los años de la serie, localidades y datos para calcular las fechas de floración y envero en base a los requerimientos de calor (F_{req}), para las variedades de las que se disponen datos (todas menos Graciano). Se empezó a contabilizar calor a partir del día 60 del año (1 de marzo), se utiliza una temperatura base de 0 °C, sin limitación por una temperatura óptima ($t_0 = 60$, $T_b = 0$ °C). En la Tabla 6 se muestran los requerimientos de calor de las variedades según el modelo GVF (Parker et al., 2013).

Tabla 7. Requerimientos de calor (GDD) desde el día 60 necesarios para que cada variedad alcance la floración (I) y el envero (M) según el modelo GFV (Parker et al., 2013)

	I	M
TE ¹	1188	2484
GA	1277	2761
CH	1217	2547
ME	1269	2636

¹ TE: Tempranillo, GA: Garnacha, GR: Graciano, CH: Chardonnay y ME: Merlot

B/ GFV Ajustado (*GFV_Ajus*)

Para todas las variedades, se han parametrizado el calor (F_{req}) necesario para alcanzar brotación, floración y envero siguiendo la metodología del modelo GFV propuesto por Parker et al. (2013), utilizando los mismos parámetros de $t_0 = 60$ y $T_b = 0$ °C y sin limitación por T_{opt} .

C/ Modelo secuencial (*SEQ*)

Se utilizó un modelo secuencial en el cual el calor para alcanzar el estado fenológico considerado comienza a contarse a partir de la fecha de satisfacción de frío invernal. Las necesidades de frío se contabilizaron a partir del método dinámico (porciones) y la acumulación de calor se contabilizó en GDH mediante el método Asymcur.

- **Porciones de frío (*Chill portions*):** para este modelo se siguió la metodología del modelo porciones de frío (CP) en el que se ha evaluado un rango de requerimientos de frío de entre 20-70 porciones en intervalos de 5 porciones, empezando a calcular el frío a partir del día 305 (1 de noviembre) del año previo.
- **Modelo Asymcur (Anderson, 1986):** para este modelo se siguió la metodología del modelo propuesto por Anderson, pero ajustando las temperaturas base y óptima. Se evaluaron temperaturas base entre 0°C y 10°C (en incrementos de 1°C)

y temperaturas óptimas entre 20°C y 25°C, también en incrementos de 1°C. La temperatura crítica en todos los casos se consideró de 36°C.

Las expresiones utilizadas para calcular la integral térmica en GDH (*Growing degree hours*) con cada combinación posible de las T_b y T_{opt} consideradas fueron las siguientes:

- Expresión para T^a entre la T_b y la T_{opt} :

$$Asymcur\ GDH = \frac{T_{opt} - T_b}{2} * \left(1 + \cos \left(\pi + \pi * \frac{T_h - T_b}{T_{opt} - T_b} \right) \right)$$

- Expresión para T^a entre la T_{opt} y la T_c :

$$Asymcur\ GDH = T_{opt} - T_b * \left(1 + \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} * \frac{T_h - T_{opt}}{T_c - T_{opt}} \right) \right)$$

Siendo los parámetros de estas ecuaciones: T_b : Temperatura base, T_{opt} : temperatura óptima, T_c : temperatura crítica y T_h : temperatura horaria real

Utilizando los propios datos de las fechas reales de brotación, floración y envero se realizaron combinaciones de porciones de frío y temperaturas para estimar de la forma más precisa posible la combinación ideal requerimientos de frío (porciones de frío) y requerimientos de calor (F_{req}) para cada estado, variedad y lugar.

3.2.3. Validación de los modelos obtenidos

Los modelos obtenidos se han validado a partir de la comparación de las fechas reales de ocurrencia con la estimada a partir de los tres métodos (GFV, GFV_Ajus y SEQ), por medio de los siguientes estadísticos:

- **RMSE (*Root mean squared error*)**: se trata del error medio cuadrático de estimación, que da una media de las diferencias entre los valores obtenidos y los reales. Sirve para comparar los modelos y será mejor aquel que muestre el error más bajo. Este estadístico se calcula mediante la expresión (Parker et al., 2011):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}$$

- **EF (*Efficiency*)**: se trata del estadístico que calcula la eficiencia. Esta es adimensional y varía del 0-1. El mejor modelo será el que muestre una mayor eficiencia, cuanto más cerca del 1 mejor. Este estadístico se calcula

mediante la expresión: (Greenwood et al., 1985; Nash y Sutcliffe 1970; Parker et al. 2011)

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right)$$

Siendo los parámetros para estas ecuaciones: O_i : valor observado, S_i : el valor simulado, \bar{O} : valor medio observado y n : número de observaciones.

El cálculo, ajuste y validación de los modelos indicados se ha realizado a partir de “Excel”, “R”, “R Studio” con los paquetes de “*data.table*” (Dowle et Al., 2019), “*tidyverse*” (Wickham, 2017), “*chillR*” (Cordano and Eccel, 2016) y “*PhenoFitter*” (Miranda, 2019).

4. Resultados y discusión

4.1. Caracterización climática

En la Figura 9 se muestra la evolución del clima, caracterizado por el índice de Huglin, para las tres localidades en las que se obtuvieron los datos fenológicos. En Olite, en estos 35 últimos años, se observan fuertes variaciones de los valores del índice muy notables entre años (oscila entre 2000 y 2700) y se aprecia un cierto incremento a lo largo del tiempo. Si se clasifican los años por su IH según la clasificación propuesta por Tonietto and Carbonneau (2004) en 20 de los años el clima podía caracterizarse como de tipo HI + 2 o “cálido”, mientras que en 13 años el clima era de tipo HI + 1 o “templado cálido”. Tan sólo dos años el clima pudo clasificarse como de tipo HI - 1 o “templado”. Usando esta clasificación, se comprobó que entre 1984-1995 se encuentran la mayoría de los años con un clima de tipo HI + 1, mientras que a partir de entonces la mayoría de los años el clima pudo clasificarse como de tipo HI + 2, especialmente en años como 1995, 2003, 2006, 2009, 2017 y 2018, en los que los valores de IH estuvieron en torno a 2700 del índice de Huglin. En Viana y Aibar, durante los años analizados (1985-1989) se mostraron más cálidos que Olite, ya que en esta época predominaron las situaciones de tipo HI + 2 o “cálido”.

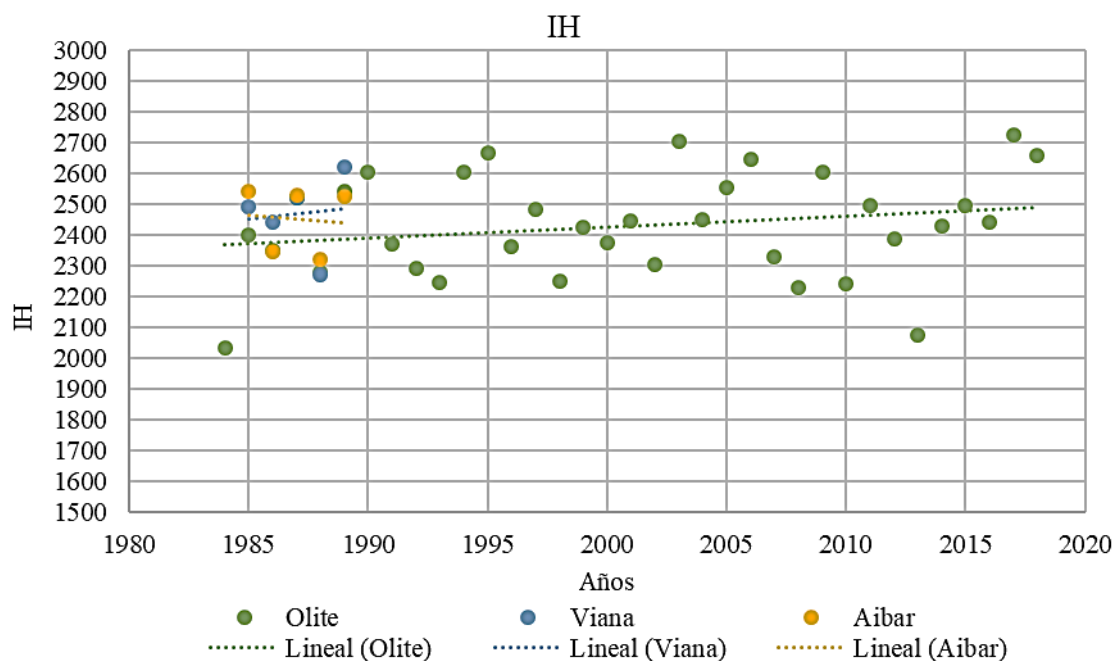


Figura 8. Evolución del Índice de Huglin en las localidades estudiadas para el periodo 1984-2018

4.2. Fechas de ocurrencia de los estados

A. Brotación

En las Figura 9 se observa la evolución de las fechas del estado brotación para cada variedad durante el periodo de años estudiado. En general se observan fluctuaciones muy notables. Entre los años más precoces y los más tardíos la diferencia puede ser de 30 días. En algunas variedades se ve una tendencia a que este estado se adelante hasta 20 días como en el caso de Tempranillo y Garnacha, donde el cambio se ha dado sobre todo a partir de 1995, mientras que al no tener datos de los 80 en Chardonnay, Graciano y Merlot no podemos observar si existe esa misma tendencia.

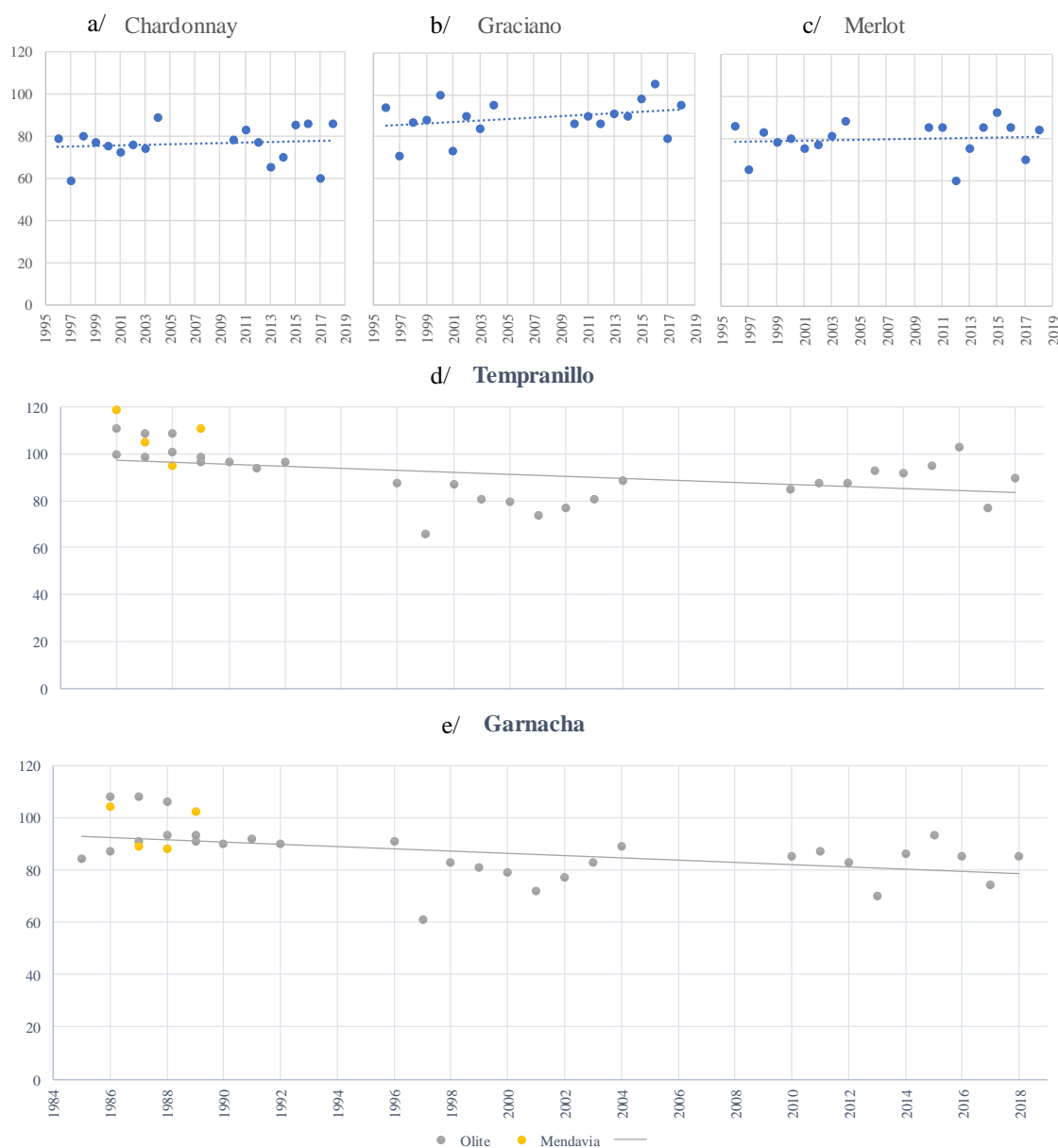


Figura 9. Evolución de las fechas de brotación de a/Chardonnay, b/ Graciano, c/Merlot, d/Tempranillo y e/ Garnacha en Olite durante el periodo de años comprendido entre 1985-2018. En el eje Y se representa el día del estado fenológico brotación y en el eje X la serie de años.

A partir de ahí se observan variaciones similares dependiendo de la variedad. En Graciano, por ejemplo, se observa una tendencia a que el estado se atrase una semana. En el resto de las variedades no se observa ninguna tendencia y se mantienen valores estables en torno al 80 para Chardonnay, Merlot y Garnacha y en torno al 90 para el caso de Tempranillo. Puede que parte de esta variabilidad entre años se deba a que, a diferencia de estados más avanzados, la observación y determinación del estado B en campo es más complicada.

B. Floración

En la Figura 10 se observa la evolución de las fechas del estado floración para cada variedad durante el periodo de años estudiado. En general se observan fluctuaciones muy marcadas, según el año desde las fechas más precoces a las fechas más tardías puede haber hasta 30-40 días de diferencia dependiendo de la variedad.

En las variedades Tempranillo y Garnacha se observa que desde los años 80 hasta ahora la fecha se ha adelantado de media unos 15 días. También se puede destacar como existe un periodo de años entre 1985-1992 en el que los puntos de ambas variedades se encuentran solapados y reducidos a un rango de amplitud reducido (158-163) y a partir de ahí, las fluctuaciones de días de ambas variedades están muy marcadas. Al igual que en brotación, el cambio de avance de fecha se ha dado sobre todo a partir de 1995. Ligado al IH puede tener sentido ya que, como se ha dicho anteriormente, a partir de 1995 se ha dado un incremento en el IH en esta zona y la clasificación ha pasado de ser de HI + 1 a IH + 2, por lo que parte de este cambio pueda que se corresponda al incremento de la temperatura a consecuencia del actual cambio climático. Además, los años con mayor valor del IH como 1997, 2003, 2011, y 2017 se corresponden con los años más precoces, en los que, debido al incremento de la temperatura, las temperaturas ideales para el estado de floración se dan antes.

En el resto de las variedades, no se observa una evolución clara, la fecha de floración se mantiene en torno al día 150-155 dependiendo de la variedad.

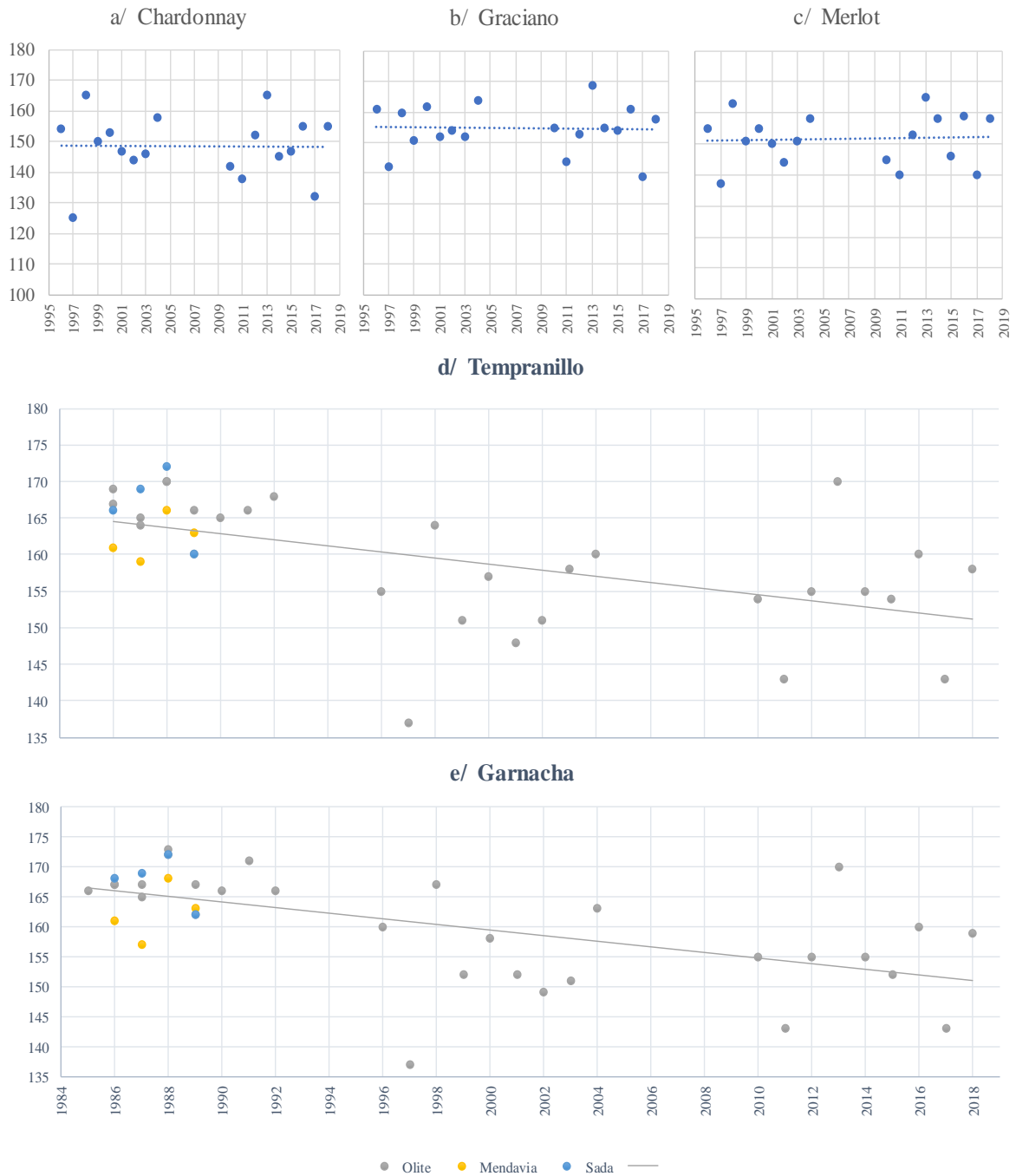


Figura 10. Evolución de las fechas de floración de a/Chardonnay, b/ Graciano, c/Merlot, d/Tempranillo y e/ Garnacha en Olite durante el periodo de años comprendido entre 1985-2018. En el eje Y se representa el día del estado fenológico floración y en el eje X la serie de años.

C. Enero

Por último, en la Figura 11 se observa la evolución de las fechas del estado enero para cada variedad durante el periodo de años estudiado. En el caso del estado de enero es donde mayores cambios se han dado en casi todas las variedades. En la Figura 11 se puede ver una tendencia clara a que la fechas se adelanten hasta 4 semanas, excepto en

Merlot. Además, los años en los que el valor del IH ha sido más elevado de lo habitual (2003, 2011 y 2017) la fecha de envero es aún más avanzada en todas las variedades.

Esta tendencia a que el momento de envero se adelante puede tener sentido si lo comparamos con el IH, donde en los últimos años se está dando un incremento del valor del IH en esta zona, por lo que los requerimientos de calor se satisfacen antes dando lugar a ciclos más cortos y fechas avanzadas de envero. Además, se observa también que al igual que los años con mayores IH sean más precoces, también se observa que en los años con menor IH las fechas de envero se han retrasado respecto a las demás.

En conjunto, se ha comprobado que existe una tendencia a que los años con mayores IH sean más precoces.



Figura 11. Evolución de las fechas de envero de a/Chardonnay, b/ Graciano, c/Merlot, d/Tempranillo y e/ Garnacha en Olite durante el periodo de años comprendido entre 1985-2018. En el eje Y se representa el día del estado fenológico envero y en el eje X la serie de años.

4.3. Modelización de la fenología

4.3.1. Ajuste de los parámetros

Para encontrar cual era la mejor combinación de frío invernal y temperaturas con las que ajustar GDH para el modelo secuencial, se hicieron representaciones gráficas de los estadísticos EF y RMSE para todas las variedades y estados con respecto a T_b , T_{opt} y C_{req} . Ejemplos de la evolución de la eficiencia y el RMSE de los modelos obtenidos en función del valor de los parámetros se muestran en las Figuras 12 a 17, para la variedad Chardonnay en estado B, ya que en el resto de las variedades y estados la evolución descrita fue similar.

En la Figura 12 se observa como conforme la T_b aumenta disminuye la EF llegando a alcanzar valores negativos. La EF tiende a ser máxima para las temperaturas base más bajas (generalmente $T_b= 0^{\circ}\text{C}$).

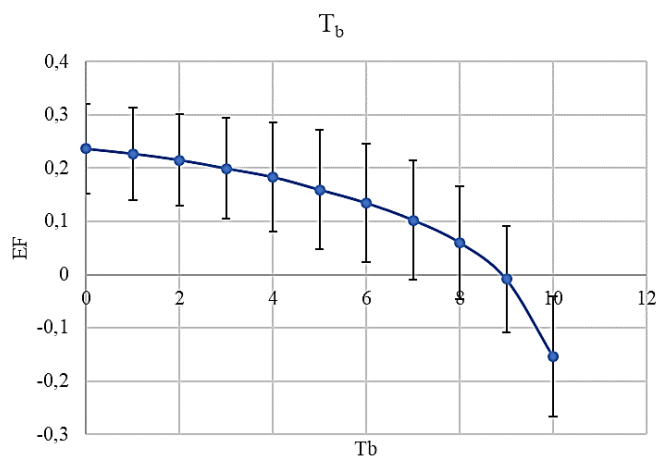


Figura 12. Eficiencia del modelo SEQ en función de T_b para el estado brotación (B) de la variedad CH

En el caso de la T_{opt} , en la Figura 13 se observa que la influencia de variar la temperatura óptima en el modelo es menos pronunciada, aunque también en general era más baja conforme se consideraba T_b más altas.

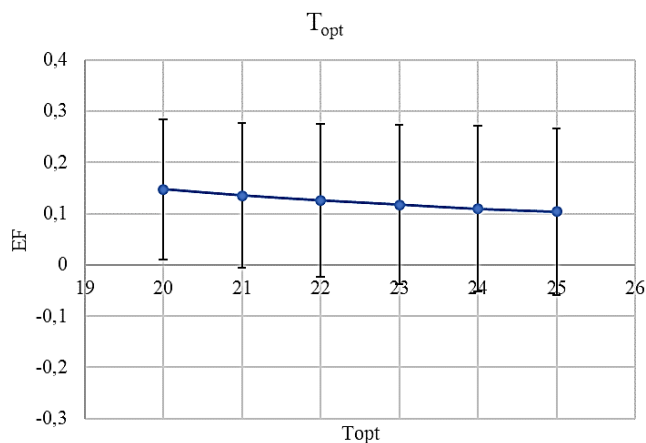


Figura 13. Eficiencia del modelo SEQ en función de T_{opt} para el estado brotación (B) de la variedad CH

Para finalizar, en la Figura 14 se observa que, en el caso de los requerimientos de frío, hay una gran variabilidad de la EF. A diferencia del resto de casos, esta figura se puede dividir en tres fases. En primer lugar, se ve como la EF aumentaba conforme aumenta también C_{req} , alcanzando un pico de EF con una acumulación de $C_{req}=35$. A partir de ahí conforme aumentaba C_{req} la EF disminuía generalmente hasta $C_{req}=55$. Finalmente, a partir de ahí la EF vuelve a aumentar conforme aumentaba C_{req} hasta alcanzar otro pico máximo generalmente a la mayor cantidad de frío evaluada (70 porciones).

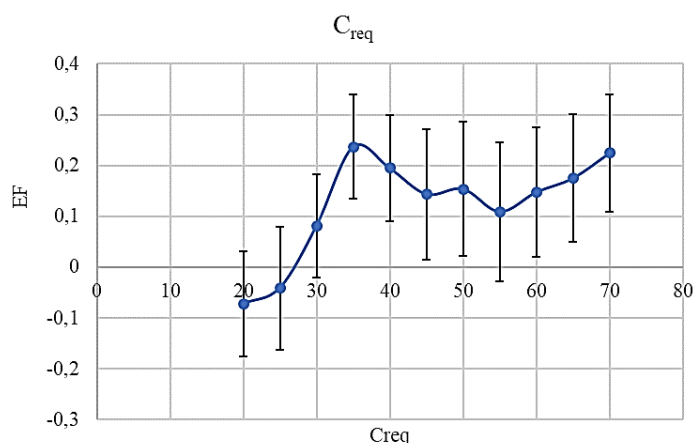


Figura 14. Eficiencia del modelo SEQ en función de C_{req} para el estado brotación (B) de la variedad CH

Se realizó el mismo análisis, pero en este caso comparando los parámetros T_b , T_{opt} y C_{req} en función del estadístico RMSE. En primer lugar, en la Figura 15 observamos que hay una tendencia de aumento del RMSE conforme T_b aumenta, alcanzando su máximo para $T_b=10$ °C de forma que, al igual que para la EF, los mejores valores se obtenían para T_b bajas.

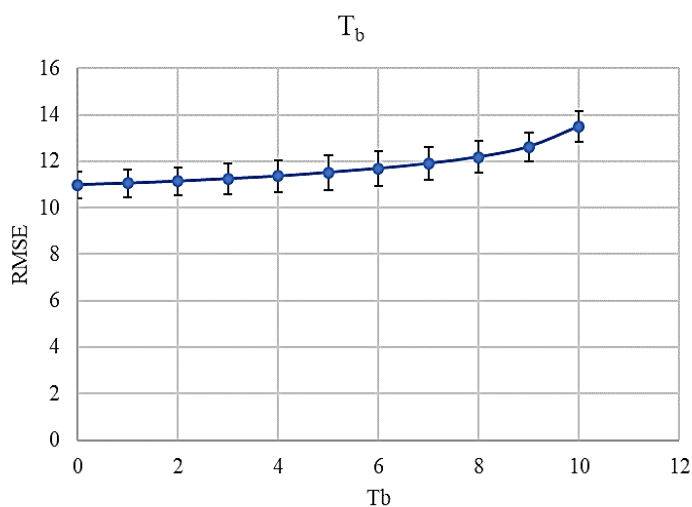


Figura 15. Error RMSE del modelo SEQ en función de T_b para el estado brotación (B) de la variedad CH

En el caso de la T_{opt} , los valores de RMSE son bastantes estables frente a la variación de la T_{opt} considerada tal y como se observa en la Figura 16. La tendencia es similar a la encontrada para la EF, los menores errores solían encontrarse a las temperaturas más bajas.

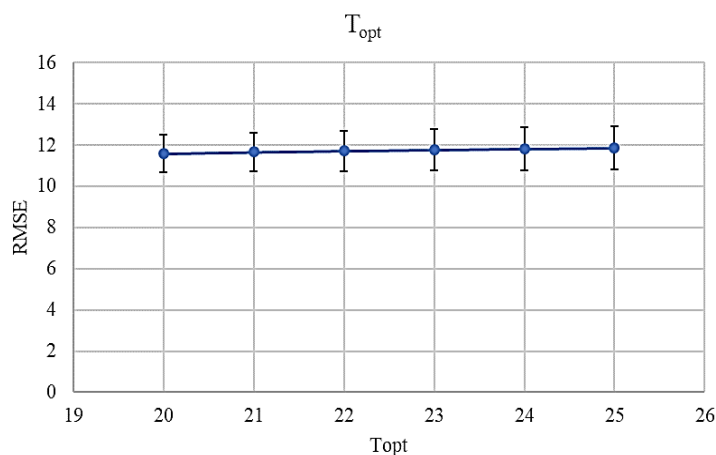


Figura 16. Error RMSE del modelo SEQ en función de T_{opt} para el estado brotación (B) de la variedad CH

Para finalizar, en el caso de la C_{req} a diferencia de la T_{opt} se observa una variación que muestra un perfil inverso al de la EF. Su máximo se encuentra con una acumulación de frío mínima ($C_{req}=20$) disminuyendo conforme C_{req} aumenta. Existe un rango de porciones entre 35-60 en el que el error vuelve a aumentar, pero este sólo se incrementará en 0,5 días y después disminuirá alcanzando su mínimo en $C_{req}=70$.

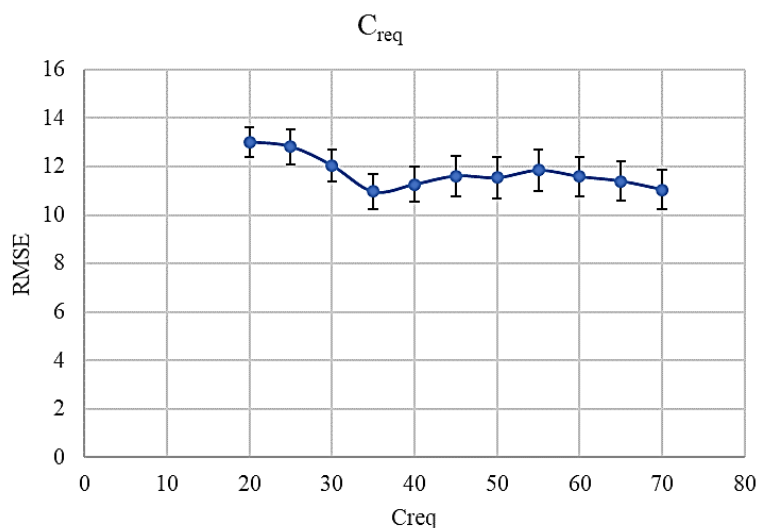


Figura 17. Error RMSE del modelo SEQ en función de C_{req} para el estado brotación (B) de la variedad CH

4.3.2. Modelos ajustados

En este apartado se muestran los resultados de las validaciones, estado por estado, indicando los parámetros ajustados finales, así como los valores de error y eficiencia. En las Tablas T_b : temperatura base, T_{opt} : temperatura óptima, C_{req} : porciones de frío requeridas, D_{req} : momento en el que se superan las necesidades de frío, F_{req} : acumulación de calor calculada (GDD o GDH dependiendo del modelo), RMSE: error medio cuadrático de estimación y EF: eficiencia del modelo.

a) Brotación

A la hora de modelizar la fase de brotación (B) tenemos resultados de datos calculados según el modelo GFV ajustado (GFV_Ajus) y secuencial (SEQ), ya que el modelo GFV no estima la fecha de brotación. Los resultados se muestran en la Tabla 8. En general se observa que, para todas las variedades, al ajustar la T_b del modelo SEQ se obtiene que la mejor era 0°C igual que en el modelo GFV Ajustado, en la que la T_b era un parámetro fijo. La T_{opt} variaba según variedades entre los $20\text{-}24^\circ\text{C}$. Para todas las variedades los requerimientos de frío (C_{req}) ajustados en el modelo SEQ fueron el máximo evaluado, 70 porciones de frío. Esta cantidad de frío de media se acumulaba hacia el día 37-38 del año, es decir, tres semanas antes de lo que considera el método GFV. Cuccia et al., (2014) observaron que probablemente en climas cálidos emplear como momento de la satisfacción de los requerimientos de frío ($t_0=60$) fuese demasiado tarde. Al ajustar ambos modelos observamos que la fecha t_0 se adelanta aun teniendo la misma T_b en ambos modelos, lo que parece concordar con las observaciones de Cuccia et al (2014).

Respecto a la EF en general son bastante bajas, no suelen pasar el 0,3 en la mayoría de los casos. En este estado se ve que las peores EF han sido en las variedades Garnacha, Tempranillo y Chardonnay con una EF inferior del 0,27 para ambos modelos con un RMSE de unos 10 días, mientras que en Graciano, Chardonnay y Merlot las EF son algo mejores y se da un RMSE de 6-7 días. Que las eficiencias hayan sido bajas puede explicarse al menos en parte porque el estado fenológico de brotación es difícil de evaluar en campo comparado con otros estados más avanzados.

En general para modelizar el estado B se observa que funciona mejor (o en el peor de los casos igual) el modelo GFV Ajus frente al modelo SEQ.

Tabla 8. Parámetros ajustados y validación de los modelos los modelos secuencial y GFV ajustado, para el estado brotación

Variedad Model		T_b	T_{opt}	C_{req}	D_{req}	F_{req}	RMSE	EF
TE	GFV_Ajus	0	-	-	60	334	10,8	0,197
TE	SEQ	0	21	70	38	10444	10,2	0,273
GA	GFV_Ajus	0	-	-	60	284	9,8	0,094
GA	SEQ	0	20	70	38	9227	10,9	-0,123
CH	GFV_Ajus	0	-	-	60	154	7,2	0,259
CH	SEQ	0	20	70	37	5890	11,5	0,265
GR	GFV_Ajus	0	-	-	60	293	6,3	0,442
GR	SEQ	0	24	70	37	9010	7,0	0,314
ME	GFV_Ajus	0	-	-	60	194	7,0	0,246
ME	SEQ	0	20	70	38	7387	8,1	-0,016

b) Floración

A la hora de modelizar el estado de floración se cuenta con resultados para los modelos GFV, GFV Ajustado (GFV_Ajus) y secuencial (SEQ) que podemos observar en la Tabla 9.

En primer lugar, se observa existe una cierta variación en la T_b más eficiente para el modelo SEQ, con valores entre $T_b = 1^\circ\text{C}$ para las variedades Garnacha y Tempranillo hasta $T_b = 9^\circ\text{C}$ para el caso de Chardonnay. Para todas las variedades, en el modelo SEQ la T_{opt} más adecuada fue de 25°C y en cuanto a los requerimientos de frío (C_{req}) más adecuados fueron, excepto en Chardonnay, de nuevo el máximo evaluado, 70 porciones de frío que, en el caso de estos datos, de media equivale al día 37-38 del año, es decir, de nuevo tres semanas antes de lo que considera el método GFV. En el caso de la variedad Chardonnay, los requerimientos de frío fueron menores, de 50 porciones, que de media equivale al día 10 del año. Los requerimientos de calor para esta variedad y modelo también son más bajas que en el resto, pero esto puede tener sentido porque Chardonnay es mucho más precoz que las demás.

Respecto a la validación de los modelos, los valores de EF y al RMSE varían dependiendo del modelo utilizado. Aplicando el modelo GFV a las condiciones de Navarra se observa un error medio de una semana o más (6-8 días). La EF de este, en el mejor de los casos fue de 0,475 para la variedad Garnacha, pero en general es muy baja o negativa. Cuando comparamos con cualquiera del resto de modelos, en todos los casos se consigue aumentar la EF, casi un 50%. El RMSE se reduce hasta 3 días como en el caso del Tempranillo utilizando el modelo GFV ajustado.

La EF del modelo SEQ se mejora respecto a la EF del modelo GFV, aumentando hasta un 0,684 como en el caso del Chardonnay. Se consigue reducir el error siempre excepto con la Garnacha. Esto puede tener sentido porque la Garnacha fue una de las

variedades de las que el modelo GFV se tuvo una base de datos muy amplia (más de 127 observaciones en 35 sitios) (Parker et al. 2013) y es una variedad importante y por tanto, respecto a otras variedades, con más observaciones disponibles en zonas cálidas de Francia. Así, aunque de Chardonnay y Merlot también se usaron bases de datos grandes para el modelo GFV, los climas representados serían más frescos y la eficiencia aumenta y el error disminuye en 2-3 días respecto al modelo GFV estándar empleando los datos de Navarra.

Las mejores EF las encontramos en el caso de los resultados obtenidos a partir del modelo GFV ajustado, mejorando la eficiencia respecto al modelo GFV y el modelo secuencial. El RMSE en este caso disminuye siempre, obteniendo una media de error de unos 5-6 para este estado.

En general se observa que funciona mejor, dependiendo de la variedad, el modelo GFV ajustado frente al modelo GFV y el SEQ para el caso de modelización de la fase de floración.

Tabla 9. Parámetros ajustados y validación de los modelos secuencial, GFV y GFV ajustado, para el estado floración de cada una de las variedades.

Variedad	Model	T_b	T_{opt}	Cr_{eq}	D_{req}	F_{req}	RMSE	EF
TE	GFV	0	-	-	60	1188	8,6	-0,070
TE	GFV_Ajus	0	-	-	60	1299	5,8	0,515
TE	SEQ	1	25	70	39	29971	6,4	0,399
GA	GFV	0	-	-	60	1277	6,3	0,475
GA	GFV_Ajus	0	-	-	60	1312	5,9	0,531
GA	SEQ	1	25	70	39	30250	6,6	0,416
CH	GFV	0	-	-	60	1217	8,8	0,225
CH	GFV_Ajus	0	-	-	60	1120	6,8	0,543
CH	SEQ	9	25	50	10	8521	5,6	0,684
GR	GFV	-	-	-	-	-	-	-
GR	GFV_Ajus	0	-	-	60	1239	4,1	0,706
GR	SEQ	2	25	70	37	25738	4,6	0,626
ME	GFV	0	-	-	60	1269	7,5	0,101
ME	GFV_Ajus	0	-	-	60	1175	5,1	0,579
ME	SEQ	7	25	70	37	12491	5,6	0,509

c) Enero

A la hora de modelizar el estado de enero (M) se cuenta con resultados de datos obtenidos mediante los modelos GFV, GFV Ajustado (GFV_Ajus) y secuencial (SEQ) que se pueden observar en la Tabla 10. De forma general, la T_b más adecuada ha sido de 9-10 °C para todas las variedades en el caso del modelo SEQ frente a los 0 °C en que se fijó en el resto de los modelos. Con respecto a la T_{opt} se observa también que hay una tendencia de que la T_{opt} adecuada para este estado utilizado el modelo secuencial sea de 25 °C.

En cuanto a los requerimientos de frío (C_{req}) del modelo SEQ fue 70 porciones, que de media equivale al día 37-39 del año, para todas las variedades menos Chardonnay y Merlot. En el caso del Merlot los C_{req} más adecuados fueron de 40 porciones, lo que equivale al día 362 del año anterior (fin de diciembre) y en el caso del Chardonnay, con 20 porciones lo que equivale al día 335 del año anterior (inicio de diciembre). La diferencia fundamental que se observa por tanto entre el modelo GFV y GFV Ajustado frente al modelo SEQ no está tanto en los rangos de temperaturas adecuados para calcular el calor de forzado, sino en el momento en el que se satisfacen las necesidades de frío y se comienza a contabilizar acumulación de calor de forzado, ya que para todas las variedades, en el caso del modelo SEQ se comienza a contar hasta 3 meses antes de lo que consideran el resto de modelos.

Al igual que en el estado de floración, la EF del modelo GFV en general es bastante baja o incluso negativa. El RMSE varía de 1 a 2 semanas dependiendo de la variedad de la que se trate, siendo Tempranillo la variedad con mayor error. En cuanto al modelo GFV ajustado la EF aumenta alrededor de un 50% en la mayoría de las variedades y el RMSE se reduce en todas también respecto al modelo GFV con hasta un máximo de 6 días para la variedad Tempranillo. Aun así, observamos que las mejoras son muy variables dependiendo de la variedad. Respecto al modelo SEQ, las mejoras también son notables en la mayoría de los casos, disminuyendo el RMSE hasta 3-4 días y aumentando la EF en algunas variedades como Tempranillo y Garnacha, aunque esta por lo general será baja o incluso negativa. En las variedades Chardonnay y Merlot el modelo SEQ empeora respecto al modelo GFV, disminuyendo la EF llegando a alcanzar valores negativos y aumentando el RMSE en medio día en el caso del Merlot y en 3 días en el caso del Chardonnay.

Aplicando el modelo GFV en la zona de Navarra se observa que el modelo tiende a proporcionar estimaciones de al menos 10-15 días antes de las fechas reales, por lo que su eficiencia en esta región de clima cálido ($HI + 2$) es bastante baja. Esto se podría explicar por qué la mayoría de los modelos existentes a día de hoy se han parametrizado en las regiones vitivinícolas más importantes de centro Europa (Francia, Italia, Alemania, Austria, Países Bajos), donde las condiciones climáticas son como mínimo frescas ($HI - 3$ y $HI - 1$). Las regiones de climas cálidos se encuentran infrarrepresentadas y por eso el modelo no funciona de forma adecuada en Navarra.

Observamos que la variedad que parece que mejora más es con todos los modelos es Tempranillo. Mejoramos hasta 6 días con el modelo GFV Ajustado y casi 4 con el método SEQ respecto al modelo GFV. Esto puede ser debido a que, a la hora de parametrizar el modelo GFV sólo contaba con 18 datos de observaciones de una única parcela y que, además, se trata de una variedad propia de clima cálido y que el mejor modelo que funciona con este estado M para las condiciones climáticas de esta zona es el modelo GFV Ajustado.

Tabla 10. Parámetros ajustados y validación de los datos calculados según los modelos secuencial, GFV y GFV ajustado, para el estado envero de cada una de las variedades.

Variedad	Model	T _b	T _{opt}	C _{req}	D _{req}	F _{req}	RMSE	EF
TE	GFV	0	-	-	60	2484	14,0	-0,964
TE	GFV_Ajus	0	-	-	60	2764	8,4	0,296
TE	SEQ	9	25	70	39	26024	10,1	-0,025
GA	GFV	0	-	-	60	2761	9,7	0,071
GA	GFV_Ajus	0	-	-	60	2896	8,0	0,365
GA	SEQ	10	25	70	39	24142	8,3	0,306
CH	GFV	0	-	-	60	2547	7,2	0,348
CH	GFV_Ajus	0	-	-	60	2593	7,0	0,393
CH	SEQ	10	25	20	335	21737	10,1	-0,273
GR	GFV	-	-	-	-	-	-	-
GR	GFV_Ajus	0	-	-	60	2834	4,6	0,465
GR	SEQ	10	25	70	37	23868	8,8	-0,908
ME	GFV	0	-	-	60	2636	6,6	0,232
ME	GFV_Ajus	0	-	-	60	2715	6,0	0,368
ME	SEQ	10	25	40	362	22820	6,9	0,160

5. Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden extraer de este trabajo fin de grado son las siguientes:

- En las zonas de Navarra estudiadas, en los últimos 35 años se ha producido un incremento de las temperaturas durante el periodo de crecimiento y desarrollo de la vid que ha conducido a un adelanto de la fenología, más acusado para estados avanzados (floración y, sobre todo, envero) que para los iniciales (brotación).
- El modelo GFV empleado con los valores originales ajustados por sus autores, en general proporciona estimaciones más precoces que la realidad observada en las condiciones de este trabajo. Los errores dependen de la variedad, y tienden a ser mayores cuando en el ajuste original se han incluido menor cantidad de observaciones correspondientes a climas cálidos.
- El modelo GFV ajustado empleando una base de datos con observaciones fenológicas de Navarra ha mejorado notablemente en todas las variedades la eficiencia y reducido los errores de predicción comparado con los valores originales.
- El modelo secuencial ajustado a las condiciones de Navarra apunta a que la fecha de inicio de acumulación de calor debería ser aproximadamente un mes anterior a la propuesta por el modelo GFV en condiciones más frescas.
- El modelo secuencial, no obstante, no ha conseguido mejorar la eficiencia respecto a un modelo GFV ajustado a Navarra, probablemente porque el rango de situaciones climáticas que se han empleado no es lo bastante diverso para representar adecuadamente la contribución del frío invernal en la biología de la vid.

6. Bibliografía

- Abando, L. 2018. “Influencia de La Variedad , La Edad , El Clima y El Estrés Hídrico Del Viñedo En La Producción de Biomasa y Su Reparto Entre Los Diferentes Órganos.” Universidad Pública de Navarra.
- Agricultura, Ganadería y Medio Rural. (2017). Superficies por grupo de cultivo. Pamplona: Gobierno de Navarra.
- Almanza, P. J. 2011. “Determinación Del Crecimiento y Desarrollo Del Fruto de Vid (Vitis Vinifera L .) Bajo Condiciones de Clima Frío Tropical.”
- Alonso, A. D. and A. O’Neill. 2011. “Climate Change from the Perspective of Spanish Wine Growers: A Three-region Study.” *British Food Journal* 113(2):205–21.
- Anderson, J. L., E. A. Richardson, and C. D. Kesner. 1986. “Validation of chill unit and flower bud phenology models for ‘montmorency’ sour cherry.” 184:71–78.
- Antonacci, D., J. Ramos, and J. Dalla. 2001. “Influenza Della Disponibilità Termica Sulle Manifestazioni Fenologiche Della Vite in Diverse Aree Di Produzione Dei Due Emisferi.” *Frutticoltura e Di Ortofloricoltura* 63 (12):65–72.
- Cuccia, C., B. Bois, Y. Richard, and A. K. Parker. 2014. “Phenological Model Performance To Warmer Conditions :” (December 2012):169–78.
- Erez, A., S. Fishman, G. C. Linsley, and P. Allan. 1990. “The Dynamic Model for Rest Completion in Peach Buds.” *Acta Horti* 276:165–74.
- Fernández, M., M. J. Escudero, A. Rodríguez, and F. J. Rodríguez. 2012. “Estudio fenoclimático en variedades de vid autorizadas de la dop ribeiro (ourense-españa) durante la cosecha 2010” 25–38.
- Fregoni, M. 2007. “Viticultura y Cambio Climático.” *Revista Enológica*, 1–9.
- Gallina, M. A. Rodríguez and Á. Muñoz. 2016. “Índices Bioclimáticos Para La Vid.” Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Centro Regional Patagonia Norte Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle 14.
- García de Cortázar, I., N. Brisson, and J. Pierre Gaudillere. 2009. “Performance of Several Models for Predicting Budburst Date of Grapevine (Vitis Vinifera L.)” *International Journal of Biometeorology* 53(4).
- García, J. A. 2015. “Características agroclimáticas de la vid (Vitis Vinifera L. Subsp. Vinifera).” *Características Agroclimáticas de La Vid (Vitis Vinifera L. Subsp. Vinifera* 1(vino):10.
- Greenwood, D. J., J. J. Neeteson, and A. Draycott. 1985. “Response of Potatoes to N Fertilizer: Dynamic Model.” *Plant Soil* 85:185–203.
- Guisado, H.. 2016. “Caracterización y Zonificación Vitícola de España Mediante Análisis Multivariante de Variables Bioclimáticas.” Universidad de Extremadura.
- Guisado, H. A. Garcia, F. J. Moral, L. Paniagua, and F. Rebollo. 2018. Spanish Vineyard Classification According to Bioclimatic Indexes: Spanish Vineyard Bioclimatic Classification.
- Huglin, P. 1983. “Possibilités d’appréciation Objective Du Milieu Viticole.” *Bulletin*

- Del’O.I.V. Office International de La Vigne et Du Vin 56 (634):823–33.
- Instituto de Ecología de Veracruz. (2010). Cambio climático. Mexico: Instituto de Ecología de Veracruz.
- Jackson, D. (2001). Climate, Monographs in Cool Climate Viticulture. Nueva Zelanda: Daphne Brasell Associates Ltd.
- Jimenez, A. 2015. “Índices Climáticos Propios De La Vid.” 59–63.
- Lavee, S. and P. May. 1997. “Dormancy of Grapevine Buds Facts and Speculation.” Australian Journal of Grape and Wine Research 3 (1):31–46.
- Van Leeuwen, C. 2008. “Los Requisitos de Calor Para Las Variedades de Vid Es Una Información Esencial Para Adaptar El Material Vegetal En Un Clima Cambiante.” VIIème Congrès International Des Terroirs Viticoles 1:222–27.
- Marais, J., F. Calitz, and P. D. Haasbroek. 2017. “Relationship Between Microclimatic Data, Aroma Component Concentrations and Wine Quality Parameters in the Prediction of Sauvignon Blanc Wine Quality.” South African Journal of Enology & Viticulture 22(1):22–26.
- Martinez de Toda, F. and J. Sancha. 1997. “Caractérisation Ampélographique Des Cultivars Rouges de Vitis Vinifera L. Conservés En Rioja.” Bulletin de L’OIV 793–794:221–34.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, A. y. (2018). Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). Encuesta de Marco de Áreas de España. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Miranda, C., A. Bilavcik, R. Chaloupka, and S. Dreisiebner. 2018. “EIP-AGRI Focus Group Protecting Fruit Production from Frost Damage.” (October):1–20.
- Mullins, M., A. Bouquet, and L. E. Williams. 1992. “The Structure of the Grapevine: Vegetative and Reproductive Anatomy.” Biology of the Grapevine. Cambridge University Press Cambridge. 239.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. “River Flow Forecasting through Conceptual Models.” 10:282–90.
- Oliveira, M. 1998. “Calculation of Budbreak and Flowering Base Temperatures for Vitis Vinifera Cv. Toriga Francesa in the Douro Region of Portugal.” Enol. Vitic. 49:74–78.
- Parker, A., I. Garcia de Cortazar, C. Van Leeuwen, and I. Chuine. 2011. “General Phenological Model to Characterize the Timing of Flowering and Veraison of Vitis Vinifera L.” Aust. J. Grape Wine Res. 17 (2):206–16.
- Parker, A., I. García de Cortázar, I. Chuine, G. Barbeau, B. Bois, J. M. Boursiquot, J. Y. Cahurel, M. Claverie, T. Dufourcq, L. Génys, G. Guimberteau, R. W. Hofmann, O. Jacquet, T. Lacombe, C. Monamy, H. Ojeda, L. Panigai, J. C. Payan, B. Rodriguez, E. Rouchaud, C. Schneider, J. L. Spring, P. Storchi, D. Tomasi, W. Trambouze, M. Trought, and C. Van Leeuwen. 2013. “Classification of Varieties for Their Timing of Flowering and Veraison Using a Modelling Approach: A Case Study for the Grapevine Species Vitis Vinifera L.” Agricultural and Forest Meteorology 180:249–64.

- Pinto, M., W. Lira, H. Ugalde, and F. Pérez. 2003. “Fisiología de La Latencia de Yemas de Vid.” 17.
- Resco, P. 2015. “Viticultura y Cambio Climático En España: Vulnerabilidad En Las Distintas Regiones y Estrategias de Adaptación Frente Al Desarrollo de Nuevas Políticas.” Universidad Politécnica de Madrid.
- Reynier, A. 1995. “Manual de Viticultura.” Mundi-Prensa, 407.
- Riou, Ch., N. Becker, V. Sotes, V. Gomez, Alain Carbonneau, M. Panagiotou, A. Calo, A. Constacurta, R. Castro, A. Pinto, C. Lopez, L. Carneiro, and P. Climaco. 1994. “Le Déterminisme Climatique de La Maturation Du Reisin: Application Au Zonage de La Teneur En Sucre Dans La Communauté Européenne.” Communauté Européenne 322.
- Rivera, C. and L. Devoto. 2003. “Desarrollo Fenológico de 20 Clones de Vitis Vinífera.” Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Salazar, D. and P. Melgarejo. 2005. “Viticultura. Técnicas de Cultivo de La Vid, Calidad de La Uva y Atributos de Los Vinos.” Mundi-Prensa 325.
- Santesteban, L. G., C. Miranda, J. Urrestarazu, M. Loidi, and J. B. Royo. 2017. “Recorte Severo y Mayor Competencia de Laterales Como Herramienta Para Retrasar La Maduración En Viñedos de Tempranillo En Condiciones Semiáridas.” 51(2).
- Stanley-Howell, G. 2000. “Grapevine Cold:Hardiness: Mechanisms of Cold Acclimation, Mid-Winter Hardiness Maintenance, and Spring Deacclimation.”
- Tessier, C., J. David, P. This, J. Boursiqot, and A. Charrier. 1999. “Optimization of the Choice of Molecular Markers for Varietal Identification in Vitis Vinifera L.” Theoretical and Applied Genetics 98(171–177).
- Tonietto, J. 1999. “Les Macroclimats Viticoles Mondiaux et L’influence Du Mesoclimat Sur La Typicité de La Syrah et Du Muscat de Hambourg Dans Le Sud de La France.” 233.
- Tonietto, J. and A. Carbonneau. 2004. “A Multicriteria Climatic Classification System for Grape-Growing Regions Worldwide &.” 124:81–97.
- Vicente, A. M. and M. Donézar. 2004. “Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de Navarra.” Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación Del Gobierno de Navarra.
- Weinberger, J. H. 1956. “Prolonged Dormancy Trouble in Peaches in the Southeast in Relation to Winter Temperatures.” J. Amer. Hort. Sci 67:107–12.
- Wilson, L. and W. Barnett. 1983. “Degree-Days, an Aid in Crop and Pest Management.” California Agricultura 37 (1-2):47.
- Zhang, J. and C. Taylor. 2015. “Heat Model for Pistachio Bloom and Harvest.” Scientia Horticulturae 186:47–53.