

Minority grapevine varieties as climate change adaptation strategy: Exploring heat tolerance plasticity

Francisco Emmanuel Espinosa-Roldán¹, Gregorio Muñoz Organero¹, Mercedes Uscola Fernández², Félix Cabello Sáenz de Santa María¹ and Fernando Martínez De Toda³

¹Instituto Madrileño de Investigación, Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), Departamento de Agroalimentación, 28800, Alcalá de Henares, Madrid, Spain

²Universidad de Alcalá, Forest Ecology and Restoration Group, Departamento de Ciencias de la Vida, U.D. Ecología, Campus Universitario, A.P. 20, E-28805 Alcalá de Henares, Madrid, Spain

³ICVV (Universidad de La Rioja, CSIC, Gobierno de La Rioja), c/ Madre de Dios, 51, 26006 Logroño, Spain

Abstract. Climate change is increasing average temperatures and intensity and frequency of extreme events such as heat waves. Productivity declines and plant damage due to those changes are already described for several majority varieties, especially in the Mediterranean basin. Less explored minority varieties can arise as alternatives due high heat tolerance, or for having high acclimation potential to heat. We evaluated the heat tolerance after acclimation in three summer thermic environments of four Spanish varieties: two majority ('Tempranillo', 'Airén') and two minority ('Jardosuelto', 'Morate'). Summer thermic environments differed in average temperature, and length of the warm period. Varieties differed in heat tolerance and its plasticity due to the acclimation to the environments. Within the majority varieties, 'Tempranillo' showed low heat tolerance and moderate plasticity in heat tolerance highlighting its susceptibility to climate change. 'Airén' had slightly higher tolerance than 'Tempranillo' and certain adaptation capacity to environments. Within the minority, 'Jardosuelto' had high tolerance to heat events but low heat tolerance plasticity. 'Morate' was the variety with highest heat tolerance plasticity, indicating its strong adaptive potential. Majority varieties displayed susceptibility to heat events and global warming negative effects. However, minority varieties can offer solutions either by having high tolerance to heat or by having high acclimation.

1 Introducción

La viticultura es una de las actividades económicas más importantes en el mundo. En 2021, se contaba con un área de 7,3 Mill. ha cultivadas a nivel mundial siendo dicha superficie estable desde 2017 [1,2]. En Europa, pese a que la tendencia general es a la baja, algunos países como Italia y Francia mantienen un aumento de superficie cultivada. Por el contrario, otras regiones con poca tradición vitícola han aumentado su superficie, como China e Irán, Argentina o Chile. España, con 964 m ha cultivadas en 2021, es uno de los países líderes en superficie cultivada de vid en el mundo y el primero en la Unión Europea, ya que supone el equivalente al 30% de la superficie cultivada de toda Europa [3].

La vid en España es el tercer cultivo en importancia por extensión, solo por detrás de los cereales y el olivar [4]. Por tanto, es importante continuar con el estudio e investigación de nuevas tecnologías aplicables a la viticultura española.

Debido a los efectos del cambio climático, en el ámbito vitivinícola mundial se han detectado cambios fenológicos, promoviendo la precocidad del ciclo reproductivo [5] que además generan la reducción de producción y merma en la calidad del vino [6]. En España debido al cambio climático, se ha producido un aumento de la temperatura media de 0.3°C por década, 50% más que la media 2 europea [7] y las olas de calor suelen ser más tempranas y frecuentes [8].

Como consecuencia, en el viñedo manifiesta efectos negativos como: (1) adelanto de los estadios fenológicos (2) precocidad de maduración tecnológica de la uva (bayas

con exceso de azúcares, elevado grado alcohólico, baja acidez, pH elevado, inestabilidad microbiológica), (3) desacoplamiento térmico entre antocianos y azúcares, (4) aumento de los fenómenos de deshidratación, golpes de sol y asurado de racimos. [9,10] Así, para mitigar los efectos del cambio climático hay que buscar estrategias adaptativas para la viticultura.

Una de las soluciones con más potencial para adaptar los cultivos al cambio climático es la sustitución de variedades. La vid (*Vitis vinifera* L.) es una especie con una gran diversidad, independientemente del uso de sus uvas (para vino, de mesa, pasas y otros). A nivel mundial se tiene registro de más de 10,000 variedades [2]. En concreto, solo en España hay descritas 530 variedades autóctonas. Sin embargo, solo 153 son cultivadas y las restantes 377 variedades son minoritarias muy poco explotadas. Aunque el número de variedades cultivadas es relativamente elevado, son en realidad pocas variedades la que dominan la superficie de cultivo, con 34 variedades cultivadas acumulando 96% de la superficie. Y de ellas, tan solo 13 variedades ocupan el 80% de la superficie cultivada [12]. La gran diversidad varietal sugiere que pueden existir variedades que sean más adecuadas a los futuros ambientes climáticos por ser resistentes a condiciones de fuerte estrés abiótico manteniendo la productividad y la calidad del vino [15]. Por tanto, es clave evaluar el potencial de las variedades minoritarias como sustitutivas de aquellas variedades mayoritarias que vayan a verse más perjudicadas en ambientes climáticos futuros.

A pesar de su valor estratégico, actualmente la vitivinicultura en España y en el mundo sufre una fuerte disminución y desaparición de variedades de vid

cultivadas con aptitud para producir vinos de gran calidad y en especial de variedades antiguas [11,13]. En los últimos diez años han desaparecido alrededor de 350.000 ha en España. Además, la reconversión del viñedo está haciendo desaparecer las plantaciones más viejas, que es donde se conservaba la mayor riqueza varietal [11,14]. Por otro lado, la biodiversidad nacional también se ve comprometida por a la introducción de nuevas variedades como respuesta a la demanda del mercado, que son mayoritariamente extranjeras, como Cabernet Sauvignon, Merlot, Petit verdot, Malbec, Riesling, entre otras [14]. Es importante poner en valor la diversidad varietal nacional como alternativa para hacer frente al cambio climático y fomentar su conservación.

Dentro de los efectos del cambio climático se incluyen un aumento de temperaturas promedio, pero también el incremento de eventos extremos tanto en intensidad y frecuencia [15,16]. Los eventos extremos de calor tienen un alto impacto ya que se producen durante el desarrollo vegetativo y reproductivo de la vid, impactando de forma directa la productividad [1,17]. El estrés por calor estival empieza a hacerse notar con temperaturas superiores a 35°C [18]. Cada vez aumenta más la frecuencia de aparición y duración de periodos con elevadas temperaturas durante uno o varios días, denominado olas de calor [19]. Actualmente se alcanzan registros de temperaturas máximas superiores a 40°C y puntualmente olas de calor que superan holgadamente 45°C [20]. Además, el estrés por calor en temporadas estivales interacciona con otros estreses abióticos, como el déficit de agua, la alta luz solar y la alta temperatura [16,21]. Consecuentemente, para la selección de variedades más adaptadas a las futuras condiciones climáticas es imperativo conocer la tolerancia al calor de las variedades.

Por otro lado, las plantas también pueden activar mecanismos de aclimatación al calor reduciendo los efectos negativos de las altas temperaturas [22,23]. El efecto más común es el cambio de la temperatura óptima de la fotosíntesis [24,25], como la variación de la aclimatación fotosintética en función de la variedad, forma de cultivo y ecotipos [26,27]. Se ha encontrado el desarrollo de resistencia a estrés térmico en plantas de vid sometidas a tratamientos de aclimatación, resultando principalmente en la modificación de la estructura de la membrana celular de la hoja [22]. La resistencia observada a estrés térmico después de la aclimatación ha demostrado ser un potencial método para mejorar la tolerancia de otros tipos de estrés, generando adaptación cruzada [28,29].

Distintas variedades difieren en su plasticidad de tolerancia al calor [27]. Sin embargo, apenas se conoce la tolerancia intrínseca al calor de las variedades cultivadas en España. En especial, la exploración de variedades minoritarias en busca de resistencia a golpes de calor o su plasticidad térmica, es de particular interés ya que son variedades que han prosperado en condiciones de estrés por calor cada vez más intensas y cambiantes de clima cálido en la península.

El objetivo de este estudio fue evaluar la tolerancia al calor en cuatro variedades de vid, españolas: dos mayoritarias, ‘Tempranillo’ y ‘Airén’ y dos minoritarias, ‘Jarrosuelto’ y ‘Morate’ y su capacidad de aclimatación en función del ambiente estival. Se parte de la hipótesis de

que distintas variedades presentarán distinta tolerancia a calor siendo algunas más plásticas a los ambientes estivales.

2 materiales y métodos

2.1 Material Vegetal

Se estudiaron 2 variedades de vid mayoritarias: ‘Tempranillo’ (tinta) y ‘Airén’ (blanca) y dos variedades de vid minoritarias: ‘Morate’ (tinta) y ‘Jarrosuelto’ (blanca). Los esquejes se obtuvieron de la colección del Banco de Germoplasma de Vid “El Encín” del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), localizado en Alcalá de Henares, Madrid, España (40°31'17.6"N; 3°17'21.6"W, 610 msnm.).

2.2 Propagación y cultivo

La recolección de esquejes se efectuó en noviembre de 2020 durante la poda de invierno [30] y se conservaron en cámara fría a 4°C hasta su utilización. En enero de 2021, los esquejes se enraizaron en camas calientes con un sustrato de perlita agrícola (Perlita Expandida A3-100L, Projar®, España) y a una temperatura controlada de 20°C. Durante el enraizamiento, se regó mediante sistemas de nebulización, durante diez minutos cada dos horas, desde las 08:00hrs hasta las 20:00hrs.

En marzo de 2021 se realizó el trasplante. Se seleccionaron 30 esquejes de cada variedad según los criterios: (1) esquejes vivos y vigorosos; (2) con un desarrollo de un sistema radical adecuado; y (3) con al menos 3-4 hojas totalmente expandidas. Se trasplantaron a macetas rígidas de polietileno negro 16 x 17 cm (2.5L), con una mezcla de sustrato 1:3 v:v de perlita agrícola (Perlita Expandida A3-100L, Projar®, España) y de mezcla de turba Sphagnum (60/40) (Profit-substract-70Liter, GRAMOFLO®R, Alemania).

2.3 Diseño experimental y de tratamientos térmicos de verano

En junio de 2021, un tercio de los esquejes de cada variedad se asignaron al azar a cada uno de los ambientes de cultivo (10 esquejes por variedad y ambiente). Se implementaron tres ambientes climáticos de verano: un ambiente con temperaturas estivales actuales, Control (CTO) y dos ambientes con temperaturas estivales incrementadas: Alta temperatura 1 AT1 y Alta temperatura 2 (AT2). (Tabla 1).

El ambiente de aclimatación AT1, incrementaba el estrés térmico con temperaturas ligeramente superiores a CTO, con temperaturas medias aproximadas a 1.5°C mayores que en CTO durante el mes de julio. Se consiguió un ambiente estival ligeramente más cálido, estable y con eventos térmicos, breves, pero de alta intensidad respecto a CTO. El Ambiente de aclimatación AT2, incrementó la temperatura media diaria durante todo el experimento, hasta 2.7°C más alta respecto a las observadas en el ambiente control (CTO). El efecto térmico estresante que se consiguió en AT2, presentó las temperaturas más altas,

estables y con picos de máximas y mínimas de menor amplitud que los observados en AT1 durante todo el experimento. La diferencia térmica más extrema entre tratamientos se identificó en las horas centrales del día, entre las 12 y las 17hrs Figura 1.

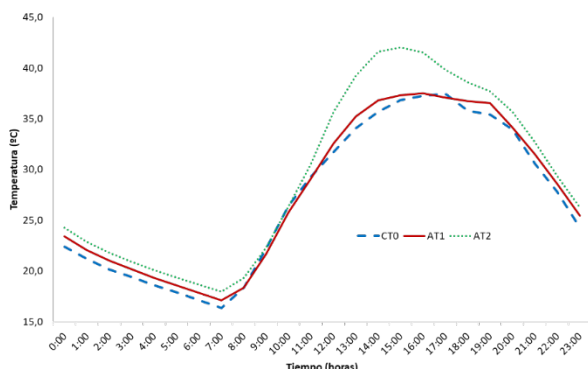


Figura 1. Temperatura horaria promedio en los ambientes climáticos control (CT0), Alta temperatura 1 (AT1) y Alta temperatura 2 (AT2), durante la duración del experimento.

Tabla 1. Temperatura promedios diaria media, mínimas y máximas de cada mes en los 3 ambientes estivales de aclimatación: control (CT0), temperaturas actuales; temperaturas incrementadas en ~1°C en julio (AT1), y temperaturas incrementadas en ~2°C durante junio (AT2).

Temperatura	Junio			Julio		
	CT0	AT1	AT2	CT0	AT1	AT2
Mínima	15,74	16,19	16,61	16,85	17,95	19,05
Media	26,29	26,60	28,62	27,97	28,99	30,64
Máxima	37,92	37,70	44,84	38,94	38,94	40,28

Para crear los ambientes, las plantas sometidas al ambiente CT0 se instalaron en campo abierto, sin alteración de condiciones ambientales y protegidas únicamente por una malla anti pájaros. El tratamiento AT1 se instaló dentro de un invernadero de cristal con condiciones ambientales controladas. El tratamiento AT2 se instaló en el mismo invernadero de AT1, pero además se añadió una cubierta completa, techo y laterales, de plástico de polietileno transparente (TRC5 Premium/Sotrafa®/España). Se monitoreó la temperatura de cada ambiente horariamente con un sensor de temperatura (Hobo Pendant Temperature/Light 64 K Data Logger, Onset, Estados Unidos), colocado a la altura media del dosel de las plantas. Además, a cada planta se le instaló un sistema de riego automatizado, tipo “black spider” de cuatro puntos con gotero auto compensante (DBS4Q/Toro®/España) y estacas angulares de inserción de flujo turbulento (IPS0301Q/Toro®/España). Las plantas se regaron diariamente, durante 30 minutos cada 11 horas. Para evitar el sobrecalentamiento de las mesas, del sustrato y los contenedores, se incorporó una capa de grava blanca debajo de las mesas de cultivo, buscando emular las condiciones térmicas presentes en campo.

2.4 Test OJIP para la estimación de la tolerancia y daños ocasionados por estrés térmico en variedades de vid

Entre el 16 al 20 de agosto de 2021, se determinó la tolerancia al daño por calor mediante el método

estandarizado OJIP [31]. Se seleccionaron 4 temperaturas: 45, 47, 50 y 52°C. Este rango incluye como temperatura central 47°C ya que es la temperatura crítica (LT50) en distintas especies del género *Vitis* [32]. Para cada temperatura, se testaron 2-3 plantas por tratamiento (variedad x ambiente). Se recolectaron hojas del tercio medio, y se mantuvieron con el peciolo en agua en tubos falcon de 50mL. En el laboratorio las hojas se aclimataron a oscuridad, durante 30 minutos.

Una vez aclimatadas, se midió la eficiencia potencial del fotosistema PSD II inicial $(F_v/F_m)_{00 \text{ hrs}}$ en tres puntos de cada hoja con un Fluorímetro (HANDY PEA+/Hansatech Instruments LTD/ Reino Unido). Posteriormente, las hojas se embolsaron individualmente con: (1) láminas de papel filtro húmedo para evitar estrés hídrico; (2) papel aluminio para facilitar la transferencia térmica y (3) bolsas de plástico con cierre hermético. Se aplicaron golpes de calor con una duración de 30 minutos, a la temperatura objetivo con un Baño María (Baño de agua-WPE 45/ MEMMERT GmbH+Co.KG/Alemania). Una vez alcanzada la temperatura objetivo en el baño se introdujeron los paquetes individuales sujetos en varillas sumergiéndolos por completo. Durante el baño, la temperatura de las hojas se midió en cuatro hojas al azar, cada cinco minutos con un termopar (HT-9815/Hti/China). Tras el baño maría, se sacaron las hojas de sus paquetes y se colocaron nuevamente con el peciolo en agua dentro de tubos falcon, para evitar deshidratación, y se mantuvieron en oscuridad y a temperatura ambiente durante 24 horas. Después se midió nuevamente el F_v/F_m $(F_v/F_m)_{24 \text{ hrs}}$. El daño se calculó como la reducción de F_v/F_m según la ecuación:

$$\text{Reducción } F_v/F_m = \frac{(F_v/F_m)_{00 \text{ hrs}} - (F_v/F_m)_{24 \text{ hrs}}}{(F_v/F_m)_{00 \text{ hrs}}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Donde: $(F_v/F_m)_{00 \text{ hrs}}$ $(F_v/F_m)_{24 \text{ hrs}}$ son los valores medio del F_v/F_m de la hoja antes y 24 horas después de la exposición al tratamiento de golpe térmico. Cada día se hicieron dos baños cada uno con diferente temperatura objetivo, y en cada baño se usó una hoja por tratamiento (variedad x ambiente). En total se realizaron 10 baños (5 días).

2.5 Análisis estadístico

Para evaluar el efecto de la temperatura del golpe de calor sobre la Reducción de F_v/F_m se ajustó un modelo logístico de dos parámetros (pendiente y punto de inflexión) y fijando como límite inferior el valor 0 (asíntota izquierda) y como límite máximo 100 (asíntota derecha), utilizando el paquete “drc” [33]. En primer lugar, se seleccionó el modelo logístico con mejor ajuste (logístico simétrico o asimétrico, i.e Weibull 1 o 2) según el criterio de información Akaike con la función “mselec”. Para determinar el efecto de la variedad y el ambiente estival de aclimatación y/o de su interacción se compararon distintos modelos anidados: (1) un modelo general, que solo incluía la temperatura como variable explicativa; (2) un modelo de variedades, que además de la temperatura incluía la variedad como variable explicativa; (3) un modelo de

ambiente, con variables explicativas temperatura y ambiente de aclimatación y; 4) un modelo completo, que incluía todas las variables explicativas en interacción.

Tras la selección del modelo, con la función “ED” se calcularon distintos parámetros: (a) DT15 temperatura que produce el 15% de reducción de Fv/Fm, como indicador de temperatura de inicio de aparición de daño por calor; (b) DT50, punto en el cual la Fv/Fm, se ve reducida en un 50%; y (c) DT90, temperatura a la cual el Fv/Fm, prácticamente se inactiva. También se calculó con la función “coefest” la pendiente de la parte lineal de la curva logística, que indica la velocidad a la cual se produce el daño por golpes de calor. Todos los análisis se realizaron con “RStudio” [34].

3 Resultados

El modelo logístico con mejor ajuste (AIC más alto) fue el Weibull 2 (datos no mostrados). La reducción de Fv/Fm se incrementó con la temperatura del golpe de calor (modelo general). Además, tanto Las variedades como los ambientes de aclimatación, de forma independiente modificaron la respuesta de reducción de Fv/Fm (modelos significativamente distintos al modelo general, Tabla 2). Sin embargo, no todas las variedades modificaron su tolerancia al calor de la misma forma según el ambiente de aclimatación (interacción ambiente x variedad, modelo completo). Así, algunas variedades modificaron los modelos logísticos ajustados en cada ambiente de aclimatación mientras que otras presentaron la misma curva en todos los ambientes de aclimatación (Fig. 1).

Tabla 2. AIC de los distintos modelos anidados de efectos sobre la reducción de Fv/Fm y p-valor del modelo concreto en comparación con el modelo general.

Modelo	AIC	p-valor
General	1020.794	
Variedad	1011.737	0.0028
Ambiente aclimatación	1017.306	0.0265
Completo (Variedad x Ambiente)	1015.785	0.0046

En condiciones climáticas estivales actuales (CT0) las variedades blancas comenzaron a sufrir reducciones del Fv/Fm a temperaturas más altas pero dada la mayor pendiente (mayor incremento de la reducción de Fv/Fm por cada incremento de temperatura) alcanzaron su umbral máximo (DT90) a temperaturas más bajas que las variedades tintas (Tabla 3).

Todas las variedades modificaron sus patrones de respuesta al golpe de calor en función de los ambientes climáticos excepto ‘Jarrosuelto’ (interacción variedad x ambiente, Tabla 2, Fig. 2). El ambiente AT1, con mayor fluctuación térmica pero solo moderadamente más cálido que el CT0, modificó principalmente las pendientes de incremento del daño (reducción de Fv/Fm) con los incrementos de temperatura de los golpes de calor en todas las variedades, excepto ‘Jarrosuelto’. Por ello, se incrementó la temperatura de aparición de efectos negativos (DT15) en todas las variedades salvo ‘Jarrosuelto’. Sin embargo, también redujo la temperatura umbral de tolerancia (menor DT90, mayor pendiente) reduciendo el margen de tolerancia térmica a golpes de

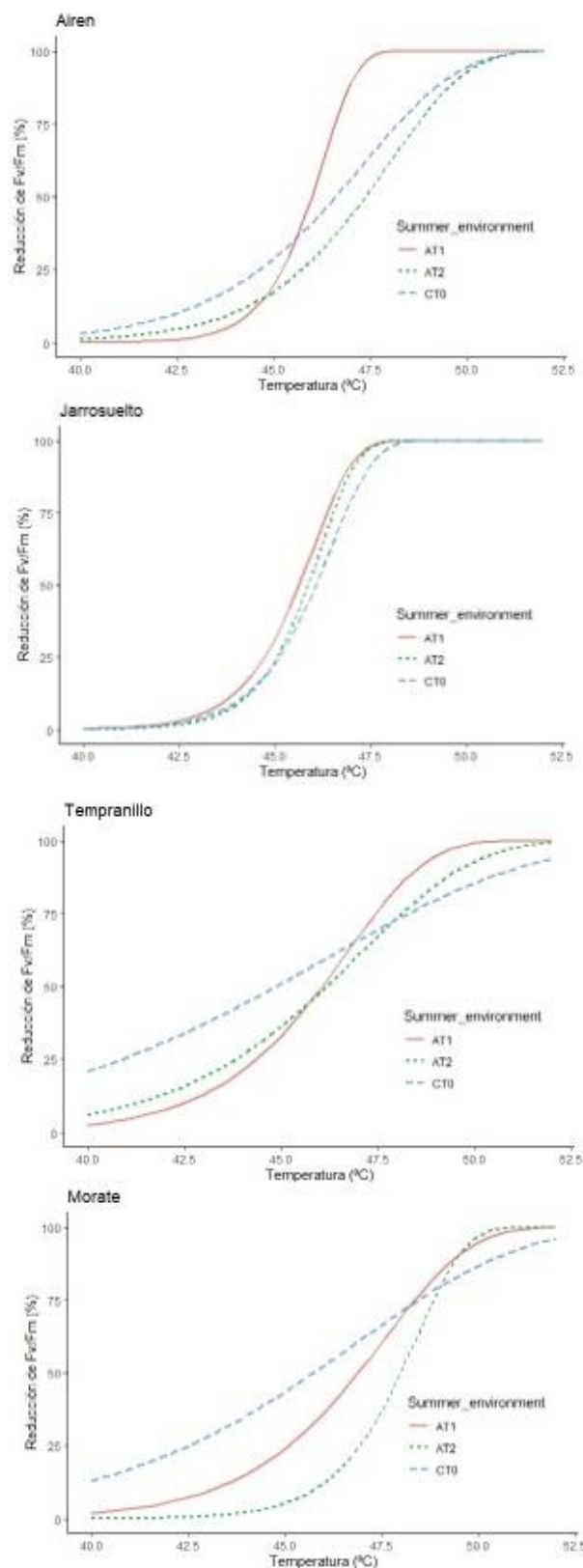


Figura 2. Modelos logísticos ajustados de reducción de la Fv/Fm con la temperatura para cuatro variedades de vid en función del ambiente estival de aclimatación, CT0 AT1 y AT2.

calor. En las variedades tintas el AT1, además de reducir los límites térmicos de daño (cambios de pendiente), desplazó la curva hacia la derecha, lo que incrementó en torno a 1°C el DT50 con respecto al ambiente CT0.

En el ambiente AT2, con incrementos notables de las temperaturas ambiente, cada variedad modificó sus patrones respecto a CT0 de forma específica. En ‘Airén’ los cambios de respuesta con respecto a los golpes de calor fueron muy pequeños, con un ligero incremento de valores de DT15, DT50, y DT90, pero sin cambios significativos en la pendiente. Sin embargo, ‘Tempranillo’ y ‘Morate’ modificaron tanto los umbrales de aparición del daño (DT15), DT50 y umbral máximo de tolerancia (DT90), como la pendiente de la curva, siendo más evidente en ‘Morate’. Como ya se indicó ‘Jarrosuelto’ no modificó ningún parámetro de tolerancia (Tabla 3).

Tabla 3. Temperaturas que producen el 15, 50 y 90% de reducción del Fv/Fm (DT15, DT50 Y DT90, respectivamente) en cuatro variedades de *Vitis vinifera* L., en función del ambiente de aclimatación; Control (CT0): con las condiciones actuales de temperatura, Alta temperatura 1 (AT1): temperaturas ligeramente más altas y picos máximos extremos en periodos breves, Alta Temperatura 2 (AT2): temperaturas altas estables, mínimas y máximas menos extremas. Los datos son estimaciones de modelos logísticos ajustados.

	Airén	Jarrosuelto	Tempranillo	Morate
DT 15				
CT0	43.4±1,0	44,5±0,9	38,5± 2,7	40,6±2,0
AT1	44,8 ± 0,5	44,1 ± 0,5	43,2 ± 1,5	43,9 ± 0,8
AT2	44.6 ± 0.7	44,5 ± 0,6	42,3 ± 1,2	43,2 ± 0,7
DT 50				
CT0	46,6 ± 0,5	46,0 ± 0,2	44,8 ± 1,1	45,7 ± 0,8
AT1	45,9 ± 0,2	45,6 ± 0,2	46,0 ± 0,5	46,9 ± 0,5
AT2	47,3 ± 0,5	45,8 ± 0,2	46,1 ± 0,5	48,0 ± 0,6
DT 90				
CT0	49,4 ± 1,1	47,4 ± 0,8	50,9 ± 1,3	50,5 ± 1,0
AT1	47,0 ± 0,4	46,9 ± 0,4	48,4 ± 1,9	49,4 ± 0,9
AT2	49,7 ± 0,8	47,0 ± 0,5	49,5 ± 1,0	49,4 ± 0,8
Pendiente (b)				
CT0	20,3 ± 6,2	43,4 ± 14,2	9,4 ± 2,9	12,0 ± 3,4
AT1	52,8 ± 19,0	43,1 ± 14,2	23,3 ± 15,5	22,5 ± 6,6
AT2	24,8 ± 6,1	48,6 ± 21,6	16,8 ± 4,8	39,5 ± 12,4

En general, en todos los ambientes, las diferencias en valores de DT15 y DT90 fueron muy pequeñas entre variedades. Aunque ‘Tempranillo’ mostró menor DT15 y ‘Jarrosuelto’ presentó menor DT90 que las demás variedades, las mayores diferencias se encontraron en el DT50.

Las variedades de uva blanca independientemente del ambiente de aclimatación presentaron DT50 cercanos a los 46°C. Este valor fue superior que el del DT50 de las variedades de uva tinta en el ambiente CT0. Sin embargo, en los ambientes de aclimatación el incremento del DT50 de las variedades tintas fue superior al de las blancas. Así las diferencias desaparecieron en el ambiente AT1 entre tintas y blancas y en el ambiente AT2 y las variedades tintas presentaron valores de DT50 superiores a las blancas, y especialmente la variedad ‘Morate’.

4 Discusión

4.1 Tolerancia intrínseca y plasticidad al calor en distintas variedades

No todas las variedades tuvieron la misma tolerancia al calor en condiciones de ambiente climático actual (con una aclimatación al calor moderada). Por ejemplo, Tempranillo comenzó a sufrir daños por calor (DT15) en torno a 38°C mientras que en ‘Jarrosuelto’ y ‘Airén’ la aparición de daños por calor no se detectó hasta valores superiores a 43°C. Igualmente, el 50% de daño, medido como reducción de Fv/Fm (DT50), se alcanzó a temperaturas en torno a 44°C en ‘Tempranillo’, temperaturas muy frecuentes durante el verano en el contexto mediterráneo. Por el contrario, en variedades como ‘Jarrosuelto’ o ‘Airén’ el DT50 no se alcanzó hasta temperaturas en torno a 46°C. Estos valores de DT50 son similares a los valores de variedades extranjeras como ‘Riesling’, de origen alemán y ‘Jingxiu’ de origen chino [31] o ‘Kekfrankos’ de origen esloveno [35].

Igualmente, las variedades estudiadas difirieron en su plasticidad al calor según los ambientes de aclimatación. ‘Jarrosuelto’ no presentó plasticidad independientemente del ambiente de aclimatación. Esto puede deberse a que, ya en las condiciones climáticas actuales, esté expresando su máxima tolerancia o a que esta variedad presenta baja capacidad de aclimatación. Por el contrario, las variedades tintas, ‘Tempranillo’ y ‘Morate’, presentaron plasticidad y modificaron su tolerancia al calor de forma distinta según el ambiente de aclimatación. ‘Tempranillo’ a pesar de tener la menor tolerancia en ambiente climático presente (CT0), al incrementar la temperatura ambiental solo en 1°C (AT1) alcanzó niveles de tolerancia similares al resto de las variedades. A pesar de esta plasticidad, el ambiente más severo de aclimatación (AT2) no modificó su tolerancia a las altas temperaturas. Lo que sugiere que ‘Tempranillo’ ya en condiciones actuales, está cerca de llegar a su límite máximo de desarrollo de tolerancia al calor. ‘Morate’, presentó cambios en la tolerancia más moderados, pero su respuesta fue progresiva a través de ambientes de aclimatación cada vez más severos de altas temperaturas. Esto indica que, en esta última variedad, puede seguir existiendo margen de incremento de tolerancia a golpes de calor.

4.2 Selección de variedades para contextos de cambio climático

Con las temperaturas máximas actuales, en climas mediterráneos ya se han detectado daños en la maquinaria fotosintética. La temperatura a la cual se presentó el DT50 en este experimento fue ~46°C. Aunque 46°C es una temperatura factible en muchas regiones del mundo, sigue siendo una temperatura extrema. Esto indica que el incremento de las temperaturas estivales como consecuencia del cambio climático provocará efectos negativos en la productividad de las variedades. Sin embargo, algunas de ellas como ‘Tempranillo’, pero especialmente Morate, pueden aclimatarse a las futuras

condiciones y responder a las temperaturas estivales altas sin que se traduzca en una reducción de productividad.

Por otro lado, la temperatura del aire y la temperatura de la hoja pueden diferir notablemente. De hecho, la temperatura de la hoja puede superar holgadamente 4°C la temperatura del aire [36]. Las curvas de tolerancia a calor generadas en este experimento representan tolerancia a calor en función de la temperatura en la superficie de la hoja [31]. Por todo ello, es esperable que daños más intensos ocurran incluso a temperaturas del aire más bajas de 46°C. En este contexto, es especialmente relevante buscar las variedades más tolerantes al calor y con mayor plasticidad como estrategia de adaptación al cambio climático.

Las variedades estudiadas a pesar de su uso y distribución en un clima cálido, no presentaron mayores tolerancias que otras especies del género *Vitis* u otras variedades dentro de la especie *Vitis vinifera* L. De hecho, otros estudios han identificado mayor tolerancia al estrés térmico (DT50) en especies silvestres de este género como en *V. californica* o híbridos como *V. labrusca* y *V. vinifera* L. [37]. Igualmente, algunas variedades domesticadas de *Vitis vinifera* L. también presentan mayor tolerancia que las variedades estudiadas como 'Jingxiu' y 'Riesling' (DT50 = 47°C, respectivamente) [31]. Se encontraron también grandes diferencias en respuesta a un golpe de calor a 50°C entre 68 variedades de *Vitis vinifera* L. [35, 38]. A pesar de los diferentes patrones de tolerancia térmica y plasticidad al calor entre variedades, las diferencias entre estas son relativamente pequeñas en este estudio y a través de la bibliografía. Sin embargo, las pequeñas diferencias detectadas podrían expresarse de forma más intensa tras considerar la capacidad de regulación térmica en la superficie de la hoja de cada variedad en función de atributos intrínsecos como la transpiración. Todo ello indica que es clave explorar un mayor número de variedades para identificar aquellas con mayor tolerancia.

Las variedades minoritarias, constituyen una fuente de información aún poco explorada en la identificación adaptación a contextos climáticos, sea en condiciones de clima actual, como en escenarios futuros más estresantes. La respuesta de las variedades minoritarias 'Morate' y 'Jarrosuelto', advierte de la potencial existencia de material dentro del acervo varietal autóctono de España, con capacidad de adaptación a condiciones estivales estresantes y cambiantes. Por lo tanto, esta variabilidad de capacidad de adaptación térmica de las variedades exhibe una condición importante dentro de los criterios de conservación del material vegetal de vid en España.

5 Conclusiones

La aclimatación térmica simulando veranos más cálidos, modificó la tolerancia de las variedades de vid a golpes de calor en temporadas estivales de forma distinta en cada variedad.

Las variedades mayoritarias 'Airén' y 'Tempranillo' en ambientes térmicos estresantes, aumentaron el umbral de temperatura de aparición de daño por reducciones de Fv/FM, pero redujeron significativamente el máximo térmico de tolerancia.

'Jarrosuelto' no presentó ninguna aclimatación de la tolerancia a golpes de calor en los distintos ambientes, por tanto, fue la variedad menos plástica.

La variedad minoritaria 'Morate' fue la más tolerante, dado que el máximo de temperatura para daño en el Fv/Fm fue el mayor de las cuatro variedades estudiadas y además la más plástica.

El estudio de tolerancia a estrés térmico ocasionado por golpes de calor en variedades minoritarias españolas supone una importante línea de investigación que serviría de apoyo a las estrategias de mitigación de efectos del cambio climático en el viñedo, cuyo enfoque radica en la conservación de las actuales regiones vitivinícolas mediante el cultivo de variedades tradicionales.

Agradecimientos

Project RTI2018-101085-R-C31 (MINORVIN) funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by ERDF A way of making Europe. F.E.E-R. has received a grant (PRE2019-089073) funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and ESF Investing in your future.

Referencias

1. H. Fraga, A.C. Malheiro, J. Moutinho-Pereira, J.A. Santos, *Food Energy Sec.* **1**, 94-110 (2012)
2. OIV, *Distribution of the world's grapevine varieties*, 1-53 (2017)
3. OIV, *Statistical report on world vitiviniculture*, 1-23 (2019)
4. P. Resco, *Viticultura y cambio climático en España: Vulnerabilidad en las distintas regiones y estrategias de adaptación frente al desarrollo de nuevas políticas*, 60 (2015)
5. A. Skiryecz, D. Inzé, *Curr Opin Biotechnol.* **21**, 197-203 (2010)
6. C. Van Leeuwen, P. Darriet, *J Wine Econ.* **11**, 150-167 (2016)
7. F. Heras Hernández, *Ambienta* **124**, 58-67 (2018)
8. F. Martínez Navarro, F. Simón-Soria, G. López-Abente, *Gaceta Sanitaria* **18**, 250-258 (2004)
9. V.O. Sadras, M.A. Moran, *Aust. J. Grape Wine Res.* **18**, 115-122 (2012)
10. F. Martínez De Toda, M. J. García, P. Balda, *Zubia* **29**, 79-90 (2017)
11. F. Cabello, J. M. Ortiz M., G. Muñoz-Organero, I. Rodríguez-Torres, B. A. Benito, C. Rubio, M. T. De Andrés D., *Variedades de Vid en España* **1**, (2020)
12. L. Webb, P. Whetton, E. Barlow, *Aust. J. Grape Wine Res.* **13**, 165-175 (2007)
13. M. Comenge, *La vid y Los vinos españoles*, 1-247 (1942)
14. F. Cabello, *3ra Jornada Vitícola de Villena: El secreto está en la uva.*, 1-3 (2020)
15. L. Torregrosa, A. Bigard, A. Doligez, D. Lecourieux, M. Rienth, C. Roux, A. Adivize, et al., *International journal of vine and wine* **51**, 155-165 (2017)
16. I. Morales-Castilla, I. G. de Cortázar-Atauri, B.I. Cook, T. Lacombe, A. Parker, C. Van Leeuwen, K. A.

- Nicholas, E. M. Wolkovich, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **117**, 2864-2869 (2020)
17. E. M. Wolkovich, I. García De Cortázar-Atauri, I. Morales-Castilla, K. A. Nicholas, T. Lacombe, *Nature climate change* **8**, 29-37 (2018)
18. A. Ferrandino, C. Lovisolo, *Environ Exp Bot.* **103**, 138-147 (2014)
19. C. M. Rodríguez, T. O. Villazán, *Boletín de la A.G.E.* **30**, 155-179 (2000)
20. H. Schultz, *Aust J Grape Wine R* **6**, 2-12 (2000)
21. G. R. Cramer, K. Urano, S. Delrot, M. Pezzotti, K. Shinozaki, *BMC Plant Biol.* **11**, 163 (2011)
22. J. H. Zhang, W. D. Huang, Y. P. Liu, Q. H. Pan, *J Integr Plant Biol.* **47**, 959-970 (2005)
23. A. Wahid, S. Gelani, M. Ashraf, M. Foolad, *Environ Exp Bot.* **61**, 199-223 (2007)
24. S. Zaka, E. Frak, B. Julier, F. Gastal, G. Louarn, *AoB PLANTS* **8**, 1-15 (2016)
25. H. Zhou, M. Xu, R. Hou, Y. Zheng, Y. Chi, Z. Ouyang, *Environ Exp Bot.* **150**, 249-259 (2018)
26. W. Yamori, K. Hikosaka, D.A. Way, *Photosynthesis Research* **119**, 101-107 (2014)
27. A. E. Gallo, J. E. Perez-Peña, J. A. Prieto, *Functional Plant Biology* **48**, 342-357 (2021)
28. L. J. Wang, W. D. Huang, J. C. Zhan, *Acta Hort Sin.* **30**, 452-454 (2003)
29. J. Larkindale, B. Huang, *Environ Exp Bot.* **51**, 57-67 (2004)
30. C. J. Alley, J. E. Peterson, *Am J Enol Vitic* **28**, 1-7 (1997)
31. H. Xu, G. Liu, G. Liu, B. Yan, W. Duan, L. Wang, S. Li, *BMC plant biology* **14**, 1-10 (2014)
32. E. M. Curtis, C. A. Knight, K. Petrou, A. Leigh, *Oecologia* **175**, 1051-1061 (2014)
33. C. Ritz, F. Baty, J. C. Streibig, D. Gerhard, *Plos One* **10**, 1-13 (2015)
34. R Core Team, *R: A language and environment for statistical computing* (2021)
35. Z. Zsófi, G. Váradi, B. Bálo, M. Marschall, Z. Nagy, S. Dulai, *Functional plant biology* **36**, 310-322 (2009)
36. M. Uscola, Comunicación propia (2022)
37. J. A. Gamon, R. W. Pearcy, *Plant physiology* **92**, 487-494 (1990)
38. Q. Zha, X. Xi, Y. He, A. Jiang, *Vitis* **57**, 75-81 (2018)