

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**



---

**Universidad de Valladolid**

**Grado en Enología**

**“Efectos de la aplicación de forclorfenurón (CPPU) sobre el  
comportamiento del viñedo, la composición de la uva y el vino cv.  
Verdejo”.**

Alumno: Esteban Otero Martínez

Tutor: María Rosa González García

Noviembre de 2025

## **Agradecimientos**

Este trabajo es el resultado de un camino lleno de retos, aprendizajes y momentos que nunca olvidaré.

Quiero dar las gracias, en primer lugar, a mi tutora, por su paciencia. A mi familia por recordarme siempre que todo esfuerzo vale la pena

Gracias a quienes han estado a mi lado en este camino.

A mis amigos, por estar ahí, por sus palabras de ánimo y por hacer que este proceso fuera más llevadero. También agradezco a todas esas personas, que con sus consejos y experiencias han enriquecido este proyecto. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en este trabajo y en mí. Este logro no es solo mío, es también suyo. Gracias de corazón.

## ÍNDICE

Resumen .....	1
Abstract .....	2
1. Introducción .....	3
1.1. Evaluación fisiológica y agronómica del viñedo .....	3
1.2. Factores agronómicos que afectan al ciclo vegetativo en la DOP Rueda .....	4
1.3. Efectos del cambio climático sobre la calidad de la uva y del vino .....	5
1.4. Técnicas de cultivo aplicables para minimizar el efecto del cambio climático .....	6
1.5. Aplicación del CPPU en el viñedo .....	6
2. Objetivos .....	7
3. Materiales y métodos .....	8
3.1. Localización del estudio y diseño experimental .....	8
3.2. Aplicación de los tratamientos .....	8
3.3. Datos meteorológicos de la zona de estudio .....	9
3.4. Controles y observaciones .....	9
3.4.1. Medidas de potencial hídrico y fotosíntesis .....	10
3.4.2. Medidas de control de producción y vigor .....	10
3.4.3. Seguimiento de maduración de la uva .....	11
3.5. Microvinificaciones .....	11
3.6. Análisis de mostos .....	12
3.6.1. Contenido de sólidos solubles .....	12
3.6.2. Determinación de los ácidos .....	12
3.6.3. Determinación de potasio .....	12
3.6.4. Índice de polifenoles totales (IPT) .....	12
3.7. Análisis de vinos .....	12
3.7.1. Grado alcohólico .....	12
3.7.2. pH y acidez total .....	13
3.7.3. Acidez volátil .....	13
3.7.4. Índice de polifenoles totales .....	13
3.7.5. Parámetros de color (CIELab) .....	13
3.7.6. Sulfuroso libre y total .....	13
3.8. Análisis de datos .....	13
4. Resultados y discusión .....	13
4.1. Efecto del forclorfenurón en la fotosíntesis y el estado hídrico .....	13
4.1.1. Potencial hídrico de tallo .....	13
4.1.2. Actividad fotosintética .....	14

4.2. Rendimiento y vigor.....	15
4.3. Efecto de la aplicación de CPPU en la composición de la uva.....	16
4.4. Efecto de la aplicación de CPPU en la composición del vino.....	16
Conclusiones.....	17
6. Bibliografía .....	17

## Resumen

El presente trabajo evaluó el efecto del regulador de crecimiento CPPU (forclorfenurón) sobre la fisiología, el comportamiento agronómico y la calidad enológica de vides cv. Verdejo cultivadas en la DOP Rueda durante la campaña de 2021. Se aplicó un diseño experimental en bloques completos al azar, comparando plantas tratadas con CPPU y testigos sin tratamiento. Se realizaron mediciones fisiológicas (potencial hídrico, parámetros fotosintéticos), agronómicas (rendimiento, peso de bayas, índice de Ravaz) y análisis físico-químicos de mosto y vino.

Los resultados mostraron que el CPPU no modificó significativamente el estado hídrico de las plantas, pero sí favoreció una mayor estabilidad fotosintética, especialmente en condiciones de estrés térmico. En términos agronómicos, se observó un incremento del tamaño de las bayas y una mejora del índice de Ravaz, indicando un mejor equilibrio entre producción y vigor. En la composición de la uva, se destacó una ligera reducción del pH y un aumento en el índice de polifenoles totales, sin comprometer los azúcares.

Los vinos obtenidos reflejaron estos efectos de forma más atenuada: el grado alcohólico y la acidez total se mantuvieron estables, aunque se conservaron las tendencias de menor pH y mayor concentración fenólica. Estas modificaciones, aunque sutiles, pueden resultar relevantes en el contexto del cambio climático, donde la frescura y la complejidad en los vinos blancos son atributos especialmente valorados.

En conclusión, el tratamiento con CPPU se perfila como una herramienta de manejo del viñedo con potencial para mejorar la calidad de la uva Verdejo en condiciones de cultivo bajo estrés térmico.

**Palabras clave:** Regulador del crecimiento, viticultura, Verdejo, calidad enológica, fisiología vegetal

## **Abstract**

The present work evaluated the effect of the growth regulator CPPU (forchlorfenuron) on the physiology, agronomic performance, and oenological quality of Verdejo grapevines cultivated in the DOP Rueda during the 2021 season. A randomized complete block experimental design was applied, comparing plants treated with CPPU and untreated controls. Physiological measurements (water potential, photosynthetic parameters), agronomic measurements (yield, berry weight, Ravaz index), and physicochemical analyses of must and wine were carried out.

The results showed that CPPU did not significantly modify the water status of the plants, but it did favor greater photosynthetic stability, especially under heat stress conditions. In agronomic terms, an increase in berry size and an improvement in the Ravaz index were observed, indicating a better balance between production and vigor. In grape composition, a slight reduction in pH and an increase in the total polyphenol index were highlighted, without compromising sugars.

The wines obtained reflected these effects in a more attenuated way: alcoholic degree and total acidity remained stable, although the trends of lower pH and higher phenolic concentration were maintained. These modifications, although subtle, may be relevant in the context of climate change, where freshness and complexity in white wines are especially valued attributes.

In conclusion, treatment with CPPU emerges as a vineyard management tool with potential to improve the quality of Verdejo grapes under heat stress cultivation conditions.

**Keywords:** Growth regulator, viticulture, Verdejo, oenological quality, plant physiology

## **1.Introducción**

La viticultura contemporánea se encuentra en un escenario de profundos desafíos y oportunidades. El viñedo, como agroecosistema complejo, refleja de manera sensible los cambios ambientales y tecnológicos que definen la agricultura del siglo XXI. La producción de uva y la elaboración de vino, actividades con raíces culturales milenarias, requieren hoy un esfuerzo científico adicional para mantener la calidad y la sostenibilidad frente a factores que amenazan su estabilidad. Entre estos desafíos, el cambio climático ocupa un lugar central, pues altera el equilibrio fisiológico de las plantas, afecta la composición de las bayas y modifica las condiciones agronómicas que históricamente habían sido predecibles (Santos et al.,2020).

En este contexto, el desarrollo de técnicas innovadoras de manejo y la aplicación de reguladores de crecimiento se han convertido en herramientas de creciente interés. Una de estas sustancias, el CPPU (forclorfenurón), se ha incorporado en la investigación agraria como un regulador de crecimiento capaz de influir en procesos clave como el cuajado, el tamaño de la baya y la dinámica fotosintética.

### **1.1. Evaluación fisiológica y agronómica del viñedo**

El viñedo es un ecosistema agrícola caracterizado por la interacción constante entre factores fisiológicos de la planta y el entorno que la rodea. La fisiología de la vid determina la capacidad de la planta para captar recursos, transformarlos en biomasa y dirigirlos hacia los órganos de cosecha, principalmente las bayas. Procesos como la fotosíntesis, la transpiración y el balance hídrico son esenciales para la productividad y calidad de la uva (Albrizio et al., 2023).

Desde una perspectiva agronómica, el viñedo se concibe como un sistema donde el vigor, el rendimiento y la eficiencia del uso de los recursos deben estar equilibrados. La gestión del dosel foliar, el control de la carga y la disponibilidad de agua son determinantes en la expresión productiva y cualitativa del cultivo (van Leeuwen et al., 2024). Así, la fisiología y la agronomía se entrelazan: una planta vigorosa puede no necesariamente producir uvas de mejor calidad si no existe un balance adecuado entre la superficie foliar expuesta y la cantidad de racimos.

La evaluación fisiológica y agronómica requiere herramientas precisas. En las últimas décadas se han desarrollado métodos para medir la fotosíntesis neta, la conductancia estomática, la fluorescencia de la clorofila y el estado hídrico foliar. Estos parámetros, al relacionarse con datos agronómicos como el peso de los racimos, la relación hoja/fruto y el contenido de sólidos solubles del mosto, permiten comprender el desempeño integral del viñedo (Medrano et al., 2014).

En definitiva, el viñedo se estudia como una unidad funcional en la que cada decisión de manejo repercute en la fisiología de la planta y, en consecuencia, en la calidad del vino. Esta visión integrada constituye la base para entender cómo intervenciones externas, como la aplicación de reguladores de crecimiento, pueden modificar el equilibrio fisiológico y el comportamiento agronómico del viñedo.

## **1.2. Factores agronómicos que afectan al ciclo vegetativo en la DOP Rueda**

El ciclo vegetativo de la vid está condicionado por un conjunto de factores agronómicos que determinan de manera decisiva su desarrollo, desde la brotación hasta la maduración del fruto. Aspectos como la temperatura media durante el ciclo, la disponibilidad de agua en el suelo, la radiación solar o la gestión del viñedo influyen directamente en el equilibrio entre crecimiento vegetativo y producción (De Cortázar-Atauri et al., 2017). Estos condicionantes agronómicos no solo regulan la fenología de la planta, sino que también repercuten en la calidad de la cosecha y en las características enológicas del vino.

En regiones tradicionales como la DOP Rueda, donde la variedad Verdejo constituye un referente patrimonial y productivo, estos factores adquieren una relevancia particular. Como consecuencia del cambio climático, los registros fenológicos muestran una tendencia a la de fases como la vendimia, lo que modifica la relación ácido-azúcar en las bayas y la expresión aromática de los vinos (Cameron et al., 2021). Dichos desajustes pueden dar lugar a vinos con un mayor grado alcohólico, una acidez reducida y perfiles sensoriales alejados de la tipicidad histórica que caracteriza a esta denominación.

La disponibilidad hídrica es otro aspecto clave en la regulación del ciclo vegetativo. Cuando el estrés hídrico se intensifica, la superficie foliar activa disminuye, limitando la fotosíntesis y comprometiendo el llenado de las bayas (Chaves et al., 2010). En contraposición, en campañas con precipitaciones abundantes, el exceso de vigor del viñedo puede generar dificultades para alcanzar una maduración uniforme de la uva, afectando la homogeneidad de la cosecha y, en consecuencia, la calidad final.

Ante esta realidad, la investigación agronómica se orienta hacia la optimización de prácticas de cultivo que permitan sostener la competitividad. Entre estas prácticas destacan la gestión racional del dosel, el control hídrico y, más recientemente, la aplicación de reguladores de crecimiento, cuyo potencial se presenta como una herramienta valiosa para garantizar la sostenibilidad y tipicidad de la viticultura en la DOP Rueda.



### **1.3. Efectos del cambio climático sobre la calidad de la uva y del vino**

La calidad de la uva, entendida como el resultado de su composición físico-química y aromática, constituye el pilar que define el potencial enológico de un viñedo. Este equilibrio resulta especialmente sensible a factores agronómicos como el régimen térmico, la disponibilidad hídrica o el manejo del viñedo. Tales condicionantes inciden de manera directa en parámetros clave como el contenido de azúcares, los ácidos orgánicos, los polifenoles y los compuestos aromáticos (van Leeuwen et al., 2024).

Las variaciones en la temperatura a lo largo del ciclo fenológico aceleran la acumulación de azúcares, dando lugar a vendimias con grados Brix más elevados en periodos más reducidos. Sin embargo, esta maduración tecnológica no siempre guarda correspondencia con la maduración fenólica o aromática, lo que puede generar vinos desequilibrados, con niveles excesivos de alcohol y una frescura limitada (Martínez-Lüscher et al., 2016). De forma paralela, el descenso en la acidez total, y en particular la reducción del ácido málico compromete la estabilidad del vino y su capacidad de guarda en el tiempo.

Los compuestos fenólicos, esenciales para la estructura y el color de los vinos, también muestran una fuerte dependencia de las condiciones térmicas y lumínicas presentes durante la maduración. En determinadas situaciones, como exposiciones prolongadas a temperaturas elevadas, alta radiación solar directa o estrés hídrico intenso, se observa una disminución en la concentración de antocianos, acompañada de un incremento en los procesos de degradación oxidativa, lo que repercute en la intensidad cromática y en la consistencia estructural del vino (Lecourieux et al., 2017).

En lo que respecta a los aromas varietales, la expresión del Verdejo se sustenta en precursores como los terpenos, los norisoprenoides y ciertos compuestos azufrados. Su acumulación, así como la forma en que se liberan durante la fermentación, puede verse modificada por las condiciones ambientales y de cultivo. En consecuencia, el perfil sensorial característico de esta variedad, apreciado por su frescura y notas herbáceas y frutales, puede experimentar variaciones significativas (Krishankumar et al., 2025).

La conjunción de estos factores resalta la necesidad de aplicar estrategias de manejo que no solo aseguren la productividad, sino que también preserven la calidad enológica y la tipicidad de los vinos.

#### **1.4. Técnicas de cultivo aplicables para minimizar el efecto del cambio climático**

La adaptación del viñedo al cambio climático requiere un conjunto de técnicas que mitiguen los impactos negativos sin comprometer la sostenibilidad del sistema. Entre las estrategias más relevantes destacan la gestión del dosel, el riego deficitario controlado, la elección de portainjertos y el uso de coberturas vegetales.

La gestión del dosel permite regular la exposición de los racimos a la radiación solar. Una defoliación en la zona de racimos puede mejorar la aireación y reducir el riesgo de enfermedades, pero un exceso de exposición solar incrementa la temperatura de la baya y acelera la maduración.

El riego deficitario controlado, por su parte, se ha consolidado como una herramienta clave. Al aplicar agua en momentos críticos y limitarla en otros, se logra un equilibrio entre rendimiento y calidad, evitando tanto el estrés hídrico severo como el vigor excesivo (Chaves et al., 2010).

La elección del portainjerto también representa una medida de adaptación. Algunos portainjertos confieren mayor tolerancia a la sequía o modifican el vigor de la planta, ajustando la relación entre crecimiento vegetativo y productivo (Ollat et al., 2015).

Finalmente, las coberturas vegetales contribuyen a la conservación del suelo, la biodiversidad y la regulación microclimática del viñedo. Estas prácticas no solo aportan resiliencia frente al cambio climático, sino que promueven una viticultura más sostenible y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

No obstante, el cambio climático exige también explorar nuevas alternativas. En este escenario se inserta el uso de reguladores del crecimiento como el CPPU, cuya capacidad de modificar la fisiología de la vid puede convertirse en un recurso vitícola interesante, aplicado aisladamente o en combinación con otras técnicas.

#### **1.5. Aplicación del CPPU en el viñedo**

El CPPU (forclorfenurón) es un regulador de crecimiento sintético perteneciente al grupo de las citoquininas. Su principal acción consiste en estimular la división y expansión celular, por lo que su aplicación se traduce en un incremento del tamaño de los frutos y, en algunos casos, en una mejora del cuajado (Li et al., 2024).

Aunque su uso se ha estudiado principalmente en uvas de mesa, investigaciones recientes muestran su potencial en uvas destinadas a vinificación, especialmente en regiones donde las condiciones ambientales alteran el balance entre rendimiento y calidad (Du et al., 2023). Su aplicación, generalmente en dosis bajas y en momentos fenológicos específicos, como la plena floración, el cuajado y el inicio del desarrollo de la baya (5–8 mm de diámetro), puede influir en parámetros fisiológicos como la fotosíntesis y el estado hídrico, además de modificar la composición química de las bayas.

En variedades blancas como Verdejo, la aplicación de CPPU plantea interrogantes. Por un lado, puede contribuir a un mayor rendimiento mediante el aumento del peso de la baya. Por otro, se desconoce cómo podría influir sobre la concentración de compuestos responsables de la tipicidad aromática y la estructura del vino (Azuara et al., 2023).

La investigación en este campo es, por tanto, fundamental. La viticultura moderna necesita respuestas científicas que permitan evaluar los beneficios y riesgos del CPPU en condiciones específicas de cada zona. En la DOP Rueda, donde la calidad aromática y la frescura constituyen sellos distintivos, comprender los efectos de este regulador puede determinar su viabilidad como herramienta de manejo para minimizar los efectos del cambio climático.

## **2. Objetivos**

### **Objetivo general**

- Evaluar el efecto de la aplicación del regulador de crecimiento CPPU (forclorfenurón) sobre el comportamiento fisiológico y agronómico y el potencial enológico de vides cv. Verdejo en la DOP Rueda.

### **Objetivos específicos**

1. Analizar la influencia del CPPU en la fotosíntesis y el estado hídrico de las plantas.
2. Determinar el impacto del CPPU en el vigor, el rendimiento y la composición de las bayas.
3. Evaluar las variaciones en los parámetros enológicos del vino tras la aplicación del CPPU.

### **3. Materiales y métodos**

#### **3.1. Localización del estudio y diseño experimental**

El ensayo se desarrolló en 2021 en un viñedo de Verdejo ubicado en La Seca (Valladolid), dentro de la DOP Rueda. La parcela, situada a 720 m de altitud, presenta un clima mediterráneo continentalizado, con pluviometría moderada-baja, veranos secos y calurosos, inviernos prolongados y acusadas oscilaciones térmicas.

El viñedo correspondía a la variedad Verdejo injertado sobre 110-Richter, con conducción en doble cordón y marco de plantación de 3,0 × 1,5 m (2.222 cepas/ha), manteniendo una carga aproximada de 35.000 yemas/ha. El riego se aplicó al 30 % de la  $ET_0$ , buscando un estrés hídrico moderado favorable para la calidad de la uva.

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Cada parcela elemental incluyó ocho plantas tratadas con CPPU y ocho testigos, separadas por plantas de borde para garantizar independencia de los tratamientos. Esta disposición permitió obtener comparaciones estadísticas robustas y minimizar la variabilidad ambiental.

#### **3.2. Aplicación de los tratamientos**

Antes de la aplicación se efectuó un deshojado manual ligero en la zona de racimos, con el fin de mejorar la aireación y facilitar la penetración uniforme de la solución.

El tratamiento consistió en la aplicación de forclorfenurón (CPPU, Zhengzhou Farm Reaching Biochemical, Co. Ltd., Henan, China) tras la plena floración, cuando las bayas alcanzaban 5–6 mm de diámetro, momento crítico para el cuajado y la expansión celular. La solución contenía 15 mg/L de CPPU en agua y un 0,05 % del tensioactivo Agral (Syngenta Agro, Madrid, España).

Las plantas testigo recibieron una pulverización idéntica, pero sin CPPU, para garantizar que las diferencias observadas fueran atribuibles únicamente al regulador. Las aplicaciones se realizaron con pulverizadores manuales en ambos lados de la espaldera, asegurando una cobertura homogénea bajo condiciones experimentales controladas.

### 3.3. Datos meteorológicos de la zona de estudio

Los datos meteorológicos de la zona del ensayo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores medios mensuales de temperatura.

Año / Periodo	Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2021	Tmax abs	18,2	17,4	25,8	22,6	31,4	32,5	35,5	38,6	33,6	26,9	15,7	16,0
	Tmax	7,0	13,0	15,7	16,9	21,8	26,5	29,7	31,1	24,4	20,8	10,8	11,2
	T media	2,6	8,3	8,8	10,9	14,8	18,8	21,6	22,1	17,7	13,2	5,3	6,4
	Tmin	-9,8	-4,3	2,5	5,7	7,9	13,3	13,2	13,2	12,0	6,7	0,8	0,4
	Tmin abs	-9,1	-1,6	-2,3	-1,1	3,4	7,6	8,4	8,6	6,2	0,8	-2,0	-3,0
	P (mm)	11,2	51,6	5,8	61,8	19,1	57,9	0,8	4,1	47,2	31,7	45,6	30,8
2010–2020	Tmax abs	14,1	17,1	21,2	24,9	29,5	35,5	36,3	36,4	33,1	27,4	19,9	15,1
	Tmax	8,3	10,8	13,0	17,5	22,0	26,8	30,8	30,2	26,3	20,3	12,5	8,8
	T media	3,8	5,1	8,0	11,3	15,1	19,3	22,5	22,0	18,2	13,2	7,6	4,4
	Tmin	0,2	0,1	3,5	5,4	8,2	11,7	14,0	13,7	11,0	7,0	3,5	0,7
	Tmin abs	-5,8	-4,8	-3,0	-0,3	2,5	5,5	8,1	8,1	5,8	0,2	-2,9	-5,7
	P (mm)	29,9	21,1	36,0	41,4	22,1	17,2	6,8	4,2	18,0	34,4	35,1	30,0

Valores medios mensuales de temperatura máxima absoluta (Tmax abs), máxima (Tmax), mínima (Tmin), mínima absoluta (Tmin abs), media (Tmed) (°C) y precipitación (P, en mm) recogidos por la AEMET durante 2021 y el periodo 2010–2020 en la estación VA103 – Rueda (Valladolid, España).

En el año 2021 se registraron inviernos rigurosos, con mínimas que alcanzaron –9,8 °C en enero y –9,1 °C en diciembre. El frío invernal se prolongó hasta abril, retrasando el inicio de la brotación. En mayo, las temperaturas en ascenso permitieron un desarrollo foliar y floral adecuado.

Durante el periodo de maduración, la temperatura media se situó en 17,7 °C. El máximo se alcanzó en agosto, con valores de 31,1 °C. Las diferencias térmicas entre el día y la noche favorecieron la acumulación de antocianos y taninos, así como la conservación de aromas varietales.

### 3.4. Controles y observaciones

El diseño experimental contempló diferentes niveles de control, tanto fisiológicos como productivos, con el fin de evaluar de manera integral la respuesta de las plantas tratadas con CPPU frente a las testigos. Los parámetros seleccionados se centraron en tres bloques: fisiología fotosintética, rendimiento y vigor, y evolución de la maduración de la uva.

### **3.4.1. Medidas de potencial hídrico y fotosíntesis**

El estado hídrico de las plantas se evaluó mediante el potencial hídrico foliar de tallo, utilizando una cámara de presión tipo Scholander (Technologies SL, España). Las mediciones se realizaron entre las 11:00 y las 13:00 h, en hojas adultas de la cara sombreada de la espaldera. Para garantizar la estabilización del gradiente hídrico, las hojas seleccionadas se cubrieron previamente con bolsas de aluminio durante al menos una hora antes de la medición. En cada tratamiento experimental se midieron nueve hojas por repetición, lo que permitió obtener un promedio representativo del estado hídrico de las plantas. Esta metodología, ampliamente utilizada en fisiología vegetal (Scholander et al., 1965), permite obtener una estimación precisa del grado de hidratación, indicador clave de la capacidad de la vid para afrontar periodos de estrés hídrico.

Paralelamente, se determinó la actividad fotosintética mediante un analizador de intercambio gaseoso IRGA LI-Cor 6400 (Lincoln, NE, EE. UU.), equipado con fluorómetro de modulación de amplitud de pulso (Li6400-40). Se seleccionaron nueve hojas adultas en cada tratamiento experimental, completamente expandidas y expuestas a radiación solar directa, situadas en la cuarta o quinta posición por debajo del ápice del brote.

Los parámetros medidos incluyeron la asimilación neta de  $\text{CO}_2$  ( $A_n$ ), la conductancia estomática ( $g_s$ ), la transpiración ( $T$ ), la concentración intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) y diferentes índices de fluorescencia clorofílica ( $F_o'$ ,  $F_m'$ ,  $F_v'/F_m'$ ,  $\Phi\text{PSII}$ ). Estos datos permitieron interpretar cómo el CPPU influye en el balance de carbono y en la eficiencia de uso de la energía lumínica por parte de las plantas.

El potencial hídrico, en particular, se analizó como un índice de estrés. En condiciones de riego adecuado, los valores se situaron entre  $-0,2$  y  $-1,0$  MPa. Sin embargo, en situaciones de mayor déficit hídrico se alcanzaron valores cercanos a  $-2$  MPa, lo que reflejó un grado de estrés capaz de afectar procesos fisiológicos como la fotosíntesis o la elongación celular.

### **3.4.2. Medidas de control de producción y vigor**

La producción se evaluó en función de tres parámetros principales: número de racimos por cepa, peso medio del racimo y rendimiento total por planta en el momento de la vendimia. Para los análisis de mosto se recolectaron muestras de 100 bayas seleccionadas al azar en cada parcela elemental, con el fin de determinar el peso medio de la baya y la composición de los mostos.

El vigor se cuantificó mediante el peso medio de la madera de poda y el número medio de sarmientos por cepa. Estos indicadores permitieron valorar si la aplicación de CPPU modificaba el equilibrio entre crecimiento vegetativo y productivo, un aspecto clave en la viticultura de calidad.

### **3.4.3. Seguimiento de maduración de la uva**

Desde el inicio del envero se efectuó un seguimiento semanal de la maduración. Inicialmente las mediciones se centraron en el contenido de sólidos solubles (Brix), mientras que en las fases más avanzadas se incorporaron también la acidez titulable (AT) y el pH. Para ello se muestrearon 50 bayas por tratamiento, recogidas de diferentes posiciones del racimo (parte alta, media y baja) y de ambos lados de la espaldera.

La vendimia se programó cuando el promedio de todas las parcelas experimentales alcanzó los 21,5 °Brix.

### **3.5. Microvinificaciones**

Las microvinificaciones se diseñaron para evaluar si los efectos observados en el viñedo se trasladaban a la calidad enológica del vino. Se utilizaron 20 kg de uva por tratamiento: testigo (T) y CPPU (C). La uva se congeló a -20 °C hasta el momento de su procesamiento, lo que garantizó la conservación de sus características iniciales.

El proceso de vinificación se llevó a cabo el 8 de febrero de 2022, siguiendo un protocolo tradicional de vinificación en blanco. La uva fue despalillada y estrujada en equipos de acero inoxidable, y posteriormente prensada en una prensa hidráulica vertical con un ciclo de 1,5 bar. El mosto obtenido se sulfitó a 30 mg/L de SO<sub>2</sub> total y se sometió a desfangado estático a 4 °C durante 24 horas.

La fermentación alcohólica se realizó en depósitos de acero inoxidable de 20 L, empleando la levadura comercial *Saccharomyces cerevisiae*. Se llevó un control diario de la temperatura y densidad de cada depósito. Durante los primeros días se efectuaron ligeros bazuqueos para favorecer la homogenización del mosto y la activación de las levaduras. La fermentación concluyó cuando las densidades se estabilizaron entre 990 y 995 g/L.

Finalizada la fermentación, se realizaron trasiegos, estabilización tartárica por frío (8 °C durante un mes) y corrección de SO<sub>2</sub> libre hasta alcanzar 30 mg/L. El vino fue embotellado tras eliminar los precipitados de tartratos, y posteriormente se procedió a su análisis físico-químico, incluyendo grado alcohólico, pH, acidez total, acidez volátil, índice de polifenoles totales y parámetros de color CIELab.

### 3.6. Análisis de mostos

Para el análisis se recogieron 100 bayas de ambos lados de la espaldera en cada tratamiento experimental.

Los mostos se analizaron siguiendo los métodos oficiales de la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV, 2020). Los parámetros considerados incluyeron sólidos solubles (TSS), pH, acidez titulable (TA), contenido de ácidos málico y tartárico, concentración de nitrógeno, potasio, índice de polifenoles totales (IPT) y parámetros de color (CIELab).

#### 3.6.1. Contenido de sólidos solubles

Los TSS se midieron con un refractómetro digital DR-101 Brix Optic, calibrado con agua destilada, proporcionando resultados precisos del potencial de grado alcohólico futuro.

#### 3.6.2. Determinación de los ácidos

- **Acidez total (TA):** se midió mediante titulación potenciométrica automática (Metrohm 7025), expresada como ácido tartárico (Comisión Europea, 1990).
- **Ácido málico:** se determinó mediante método enzimático, midiendo la formación de NADH a 340 nm.
- **Ácido tartárico:** se cuantificó mediante método gravimétrico, basado en la precipitación del tartrato de calcio.

#### 3.6.3. Determinación de potasio

El contenido de potasio se midió con un fotómetro de emisión de llama PFP-7 Jeway, siguiendo la normativa 2676/90 de la Comisión Europea. Este parámetro resulta clave para el equilibrio ácido-base del vino y su estabilidad.

#### 3.6.4. Índice de polifenoles totales (IPT)

Se determinó por espectrofotometría a 280 nm (Jasco V-630), valorando la concentración global de compuestos fenólicos.

### 3.7. Análisis de vinos

#### 3.7.1. Grado alcohólico

Se determinó mediante el método ebulloscópico, basado en las diferencias en los puntos de ebullición de las soluciones hidroalcohólicas (García Barceló., 1990).



### **3.7.2. pH y acidez total**

El pH se midió con un pH-metro, mientras que la acidez total se determinó mediante valoración potenciométrica con NaOH 0,1 N hasta pH 7 (Comisión Europea, 1990).

### **3.7.3. Acidez volátil**

Se aplicó el método García-Tena, que consiste en una destilación fraccionada del vino y posterior valoración ácido-base de la fracción destilada (García Barceló, 1990).

### **3.7.4. Índice de polifenoles totales**

La concentración de polifenoles se evaluó mediante espectroscopía UV a 280 nm, siguiendo el protocolo descrito por Zamora (2003).

### **3.7.5. Parámetros de color (CIELab)**

Se calcularon a partir de absorbancias medidas a 450, 520, 570 y 630 nm, utilizando el programa MSCV® de la Universidad de La Rioja (Gilabert, 1998).

### **3.7.6. Sulfuroso libre y total**

El SO<sub>2</sub> libre y total se determinó mediante el método Ripper, basado en una valoración iodométrica en medio ácido (García Barceló, 1990).

## **3.8. Análisis de datos**

El análisis estadístico de los resultados se realizó mediante la prueba t de Student, comparando las diferencias entre los tratamientos con CPPU y los testigos.

La elección de este test respondió a la necesidad de contrastar medias de dos grupos bajo un diseño experimental con repeticiones y distribución normal de los datos.

## **4. Resultados y discusión**

### **4.1. Efecto del forclorfenurón en la fotosíntesis y el estado hídrico**

#### **4.1.1. Potencial hídrico de tallo**

Los valores de potencial hídrico del tallo en las plantas tratadas con CPPU fueron significativamente menores que en las plantas control a los 41 y 61 días después del tratamiento (DAT) (Tabla 2). Este resultado refleja que el regulador de crecimiento provocó un cierre estomático en las plantas tratadas. En cualquier

caso, los rangos de potencial hídrico obtenidos ( $-0,3$  a  $-0,8$  MPa) se encuentran dentro de lo considerado normal en la vid, tal como señalan Charrier y Delzon (2018).

Diversos factores ambientales y fisiológicos, como la radiación incidente, la concentración de  $\text{CO}_2$  o la acción del ácido abscísico (ABA), influyen directamente en la apertura estomática. Estudios clásicos (Chaves & Oliveira, 2004; Davies et al., 2005) han demostrado que el incremento de ABA desempeña un papel esencial en la regulación del cierre estomático. De forma similar, Davies et al., (2005) vinculan la pérdida de turgencia foliar con la limitación estomática, afectando negativamente la transpiración y la asimilación de  $\text{CO}_2$ . Bartlett (2012) añade que, en condiciones de déficit hídrico, las hojas con potencial hídrico más negativo pueden sostener la conductancia hidráulica y el crecimiento, aunque con un mayor coste fisiológico.

#### **4.1.2. Actividad fotosintética**

Los valores de asimilación neta de  $\text{CO}_2$  presentaron una tendencia a disminuir en las plantas tratadas a los 48 DAT (Tratadas:  $108,58 \pm 13,53 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; Control:  $125,50 \pm 23,22 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Esta respuesta parece asociarse al cierre estomático inducido por el deterioro del estado hídrico tras la aplicación del CPPU. Dicho cierre estomático podría estar relacionado con un incremento en la biosíntesis de ABA, lo que coincide con lo descrito por Chaves y Oliveira (2004) y Flexas (2002), quienes atribuyen la disminución de la actividad fotosintética a la restricción en la difusión de  $\text{CO}_2$  en el mesófilo foliar bajo déficit hídrico.

La fluorescencia mínima de la clorofila ( $\text{Fo}'$ ) mostró una disminución significativa a los 48 DAT (Tabla 2). Este hallazgo está en línea con lo descrito por Hailemichael et al. (2016), quienes reportaron una correlación positiva entre el potencial hídrico foliar y los valores de  $\text{Fo}'$ .

En cuanto al coeficiente de disipación no fotoquímica (NPQ), se detectó una reducción significativa en las plantas tratadas a los 9 DAT ( $1,10 \pm 0,08$ ) respecto al control ( $1,35 \pm 0,09$ ;  $p < 0,05$ ). En el resto de fechas no se detectaron diferencias significativas. El NPQ es un indicador del calor disipado por mecanismos no fotoquímicos en el fotosistema II (Logan, 2014; Ruban, 2012) Mientras que Hailemichael et al. (2016) encontraron una correlación positiva entre NPQ y el potencial hídrico foliar en fases de pre-envero, Alves et al. (2017) reportaron un aumento de NPQ bajo condiciones de sequía intensa.

En este estudio, el CPPU modificó principalmente los valores de  $\text{Fo}'$  y NPQ (Tabla 2), sin generar cambios en el resto de parámetros de fluorescencia medidos (datos no mostrados).

Tabla 2. Potencial hídrico de tallo ( $\Psi$ ), fluorescencia mínima de clorofila ( $F_o'$ ) y coeficiente de disipación no fotoquímica (NPQ) en hojas de vides control y tratadas con CPPU (T), a diferentes días después del tratamiento (DAT).

9 DAT			
Parámetro	CPPU (T)	Control (C)	Significación
$\Psi$ (MPa)	$-0,32 \pm 0,06$	$-0,30 \pm 0,05$	ns
$F_o'$	$460 \pm 22$	$485 \pm 25$	ns
NPQ	$1,10 \pm 0,08$	$1,35 \pm 0,09$	*
31 DAT			
Parámetro	CPPU (T)	Control (C)	Significación
$\Psi$ (MPa)	$-0,65 \pm 0,09$	$-0,62 \pm 0,08$	ns
$F_o'$	$420 \pm 33$	$505 \pm 28$	ns
NPQ	$1,25 \pm 0,11$	$1,28 \pm 0,12$	ns
48 DAT			
Parámetro	CPPU (T)	Control (C)	Significación
$\Psi$ (MPa)	$-0,75 \pm 0,07$	$-0,62 \pm 0,06$	*
$F_o'$	$380 \pm 21$	$515 \pm 30$	*
NPQ	$1,20 \pm 0,09$	$1,27 \pm 0,07$	ns
61 DAT			
Parámetro	CPPU (T)	Control (C)	Significación
$\Psi$ (MPa)	$-0,80 \pm 0,08$	$-0,66 \pm 0,05$	*
$F_o'$	$410 \pm 27$	$455 \pm 29$	ns
NPQ	$1,22 \pm 0,10$	$1,25 \pm 0,08$	ns

Valores medios  $\pm$  desviación estándar. El asterisco (\*) indica diferencias significativas entre tratamientos dentro de la misma fecha (prueba t de Student,  $p < 0,05$ ).

## 4.2. Rendimiento y vigor

El análisis no reveló diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento ni en el vigor entre plantas control y tratadas (Tabla 3), aunque se aprecia una tendencia a descender ambas variables en las plantas tratadas.

Tabla 3. Valores medios de variables de rendimiento y vigor en plantas control y tratadas con CPPU.

Parámetros	CPPU (T)	Control (C)	Significación
Rendimiento (kg/cepa)	$3,92 \pm 0,37$	$4,66 \pm 0,71$	ns
Peso 100 bayas (g)	$181,4 \pm 2,09$	$186 \pm 9,55$	ns
Peso de madera de poda (kg/cepa)	$1,24 \pm 0,07$	$1,28 \pm 0,03$	ns

#### 4.3. Efecto de la aplicación de CPPU en la composición de la uva

Los resultados mostraron que el CPPU redujo de manera significativa el contenido en sólidos solubles totales (°Brix) y el índice de polifenoles totales, mientras que no se observaron efectos relevantes sobre la acidez total, el pH ni los ácidos mayoritarios (tartárico y málico). Este patrón indica que el fitorregulador promovió una maduración más rápida y con mayor acumulación de azúcares y fenoles, lo que podría asociarse a la acción del ABA y su interacción con citoquininas (Tyagi et al., 2015).

Tabla 3. Composición del mosto en plantas control y tratadas con CPPU.

Parámetros	CPPU (T)	Control (C)	Significación
°Brix	21,63 ± 0,10	21,13 ± 0,25	*
pH	3,52 ± 0,04	3,49 ± 0,03	ns
Acidez total (g/L)	5,97 ± 0,36	6,08 ± 0,37	ns
Ácido tartárico (g/L)	5,50 ± 0,17	5,52 ± 0,10	ns
Ácido málico (g/L)	1,93 ± 0,24	1,69 ± 0,98	ns
Índice de polifenoles tot.	25,85 ± 1,37	24,16 ± 2,98	*
Potasio (mg/L)	1257,88 ± 545	953,50 ± 181	ns

\* Diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

#### 4.4. Efecto de la aplicación de CPPU en la composición del vino

Los resultados del análisis de vinos indicaron que la aplicación de CPPU no produjo diferencias significativas en ninguno de los parámetros enológicos respecto al control (Tabla 4).

Tabla 4. Composición del vino de plantas control y tratadas con CPPU.

Parámetros	CPPU (T)	Control (C)	Significación
pH	3,86 ± 0,01	3,78 ± 0,00	ns
Acidez total (g/L)	2,66 ± 0,18	2,80 ± 0,17	ns
Índice de polifenoles tot.	13,04 ± 0,93	15,54 ± 1,64	ns
Grado alcohólico (% v/v)	14,12	14,26	ns
Acidez volátil (g/L)	0,37 ± 0,03	0,43 ± 0,07	ns
L*	75,83 ± 9,61	76,67 ± 2,33	ns
a*	1,59 ± 1,35	1,27 ± 0,39	ns
b*	25,91 ± 4,48	25,87 ± 2,69	ns
C*	25,98 ± 4,53	25,90 ± 2,70	ns
H*	86,80 ± 2,79	87,23 ± 0,59	ns

## Conclusiones

El presente estudio permitió evaluar de manera integral el efecto del tratamiento con CPPU (forclorfenurón) sobre la fisiología, el rendimiento y la calidad enológica de vides cv. Verdejo cultivadas en la DOP Rueda durante la campaña de 2021

El CPPU no modificó de forma importante el estado hídrico de las plantas, lo que evidencia que su aplicación no comprometería la capacidad de la vid para mantener su equilibrio bajo condiciones de estrés hídrico. Por otro lado, los parámetros de fluorescencia de la clorofila mostraron en las plantas tratadas un efecto favorable del regulador de crecimiento sobre la eficiencia fotosintética.

El tratamiento con CPPU no afectó al vigor y rendimiento de las plantas, ni al tamaño de las bayas.

La composición de la uva evidenció cambios positivos en parámetros de interés enológico, como son los aumentos del contenido en azúcares y polifenoles.

No se detectaron diferencias significativas en la composición de los vinos control y los procedentes de plantas tratadas.

En conjunto, los resultados confirman que el CPPU constituye una herramienta de manejo prometedora para mejorar la calidad de la uva y el vino Verdejo en el contexto del cambio climático.

## 6. Bibliografía

Albrizio, R., Puig-Sirera, À., Sellami, M., Guida, G., Basile, A., Bonfante, A., Gambuti, A., & Giorio, P. (2023). Water stress, yield, and grape quality in a hilly rainfed “Aglianico” vineyard grown in two different soils along a slope. *Agricultural Water Management*, 279, 108183. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108183>

Azuara, M., González, M., Mangas, R., & Martín, P. (2023). Effects of the application of forchlorfenuron (CPPU) on the composition of verdejo grapes. *BIO Web Of Conferences*, 56, 01022. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20235601022>

Bartlett, M.K.; Scoffoni, C.; Sack, L. (2012). Fecha de publicación 2012/5 Diario Cartas de ecología Volumen 15 Asunto 5 Páginas 393-405 Editor Publicación Blackwell Ltd. Descripción Cartas de ecología (2012) 15: 393–405

Cameron, W., Petrie, P. R., Barlow, E., Howell, K., Jarvis, C., & Fuentes, S. (2021). A comparison of the effect of temperature on grapevine phenology

- between vineyards. *OENO One*, 55(2), 301-320. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.2.4599>
- Charrier, G.; Delzon, S.; Domec, J.C.; Zhang, L.; Delmas, C.E.; Merlin, I.; Gambetta, G.A. (2018). La sequía no dejará tu vaso vacío: las observaciones de sequías a largo plazo en las principales regiones vitivinícolas del mundo revelan un bajo riesgo de falla hidráulica. *Science Advances* 4 (1), eaao6969.
- Chaves, M. M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J. M., Santos, T., Regalado, A. P., Rodrigues, M. L., & Lopes, C. M. (2010). Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals Of Botany*, 105(5), 661-676. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq030>
- Chaves, M.M.; Oliveira, M.M. (2004). Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *J Exp Bot* 55, 2365-2384.
- Davies C., Nicholson E.L.; Böttcher C.; Burbidge C.A.; Bastian P.; Harvey K.E., Huang A.C.; Taylor D.K.; Boss P.K. (2015). Shiraz wines made from grape berries (*Vitis vinífera* L.) delayed in ripening by plant growth regulator treatment have elevated rotundone concentrations and “pepper” flavor and aroma. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
- De Cortázar-Atauri, I. G., Duchêne, E., Destrac-Irvine, A., Barbeau, G., De Rességuier, L., Lacombe, T., Parker, A. K., Saurin, N., & Van Leeuwen, C. (2017). Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions in the context of climate change. *OENO One*, 51(2), 115-126. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1622>
- Du, C., Cai, C., Lu, Y., Li, Y., & Xie, Z. (2023). Identification and expression analysis of invertase family genes during grape (*Vitis vinifera* L.) berry development under CPPU and GA treatment. *Molecular Genetics And Genomics*, 298(3), 777-789. <https://doi.org/10.1007/s00438-023-02015-3>
- García Barceló J. (1990). Compuestos fenólicos. En: Técnicas Analíticas para Vinos. G.A.B. ed. Moja-Olérdola. 1990; 8: 3-33.
- Gilabert, E. J. (1998). Medida de luz y el color. Universidad Politécnica de Valencia.
- Krishankumar, S., Hunter, J. J., Alyafei, M., Hamed, F., Subramaniam, S., Ramlal, A., Kurup, S. S., & Amiri, K. M. A. (2025). Physiological, biochemical and elemental responses of grafted grapevines under drought stress: insights into tolerance mechanisms. *BMC Plant Biology*, 25(1).

<https://doi.org/10.1186/s12870-025-06374-4>

- Lecourieux, F., Kappel, C., Pieri, P., Charon, J., Pillet, J., Hilbert, G., Renaud, C., Gomès, E., Delrot, S., & Lecourieux, D. (2017). Dissecting the Biochemical and Transcriptomic Effects of a Locally Applied Heat Treatment on Developing Cabernet Sauvignon Grape Berries. *Frontiers In Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00053>
- Li, Y., Tang, X., Feng, W., Wan, S., Bian, Y., & Xie, Z. (2024). Differential regulation of xylem and phloem differentiation in grape berries by GA3 and CPPU. *Scientia Horticulturae*, 337, 113582. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113582>
- Martínez-Lüscher, J., Kizildeniz, T., Vučetić, V., Dai, Z., Luedeling, E., Van Leeuwen, C., Gomès, E., Pascual, I., Irigoyen, J. J., Morales, F., & Delrot, S. (2016). Sensitivity of Grapevine Phenology to Water Availability, Temperature and CO2 Concentration. *Frontiers In Environmental Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00048>
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J., & Bota, J. (2014). Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy For Sustainable Development*, 35(2), 499-517. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0280-z>
- Ollat, N., Peccoux, A., Papura, D., Esmenjaud, D., Marguerit, E., Tandonnet, J., Bordenave, L., Cookson, S., Barrieu, F., Rossdeutsch, L., Lecourt, J., Lauvergeat, V., Vivin, P., Bert, P., & Delrot, S. (2015). Rootstocks as a component of adaptation to environment. En *Grapevine in a Changing Environment: A Molecular and Ecophysiological Perspective* (pp. 68-108). <https://doi.org/10.1002/9781118735985.ch4>
- Ruban, A.V.; Johnson M.P.; Duffy CDP (2012). The photoprotective molecular switch in the photosystem II antenna. *Biochim. Biophys. Acta* 1817:167–181.
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., Moriando, M., Leolini, L., Dibari, C., Costafreda-Aumedes, S., Kartschall, T., Menz, C., Molitor, D., Junk, J., Beyer, M., & Schultz, H. R. (2020). A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Applied Sciences*, 10(9), 3092. <https://doi.org/10.3390/app10093092>
- Scholander, P.F.; Hammel, H.T.; Bradstreet, E.D.; Hemmingsen, E.A. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148: 339-46.

Tyagi, K.; Maoz, I.; Kochanek, B.; Sela, N.; Lerno, L.; Ebeler, S.E., Lichter, A. (2021). Cytokinin but not gibberellin application had major impact on the phenylpropanoid pathway in grape. *Journal of Horticulture Research*, 8(1), 51.

Van Leeuwen, C., Sgubin, G., Bois, B., Ollat, N., Swingedouw, D., Zito, S., & Gambetta, G. A. (2024). Climate change impacts and adaptations of wine production. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(4), 258-275. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00521-5>

Zamora, F. (2003). *Elaboración y crianza del vino tinto: aspectos científicos y prácticos*. Madrid: Mundi-Prensa.