

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS



**ESTUDIO DE LOS EFECTOS EN EL VIÑEDO DE LA
MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN
LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO
(cv. CABERNET SAUVIGNON; *Vitis vinifera* L.)**

TESIS DOCTORAL

**SARA SÁNCHEZ-ÉLEZ MARTÍN
INGENIERA AGRÓNOMO**

MADRID 2015

**DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL: FITOTECNIA.
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS
(UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID)**

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS EN EL VIÑEDO DE LA
MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN
LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO
(cv. CABERNET SAUVIGNON; *Vitis vinifera* L.)**

TESIS DOCTORAL

AUTOR:

SARA SÁNCHEZ-ÉLEZ MARTÍN

Ingeniera Agrónomo

DIRECTOR:

JOSÉ RAMÓN LISSARRAGUE GARCÍA-GUTIÉRREZ

Doctor Ingeniero Agrónomo

MADRID 2015

A Luity y a Yago.

AGRADECIMIENTOS.

El presente trabajo ha sido realizado gracias al Programa de Financiación CENIT, Programa Ingenio 2010, enmarcada dentro del Proyecto “Estrategias y métodos vitícolas y enológicos frente al cambio climático. Aplicación de nuevas tecnologías que mejoren la eficiencia de los procesos resultantes”. Financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), perteneciente al Ministerio de Economía y Competitividad. Esta convocatoria ha permitido que realizase mi formación en la investigación y que desarrollase la presente Tesis Doctoral a través del Grupo de Investigación en Viticultura perteneciente al Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Parte de este trabajo se ha realizado en Bodegas Licinia, que participaba dentro del proyecto CENIT como empresa privada. Me gustaría agradecerle su disposición de medios y ayuda ofrecida.

Ha sido un largo viaje el que emprendí hace cuatro años cuando José Ramón me propuso realizar este trabajo de Tesis Doctoral. He recorrido un camino cambiante en todo momento, a veces ha sido un camino sinuoso y con obstáculos, otras veces ha sido un camino amplio y muy liviano, incluso en alguna ocasión llegué a perderlo. Pero no lo he recorrido sola, sino que he estado acompañada por todos vosotros que me habéis aguantado, escuchado, y me habéis dado fuerza a lo largo del camino. Y por todo lo bueno que me ha supuesto, me gustaría daros las gracias a todos vosotros que habéis formado parte de este especial viaje.

Quiero agradecer a José Ramón Lissarrague la oportunidad que me brindó para la realización de este trabajo, gracias por tus ideas y tus consejos, por tus enseñanzas y tu generosidad. Por tu entusiasmo y tu pasión por la viticultura. Muchas gracias José Ramón.

Gracias a Pilar Baeza por el apoyo incondicional que me ha dado siempre, por escucharme en la lejanía cuando estaba en Argentina, por enseñarme cada día más y más cosas de la viticultura. Gracias Pilar por tu entusiasmo, fuerza y ganas de hacer bien las cosas.

Quiero agradecer a todos aquellos que han estado al pie del cañón, que han sudado la gota gorda midiendo LAI o potencial o muestreando bayas,... que sin su ayuda y apoyo no hubiera sido posible realizar este trabajo. Gracias a Lucía por haberme acompañado todos estos años, gracias a Edu por preocuparte, por estar ahí

siempre, gracias a Cristina por su sonrisa mañanera y no perder la calma en Roda cuando no funcionaba el IRGA, gracias a Emilio por su perseverancia y ser un incondicional en las calicatas hiciese frío o calor, gracias a Rosa por su experiencia y no faltar a ningún pre-dawn. Gracias a Carol, Rocio y Loreto, por los momentos compartidos. Gracias a Sabina, Mery, Alejandro, Teresa, Miguel, Cristina Rejón, Ester por su ayuda y frescura. Muchas gracias chicos.

Gracias a Patri, Rubén, Mario, Pedro y Laura por compartir los primeros años de mi aventura, por acogerme e iniciarme en el mundo de la viticultura y por vuestro cariño y experiencia.

Gracias Elisa por tu apoyo incondicional, por querer que las cosas salgan bien, por seguirme a esta locura sin protestar, por tu sensatez, por tu visión de pequeño genio y sobretodo muchas gracias por estar ahí.

Gracias a Jota, Silvia y Olga por vuestra generosidad, por la ayuda y el cariño que me habéis dado.

Gracias también al gran equipo de profesionales y a la gran familia que me acogió en Argentina. Gracias a Pata por enseñarme y transmitirme su pasión por la viticultura y el trabajo bien hecho, gracias a Jorge, a Silvina, a Eugenia, a Maia y a Conrado por vuestro apoyo, y por enseñarme a ver el trabajo desde otro punto de vista.

Y finalmente gracias a mi familia. A mis padres por su esfuerzo y apoyo incondicional. A mis hermanos por quererme y estar siempre a mi lado. A Raquel y a Julio por su cariño. A Laura, Celia, Julia y como no a mi pequeñajo Jose.

Gracias Luity por aparecer, por tu amor, por tu comprensión, por tu paciencia, por escucharme, por aguantar dos partos este y el de mi queridísimo Yago. Muchas gracias por acompañarme en esta aventura y por ayudarme a finalizarla.

Y sobre todo gracias a ti YAGO.

RESUMEN:

En regiones semiáridas, con veranos cálidos, evapotranspiraciones elevadas, humedades relativas bajas, además de precipitaciones intermitentes y escasas (400 mm al año) que reducen la recarga del perfil en invierno, se puede ver afectada la productividad y sostenibilidad de los viñedos. Por eso en estas zonas puede ser necesario utilizar el riego suplementario para mantener la calidad y aumentar la productividad.

En este marco de circunstancias es en el que se desarrolla la mayoría de la viticultura española, y en concreto en la zona centro donde se realizó el estudio. Con este trabajo se pretende estudiar la influencia del agua del riego, con distintas dosis y aplicada en diferentes fases de crecimiento y maduración de la baya, en la producción y calidad de la uva.

Se estudió la influencia del déficit moderado continuo aplicado antes y después de envero, en el aprovechamiento de los recursos ambientales y en la respuesta del cv. Cabernet Sauvignon.

El ensayo se desarrolló en 2010 y 2011 en la finca “La Alcoholera”, perteneciente a bodegas LICINIA S.L., ubicada en la localidad de Chinchón, Comunidad de Madrid, España. Durante 2010 y 2011 se realizaron estudios en cepas del cv. Cabernet Sauvignon (clon 15), injertadas sobre 41B y plantadas en 2005. Con poda corta en Cordón Royat unilateral de 80 cm de altura, y cuya vegetación alcanzó una altura de 97 cm. Las cepas del ensayo fueron conducidas verticalmente en espaldera (VSP), con 10 yemas por metro lineal. Las plantas dentro de la fila fueron separadas 1 m y la distancia de la calle fue de 3 m. La orientación de las filas norte – sur.

Se plantearon cuatro tratamientos experimentales con diferentes dosis y momento de aplicación del riego.

- T: Testigo. Déficit ligero, con un aporte continuado de agua desde floración (420 mm).
- DM_c: Déficit moderado continuo. Manejo del riego convencional, empezando en pre-envero (154 mm)
- DM₁: Déficit moderado a partir de pre-envero. Aporte de riego continuado desde floración reduciéndose la dosis de riego en pre-envero (312 mm).
- DM₂: Déficit moderado hasta pre-envero. Se empezó a regar a partir de pre-envero (230 mm).

Se observó que bajo condiciones de estrés hídrico leve, el crecimiento se reduce disminuyendo la migración de fotoasimilados hacia los órganos vegetativos. Generando menor área foliar en las plantas sometidas a déficit hídrico moderado entre floración y cuajado. Disminuyendo su consumo. En maduración la humedad del suelo dependió principalmente del riego aplicado y del consumo de la planta; dicho consumo dependió a la vez del desarrollo foliar del *canopy* y de la necesidad hídrica de la vid.

El aumento del déficit hídrico disminuyó el contenido de agua en el suelo, lo que provocó diferencias en el estado hídrico y en el intercambio gaseoso de las hojas. En condiciones de déficit moderado, la fotosíntesis se encontró altamente correlacionada con el potencial hídrico foliar medido a mediodía solar. Además en condiciones de déficit moderado continuo la disponibilidad hídrica, la demanda atmosférica y el nivel de hidratación de las hojas, interaccionaron de forma compleja en la regulación estomática de las hojas, condicionando el intercambio gaseoso y la eficiencia en el uso del agua.

Al aumentar el volumen de agua aplicado el peso de madera de poda por metro de fila fue superior. Las diferencias encontradas en el rendimiento fueron debidas a las diferencias en el peso de baya. El cual estuvo condicionado por la estrategia de riego, ya que, el déficit hídrico moderado antes de envero fue más crítico para el rendimiento que el déficit impuesto durante la madurez. Por otro lado, la biomasa dependió de la actividad fisiológica de la planta, la cual fue altamente dependiente de la disponibilidad hídrica.

Déficit hídrico moderado aplicado de cuajado a envero, generó bayas más pequeñas y aumentó la relación hollejo:pulpa. El déficit moderado aplicado después de envero favoreció la acumulación de IPT y antocianos extraíbles, mejorando la calidad de la uva, pero disminuyó la acidez de la baya. El riego aplicado de envero a vendimia desaceleró la concentración de azúcares en bayas que fueron sometidas a déficit antes de pre-envero.

ABSTRACT:

Mediterranean climate is characterized by hot summers, high evapotranspiration rates, and scarce precipitations (400 mm per year) during grapevine cycle. These extremely dry conditions affect vineyard productivity and sustainability. Supplementary irrigation is needed practice in order to maintain yield and quality.

Almost all Spanish grape growing regions are characterized by these conditions, especially in the center region, where this trial was performed. The main objective of this work is to study the influence of water irrigation on yield and quality. For this aim, different levels of irrigation (mm of water applied) were applied during different stages of growth and berry maturity of Cabernet Sauvignon grapevines.

The work was conducted from 2010 to 2011 and located in Licinia (40° 12' N, 3° 28' W), Madrid, Spain. The cultivar utilized was Cabernet Sauvignon, clone 15 grafted onto rootstock 41B, planted in 2005. The vineyard was oriented north-south, with spacing on 3 meters between rows and 1 meter between plants. Vines were spur-pruned to 10 buds per meter and trained in unilateral cordon with a height of 80 cm. Shoots were positioned vertically (VSP).

Considering the amount of water and the moment of the application, four experimental treatments were applied:

- T: Control sample. Slight deficit (420 mm) applied from bloom to maturity.
- DM_c: Continuous moderate deficit. Traditional irrigation: application of 154 mm of water from pre-veraison to maturity.
- DM₁: Deficit moderate from pre-veraison. Irrigation of 312 mm of water from bloom to pre-veraison.
- DM₂: Deficit moderate to pre-veraison. Irrigation of 230 mm of water from pre-veraison to maturity

Under moderated water stress conditions it was seen than leaf growth decreases due to the reduction of migration of photo-assimilates to vegetative organs. Vines with moderate water deficit between flowering and ripening develop less leaf area and decrease its water consumption.

During maturation of berries, soil moisture depends on irrigation and plant consumption. This consumption further depends on vegetation development and on the vine needs for water.

By increasing water deficit, the water content in the soil decreases. This causes differences in leaf water status and in the gases exchange. Under moderate deficit conditions, photosynthesis was found highly correlated with midday leaf water potential.

Further, atmospheric demand and the level of leaves hydration interact in complex ways in the stomatal regulation, which affects leaf gas exchange and the efficiency of water use.

The amount of water applied is directly proportional to pruning weight.

Changes in berry weight cause differences in yield ratios. The differences in berry weights are conditioned by the irrigation strategy, the moderate water deficit before veraison influences more than the deficit applied from veraison.

Biomass generated for the plant depends on its physiological activity, which is highly related to the water availability.

Moderate water deficit applied from fruit set to ripening generates smaller berries, increasing the pulp/skin ratio. Moderate deficit applied after veraison promotes the accumulation of extractables anthocyanins and TPI. Despite this treatment improves color parameters of the grapes, it decreases its total acidity. Irrigation applied from veraison to harvest slows down sugar accumulation in berries compared to those under deficit before veraison conditions.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XXIII
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	XXX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XXXIII
CAPÍTULO I: CONTEXTO DEL ESTUDIO: HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	1
I.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
I.2 HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS.....	7
I.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	11
I.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	12
CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN GENERAL A LOS EFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (Vitis vinifera L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO.....	13
II.1 RELACIÓN DE LA VID CON EL AGUA.....	15
II.2 EFECTOS DEL DÉFICIT HÍDRICO DURANTE EL CICLO VEGETATIVO.....	16
II.3 EFECTOS FAVORABLES O DESFAVORABLES DEL DÉFICIT HÍDRICO EN LA VID.....	18
II.3.1 Efectos sobre la fisiología de la vid.....	18
II.3.2 Efectos sobre el desarrollo vegetativo.....	22
II.3.3 Efectos sobre el rendimiento.....	24
II.3.4 Efectos sobre la composición de la uva (calidad).....	25
II.4 HERRAMIENTAS PARA EVALUAR EL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA..	27
II.5 ESTRATEGIAS DE RIEGO.....	32
II.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

CAPÍTULO III: MATERIAL Y MÉTODOS GENERALES.....	43
III.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	45
III.2 CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS.....	46
III.3 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS.....	49
III.4 CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS.....	53
III.5 PARCELAS EXPERIMENTALES.....	54
III.5.1 Diseño y dispositivo experimental.....	56
III.5.2 Inicio y programación del riego.....	60
III.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	61
III.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	61
 CAPÍTULO IV: EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO. CONSUMO.....	 63
IV.1 RESUMEN.....	65
IV.2 INTRODUCCIÓN.....	66
IV.3 MATERIAL Y MÉTODOS.....	70
IV.3.1 MEDIDAS DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA EN EL SUELO	70
IV.3.2 CALIBRACIÓN DE LA SONDA FDR	72
IV.3.3 DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO	75
IV.3.4 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DEL SUELO	76
IV.3.5 CÁLCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y DEL CONSUMO DEL VIÑEDO	77
IV.4 RESULTADOS.....	78
IV.4.1 CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO.....	78
IV.4.1.1 Calibración de las sondas de humedad.....	78
IV.4.1.2 Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en 3 zonas de estudio: en la línea, la rodadura y en el centro de la calle.....	79
IV.4.1.3 Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en la zona de raíces.....	85
IV.4.1.4 Evolución del contenido volumétrico de agua en el viñedo.....	89
IV.4.2 CONSUMO.....	92
IV.5 DISCUSIÓN.....	98

IV.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
-------------	---------------------------------	-----

CAPÍTULO V: EFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (Vitis vinifera L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO EN EN EL INTERCAMBIO DE GASES DE LA HOJA Y EN EL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.....109

V.1	RESUMEN.....	111
V.2	INTRODUCCIÓN.....	112
V.3	MATERIAL Y MÉTODOS.....	114
	V.3.1 MEDIDAS DE FISIOLÓGÍA.....	114
	V.3.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.....	117
V.4	RESULTADOS.....	118
	V.4.1 INTERCAMBIO DE GASES Y POTENCIAL HÍDRICO.....	118
	V.4.2 INFLUENCIA DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA EN EL INTERCAMBIO GASEOSO EN EL PERIODO ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO.....	127
V.5	DISCUSIÓN.....	134
V.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140

CAPÍTULO VI: EFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (Vitis vinifera L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO EN EL CRECIMIENTO Y EN LA PRODUCTIVIDAD.....145

VI.1	RESUMEN.....	147
VI.2	INTRODUCCIÓN.....	148
VI.3	MATERIAL Y MÉTODOS.....	152
	VI.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ARQUITECTURA FOLIAR DE LA PLANTA.....	152
	VI.3.2 PESO DE COSECHA Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	155
	VI.3.3 PESO DE MADERA DE PODA E ÍNDICE DE RAVAZ.....	155
	VI.3.4 RELACIÓN VEGETATIVO/REPRODUCTIVO: HOJA/FRUTO.....	156
	VI.3.5 PRODUCTIVIDAD GLOBAL: MATERIA SECA.....	156
VI.4	RESULTADOS.....	158

VI.4.1 CRECIMIENTO VEGETATIVO	158
VI.4.2 EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ASIMILADOS EN EL PERIODO DE CRECIMIENTO Y MADURACIÓN DE LA BAYA.....	165
VI.4.3 EFICIENCIA DE LA PLANTA EN FUNCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA.....	168
VI.4.4 CRECIMIENTO VEGETATIVO, REPRODUCTIVO Y DISPONIBILIDAD HÍDRICA.....	170
VI.5 DISCUSIÓN.....	173
VI.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182
CAPÍTULO VII: EFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (Vitis vinifera L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BAYA.....	189
VII.1 RESUMEN.....	191
VII.2 INTRODUCCIÓN.....	192
VII.3 MATERIAL Y MÉTODOS.....	195
VII.3.1 COMPOSICIÓN DE LA BAYA.....	195
VII.3.1.1 Muestreo de bayas.....	195
VII.3.1.2 Análisis de bayas.....	195
VII.3.1.3 Composición fenólica de la baya.....	197
VII.3.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.....	198
VII.4 RESULTADOS.....	200
VII.4.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS ANUALES.....	200
VII.4.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA DESDE CUAJADO A VENDIMIA.....	201
VII.4.3 MADURACIÓN Y COMPOSICIÓN FINAL DE LA BAYA.....	203
VII.4.4 EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LA BAYA EN FUNCIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.....	205
VII.5 DISCUSIÓN.....	209
VII.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	213
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES GENERALES.....	217

ÍNDICE DE TABLAS:
Capítulo II:

Tabla II.1: Relación entre los valores de potencial de base y el estado hídrico de la planta (Deloire *et al.* 2004; Carbonneau 2002)..... **28**

Tabla II.2: Severidad del estrés hídrico en función del potencial hídrico foliar medido al mediodía solar (Vallone *et al.*, 1997; Deloire *et al.*, 2004).....**29**

Capítulo III:

Tabla III.1: Caracterización de las parcelas de referencia donde se establece el ensayo. Bodegas Licinia. Año 2010 y 2011.....**45**

Tabla III.2: Características edafológicas del ensayo, descripción de los horizontes del perfil del suelo hasta 130 cm de profundidad, clasificación según USDA-Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2006), análisis textural, el contenido en materia orgánica (M.O.; %), la conductividad eléctrica (CE; mmhos/cm), el pH, el contenido en caliza activa (C. activa; %), los cationes extraíbles (meq/100g) y la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.; meq/100g).....**48**

Tabla III.3: Temperatura media (T_m; °C), precipitación efectiva* (P_e; mm), evapotranspiración de referencia (ET₀; mm) y acumulación de temperaturas eficaces** (GDD₁₀; grado·día) durante el periodo de reposo y en los periodos comprendidos entre: brotación (Br; 4) y prefloración, prefloración (PFI; 19) y cierre de racimos, cierre de racimo (CR; 33) y envero, envero (E; 35) y vendimia (V; 38); en el 2010 y 2011...**52**

Tabla III.4: Fecha, días transcurridos desde el 1 de enero (Doy) y la integral térmica eficaz (Ite; grados · día⁻¹) de los estados fenológicos más representativos del 2010 y 2011. Según el método de Eichhorn y Lorenz (1977) modificado por Coombe (1995).....**53**

Tabla III.5: Días transcurridos entre los estados fenológicos más representativos del 2010 y 2011. Según el método de Eichhorn y Lorenz (1977) modificado por Coombe (1995).....**53**

Tabla III.6: Descripción de los distintos tratamientos del ensayo de riego en Cabernet Sauvignon. Periodos de aplicación de los distintos riegos: 1 Abril (1 Ab), prefloración (PFI), cuajado (C), cierre de racimos (CR), pre-envero (PE_n), vendimia (V), final del

riego. **Coefficientes de cultivo teóricos (kc) y volumen de agua (R; mm)** utilizado en cada tratamiento y periodo de riego. 2010 y 2011.....**59**

Tabla III.7: Volumen de agua aplicado en mm, diferenciado en dos etapas: **Etapa I** desde el inicio del riego (floración) hasta el cambio de riego (pre-verano) y **Etapa II** desde el cambio de riego hasta final de riego. En los cuatro tratamientos y en los dos años de estudio.....**59**

Tabla III.8: Descripción de los distintos tratamientos del ensayo de riego en Cabernet Sauvignon. Fecha de los estados fenológicos: brotación, pre-floración, cierre de racimos, pre-verano y vendimia. Periodos de aplicación de los distintos riegos. **Coefficientes de cultivo reales** aplicados en cada tratamiento y periodo de riego (expresados como % de la ET_0).....**60**

Capítulo IV:

Tabla IV.1: Precipitación efectiva (Pe ; mm), cantidades de agua aportada por el riego (R ; mm), consumos de agua expresados en mm y mm/día, la evapotranspiración de referencia (ET_0) expresada en mm y mm/día y el coeficiente teórico del cultivo (kth) entre los estados fenológicos de prefloración (PFI), cierre de racimos (CR), pre-verano (PE), vendimia (V) y final de riego (FR), durante el año 2010.....**94**

Tabla IV.2: Precipitación efectiva (Pe ; mm), cantidades de agua aportada por el riego (R ; mm), consumos de agua expresado en mm y mm/día, la evapotranspiración de referencia (ET_0) expresada en mm y mm/día y el coeficiente teórico del cultivo (kth) entre los estados fenológicos de inicio de floración (FI), cierre de racimos (CR), Pre-verano (PE) y vendimia (V), durante el año 2011.....**95**

Tabla IV.3: Consumos medios de agua expresados en mm, mm/día y mm por cada 10 grados-día acumulados durante las etapas anterior (desde floración a pre-verano: **Etapa I**) y posterior (desde pre-verano a fin del riego: **Etapa II**) al cambio de riego en 2010 y 2011.....**96**

Tabla IV.4: Precipitación efectiva (Pe ; mm), evapotranspiración de referencia (ET_0 ; mm/día), acumulación de temperaturas eficaces (GDD_{10} ; grados-día), volumen de agua de riego en cada tratamiento (mm) durante las etapas anterior (desde floración a pre-verano) y posterior (desde pre-verano a fin de riego) al cambio de riego en 2010 y 2011.....**97**

Capítulo VI:

Tabla VI.1: Fechas, días del año (DOY), GDD_{10} (grados·día ⁻¹) y estado fenológico de cada muestreo realizado en 2011.....	157
Tabla VI.2: Longitud final del pámpano principal (Lpp) en centímetros, número de nudos del pámpano principal (Nº nudos), longitud del entrenudo (L entrenudo) en centímetros y número de hojas de nietos (Nº nietos), para los cuatro tratamientos en 2010 y 2011.....	158
Tabla VI.3: Valores medios de la superficie foliar del pámpano principal (SFTppal, m ² /cepa), de la superficie foliar de nietos (SFTnietos; m ² /cepa), de la superficie foliar total de la cepa (SFT; m ² /cepa), de la superficie foliar expuesta de la cepa (SFE; m ² /cepa) y el volumen de vegetación de la cepa (Vol; m ³ /cepa) en 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon, en los 4 tratamientos.....	160
Tabla VI.4: Características vegetativas; relación entre la superficie foliar expuesta y la superficie foliar total (SFE/SFT; m ² /m ²) y relación entre la superficie foliar total y el volumen de vegetación (SFT/Vol; m ² /m ³) en 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon bajo los 4 regímenes hídricos.....	161
Tabla VI.5: Componentes del Rendimiento: Peso de cosecha (rendimiento, t·ha ⁻¹), peso del racimo (g), peso de la baya (g), número de bayas por racimo y fertilidad de la cepa (racimos/planta); en el 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon bajo los 4 regímenes hídricos.....	162
Tabla VI.6: Valores medios del número de sarmientos por planta, del peso de madera de poda por cepa (kg·cepa ⁻¹), del peso unitario de cada sarmiento (g) y del Índice de Ravaz; en 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon bajo los 4 regímenes hídricos.....	164
Tabla VI.7: Relación vegetativo – reproductivo en 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon para los 4 regímenes hídricos. SFT, SFE y Rdto: superficie foliar total, superficie foliar expuesta y rendimiento respectivamente.....	165
Tabla VI.8: Valores medios desde Floración a Vendimia de la precipitación efectiva (Pe; mm); del riego (mm); de la evapotranspiración de referencia del periodo (ET ₀ , mm-periodo ⁻¹); los grados día acumulados desde floración a vendimia (GDD_{10} ; °C·día ⁻¹); gramos de materia seca total por cada litro de agua consumido (g MS·L ⁻¹), y reparto de la producción de materia seca por litro consumido entre las partes renovables: producción de materia seca vegetativa (g MS Vg·L ⁻¹) y reproductiva (g MS Rp·L ⁻¹), el ratio vegetativo a productivo (MS vg /MS rp); en 2010 y 2011.....	169

Capítulo VII:

Tabla VII.1: Precipitación efectiva (Pe; mm), evapotranspiración de referencia (Et₀; mm/día), acumulación de temperaturas eficaces (GDD₁₀; grados·día), cantidades de agua aportada por el riego (R; mm), durante las etapas anteriores (cuajado – pre envero) y posteriores (pre envero – vendimia) al cambio de riego en el 2010 y 2011.....**200**

Tabla VII.2: Composición final de la baya: concentración de sólidos solubles totales (SST; °Brix), acidez total titulable (ATT; g Ac. Tartárico·l⁻¹) y pH; y a la composición fenólica antocianos totales (mg malvidina/l), antocianos extraíbles (mg malvidina/l) y polifenoles mediante el índice de polifenoles totales (IPT); para las diferentes dosis de riego en 2010 y 2011.....**204**

ÍNDICE DE FIGURAS:

Capítulo III:

Figura III.1: Evolución anual de: (A) las temperaturas medias (T , °C) y humedad relativa (HR, %), (B) precipitaciones efectivas (P_e , mm) y evapotranspiración de referencia (E_{To} , mm.día⁻¹), (C) radiación solar (Rad.Solar, W/m²) y de la integral térmica eficaz desde el 1 de abril (GDD₁₀, grado.día⁻¹), del año 2010 y 2011. Los datos proceden de la estación situada en la propia parcela.....51

Figura III.2: Esquema del dispositivo experimental de la parcela de Cabernet Sauvigno.....55

Figura III.3: Evolución del peso de baya en g para las diferentes dosis de riego, en función de los grados día acumulados (GDD₁₀; °C.día⁻¹) en 2010 (A) y 2011 (B). La línea roja señala el pre-envero.....57

Figura III.4: Esquema del diseño experimental. Valores medios de los dos años de estudio 2010 y 2011.....58

Capítulo IV:

Figura IV.1: Esquema de la colocación de los tubos de acceso de la sonda portátil Diviner 2000, para medir la humedad del suelo en el perfil.....71

Figura IV.2: Relación entre las medidas de frecuencia a escala (Scaled Frequency) y los contenidos volumétricos de agua en el suelo (% v/v), $v = 43,38 \cdot SF^{3,26}$ ($p < 0.001$; $R^2 = 0,85$).....78

Figura IV.3: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 0,9 m de profundidad en la línea de plantación (A y B) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-envero (DM₂; triángulos rosas), en 2010 (A) y 2011 (B), indicando las fechas de cierre de racimos (33¹), pre-envero (34¹) y vendimia (38¹). Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias ($\alpha=0.05$). (C y D) Representación de la precipitación eficaz (P_e , mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento en 2010 (C) y 2011 (D).....82

¹ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995

Figura IV.4: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 0,9 m de profundidad en la rodadura (a 0,75 m de la línea de plantación) (**A** y **B**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-verano (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-verano (DM₂; triángulos rosas), en 2010 (**A**) y 2011 (**B**), indicando las fechas de cierre de racimos, pre-verano y vendimia. Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (=0.05). (**C** y **D**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento en 2010 (**C**) y 2011 (**D**).....**83**

Figura IV.5: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 0,9 m de profundidad en el centro de la calle (a 1,5 m de la línea de plantación) (**A** y **B**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-verano (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-verano (DM₂; triángulos rosas), en 2010 (**A**) y 2011 (**B**), indicando las fechas de cierre de racimos, pre-verano y vendimia en 2010 y 2011. Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (=0.05). (**C** y **D**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento en 2010 (**C**) y 2011 (**D**).....**84**

Figura IV.6: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en la zona de raíces (20-50 cm), en la línea de plantación en 2010 (**A**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-verano (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-verano (DM₂; triángulos rosas), indicando el nivel de capacidad de campo y punto de marchitez (líneas horizontales discontinuas grises) indicando las fechas de cierre de racimos, pre-verano y vendimia. Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (=0.05). (**B**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento.....**87**

Figura IV.7: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en la zona de raíces (20-50 cm), en la línea de plantación en 2011 **(A)** para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado pre-hasta envero (DM₂; triángulos rosas), indicando el nivel de capacidad de campo y punto de marchitez (líneas horizontales discontinuas grises), las fechas de cierre de racimos, pre-envero y vendimia. Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias ($\alpha=0.05$). **(B)** Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento.....**88**

Figura IV.8: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 0,9 m de profundidad, en la calle en 2010 **(A)** para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-envero (DM₂; triángulos rosas), indicando el nivel de capacidad de campo y punto de marchitez (líneas horizontales discontinuas grises), las fechas de cierre de racimos, pre-envero y vendimia. Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias ($\alpha=0.05$). **(B)** Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento.....**90**

Figura IV.9: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 90 cm de profundidad, en la calle en 2011 **(A)** para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-envero (DM₂; triángulos rosas), indicando el nivel de capacidad de campo y punto de marchitez (líneas horizontales discontinuas grises), indicando las fechas de pre-envero, mitad de maduración y vendimia. Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias ($\alpha=0.05$). **(B)** Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento.....**91**

Capítulo V:

Figura V.1: Evolución estacional en **2010 a media mañana** de (A) potencial hídrico foliar (ψ); (B) fotosíntesis (A; $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); (C) conductancia estomática (gs; $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); y (D) transpiración (E; $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Condiciones ambientales medidas a media mañana de los días que se realizaron las medidas fisiológicas: (E) déficit de presión de vapor (VPD; KPa), (F) temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), (G) contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v). Las líneas verticales indican los estados fenológicos (C = Cuajado; CR = Cierre de Racimos; PE = Pre-Envero y MM = Mitad de Maduración). Barras verticales muestran el error estándar de la media.....**119**

Figura V.2: Evolución estacionales durante **2011 a media mañana** de (A) potencial hídrico foliar (ψ); (B) fotosíntesis (A; $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); (C) conductancia estomática (gs; $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); y (D) transpiración (E; $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Condiciones ambientales medidas a media mañana de los días que se realizaron las medidas fisiológicas: (E) déficit de presión de vapor (VPD; KPa), (F) temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), (G) contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v). Las líneas verticales indican los estados fenológicos (Pre-Envero y Vendimia). Barras verticales muestran el error estándar de la media.....**121**

Figura V.3: Evolución estacional durante **2010 a mediodía solar** de (A) potencial hídrico foliar (ψ); (B) fotosíntesis (A; $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); (C) conductancia estomática (gs; $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); y (D) transpiración (E; $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Condiciones ambientales medidas a mediodía de los días que se realizaron las medidas fisiológicas: (E) déficit de presión de vapor (VPD; KPa), (F) temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), (G) contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v). Las líneas verticales indican los estados fenológicos (C = Cuajado; CR = Cierre de Racimos; PE = Pre-Envero y MM = Mitad de Maduración). Barras verticales muestran el error estándar de la media.....**123**

Figura V.4: Evolución estacional durante **2011 a mediodía solar** de (A) potencial hídrico foliar (ψ); (B) fotosíntesis (A; $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); (C) conductancia estomática (gs; $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); y (D) transpiración (E; $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Condiciones ambientales medidas a mediodía de los días que se realizaron las medidas fisiológicas: (E) déficit de presión de vapor (DPV; KPa), (F) temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), (G) contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v). Las líneas verticales indican los estados fenológicos (Pre-Envero y Vendimia). Barras verticales muestran el error estándar de la media.....**126**

- Figura V.5:** Relación entre la conductancia estomática y la asimilación neta de CO₂ para los diferentes tratamientos; en pre-verano (línea continua; $p = 0,001$; $R^2 = 0,91$), en pos-verano (línea discontinua; $p = 0,001$; $R^2 = 0,87$).....**128**
- Figura V.6:** Relación entre el potencial hídrico foliar medido al mediodía solar y la asimilación neta de CO₂ (gráficos A y B) y la conductancia estomática (gráficos C y D) en pre-verano (gráficos A y C) y pos-verano (gráficos B y D).....**129**
- Figura V.7:** Relación entre la conductancia estomática (gs) y la eficiencia en el uso del agua (An/g_s) para pre-verano (A; $y = 25,433 x^{-0,545}$; $p = 0,001$; $R^2 = 0,96$) y pos-verano (B; $y = 29,072 x^{-0,494}$; $p = 0,001$; $R^2 = 0,80$), para los 4 tratamientos Cada punto es el promedio de la medición de los parámetros fisiológicos en 6 hojas.....**130**
- Figura V.8:** Relación entre la conductancia estomática (gs) y la eficiencia intrínseca en el uso del agua (An/E) para pre-verano (A; $y = 38,73 x^2 + 25,28 x$; $p = 0,001$; $R^2 = 0,60$) y pos-verano (B; $R^2 = 0,23$), para los 4 tratamientos Cada punto es el promedio de la medición de los parámetros fisiológicos en 6 hojas.....**131**
- Figura V.9:** Relación entre el potencial hídrico foliar (Ψ) y la eficiencia en el uso del agua (An/g_s) para pre-verano (A; $y = 517,85 x^2 + 1087,1 x + 613$; $p = 0,001$; $R^2 = 0,66$) y pos-verano (B; $y = 67,14 x^2 + 104,07 x + 93,06$; $p = 0,001$; $R^2 = 0,56$), para los 4 tratamientos Cada punto es el promedio de la medición de los parámetros fisiológicos en 6 hojas.....**132**
- Figura V.10:** Relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la eficiencia en el uso del agua (A y B; An/g_s) y la eficiencia intrínseca en el uso del agua (C y D; An/E) para pre-verano (A y C) y pos-verano (B; $y = -8,77 x^2 + 51,93 x$; $p = 0,001$; $R^2 = 0,33$ y D; $y = -1,34 x^2 + 4,74$; $p = 0,001$; $R^2 = 0,63$), para los 4 tratamientos Cada punto es el promedio de la medición de los parámetros fisiológicos en 6 hojas.....**133**

Capítulo VI:

Figura VI.1: Evolución de la acumulación de materia seca en las partes renovables durante las diferentes etapas del crecimiento de la baya en 2011: materia seca total (A), de los órganos vegetativos (B) y reproductivos (C) para los 4 tratamientos, expresado como g·sarmiento⁻¹. Análisis de la varianza para la dosis de riego: *: significativo al p 0,05.....167

Figura VI.2: Relación entre el agua aplicada (Pe + R; precipitación efectiva + riego en mm) desde floración a vendimia (gráficas de la izquierda) y desde brotación a vendimia (gráficas de la derecha); y la superficie foliar total desarrollada (SFT; m²/cepa) (gráficas A y B); la superficie foliar desarrollada por los nietos (SFT nietos m²/cepa) (gráficas C y D); y el peso del sarmiento (g) (gráficas E y F). Coeficiente de determinación (R²) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y p 0,05).....171

Figura VI.3: Relación entre el agua aplicada (Pe + R; precipitación efectiva + riego) desde floración a vendimia (gráficas de la izquierda) y desde brotación a vendimia (gráficas de la derecha); y el peso del racimo (g) (gráficas A y B); el peso de baya (g) (gráficas C y D); y el rendimiento (t·ha⁻¹) (gráficas E y F). Coeficiente de determinación (R²) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y p 0,05).....173

Capítulo VII:

Figura VII.1: Evolución del potencial hídrico foliar (MPa) medido al mediodía solar desde cuajado a vendimia en 2010 (A) y 2011 (C). Evolución del peso de baya en g para las diferentes dosis de riego, en función de los grados día acumulados (GDD₁₀; °C·día⁻¹) en 2010 (B) y en 2011 (D).....202

Figura VII.2: Relación del peso de baya (g) con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía ($\bar{\mu}_{md}$; MPa), para los cuatro tratamientos (T: círculos negros; DM_c: círculos blancos; DM₁: triángulos negros; DM₂: triángulos blancos), de cuajado a pre-verano y de pre-verano a vendimia. Para los años 2010 y 2011. Cada punto representa el valor medio por repetición del tratamiento. Coeficiente de determinación (R²) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y p 0,05).....205

Figura VII.3: Relación de la concentración de sólidos solubles totales (° Brix) con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía ($\bar{\mu}_{md}$; MPa), para los cuatro tratamientos (T: círculos negros; DM_c: círculos blancos; DM₁: triángulos negros;

DM₂: triángulos blancos), de cuajado a pre-envero y de pre-envero a vendimia. Para los años 2010 y 2011. Cada punto representa el valor medio por repetición del tratamiento. Coeficiente de determinación (R²) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y p < 0,05).....**206**

Figura VII.4: Relación de la acidez total titulable (g/l ácido tartárico) con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía solar (ψ_{md} ; MPa), para los cuatro tratamientos (T: círculos negros; DM_c: círclos blancos; DM₁: triángulos negros; DM₂: triángulos blancos), de pre-envero a vendimia. Para los años 2010 y 2011. Cada punto representa el valor medio por repetición del tratamiento. Coeficiente de determinación (R²) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y p < 0,05).....**207**

Figura VII.5: Relación del índice de polifenoles totales (IPT) y antocianos extraíbles (mg/l de malvidina) con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía (ψ_{md} ; MPa), para los cuatro tratamientos (T: círculos negros; DM_c: círclos blancos; DM₁: triángulos negros; DM₂: triángulos blancos), de pre-envero a vendimia. Para los años 2010 y 2011. Cada punto representa el valor medio por repetición del tratamiento. Coeficiente de determinación (R²) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y p < 0,05).....**208**

ÍNDICE DE IMÁGENES:

Capítulo III:

Imagen III.1: Situación de la parcela experimental. Fuente: Visor SigPac. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.....**46**

Imagen III.2: Perfil del suelo de la parcela donde se desarrollo el ensayo.....**47**

Imagen III.3: Estación meteorológica Groweather™ System (Davis), situada en la parcela experimental.....**49**

Imagen III.4: Parcelas experimentales en diferentes momentos del ciclo de la vid.....**54**

Capítulo VI:

Imagen IV. 1: Sensor FDR junto con la unidad de visualización portátil de la sonda Diviner 2000.....**70**

Imagen IV.2: Tubos de acceso de la sonda portátil Diviner 2000, para medir la humedad del suelo en el perfil. Y nomenclatura utilizada en el trabajo para determinar las distintas posiciones de los tubos de acceso.....**72**

Imagen IV.3: TDR (Time-domain Reflectometry), equipo portátil Modelo No. 6050X1 del sistema Trase, Soil moisture Equipment Corp. (Santa Bárbara, California).....**73**

Capítulo V:

Imagen V.1: Descripción de la zona de racimos donde se seleccionaron las hojas adultas, expandidas y bien iluminadas para realizar las medidas de fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración y potencial hídrico foliar.....**115**

Imagen V.2: IRGA. Sistema abierto de medida de intercambio de gases por infrarrojos (Li-6400, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA.).....**116**

Capítulo VII:

Imagen VII.1: Refractómetro (PALETTE WM-7, ATAGO Inc., Kirkland, WA, USA) del laboratorio del departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la UPM.....**196**

Imagen VII.2: pHímetro (micropH 2001, CRISON, Barcelona, España) del laboratorio del departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la UPM.....**196**

Imagen VII.3: Valorador automático (736 GP Titrino, METROHM AG, Herisau, Switzerland) del laboratorio del departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la UPM.....**197**

Imagen VII.4: Valorador automático (Lambda 11 2.31 uv/vis SPECTROMETER, Perkin-Elmer, Waltham, MA, USA) del laboratorio del departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la UPM.....**197**

LISTA DE ABREVIATURAS.

Ac	Porcentaje de arcilla ($\varnothing < 0,002$ mm)
An	Asimilación neta de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Ar	Porcentaje de arena ($0,05 < \varnothing < 2$ mm)
ATT	Acidez total titulable ($\text{g ácido tartárico} \cdot \text{l}^{-1}$)
Br	Brotación
C. activa	Contenido en caliza activa (%)
C.I.C.	Capacidad de Intercambio catiónico (meq/100g)
Ca	Calcio
CE	Conductividad eléctrica (mmhos/cm)
Ce	Eficiencia del riego
CO_2	Dióxido de Carbono
CR	Cierre de racimos
D	Drenaje (mm)
dgoteo	distancia entre goteros (m)
DM_1	Déficit moderado a partir de pre-verano
DM_2	Déficit moderado hasta pre-verano
DM_c	Déficit moderado continuo
DOY	Día del año
E	Transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Env	Verano
ET	Consumo de agua del viñedo (mm)
ET_0	Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm; $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$; $\text{mm} \cdot \text{semana}^{-1}$)
ET_c	Evapotranspiración del viñedo ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$)
ET_{ij}	Agua consumida en un intervalo comprendido entre los días “i” y “j” (mm)
FDR	Frequency Domain Reflectometry tecnología para medir la humedad del suelo en el perfil.
GDD_{10}	Growing degree days. Integral térmica eficaz (base 10°C). En $\text{grados} \cdot \text{día}^{-1}$
gs	Conductancia estomática ($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
H_2O	Agua
HCl	Ácido Clorhídrico
HR	Humedad Relativa (%)
$\text{Int}_{i,i+1}$	Integral del potencial hídrico foliar al mediodía calculada entre el día t_i y t_{i+1}
Int S_x	Integral del potencial hídrico foliar acumulado durante el estado fenológico “x”
IPT	Índice de Polifenoles Totales
K	Potasio
kc	Coefficiente de cultivo
L	Porcentaje de Limos ($0,002 < \varnothing < 0,05$ mm)
M.O.	Materia Orgánica (%)
Mg	Magnesio
MM	Mitad de Maduración
MS	Materia Seca (kg/m^2)

MS Rp	Materia seca de los racimos y racimas (kg/m ²)
MS Vg	Materia seca de la parte vegetal (kg/m ²)
N	Norte
P	Precipitación (mm)
Pe	Precipitación efectiva (mm)
PE	Pre-verano
PFI	Prefloración
PRD	Sistema de Riego (Partial Rootzone Drying)
Q	Caudal (l/h)
R	Riego (mm)
Rad	Radiación Solar (W/m ²)
RDI	Déficit hídrico controlado (Regulated Deficit Irrigation)
Ri	Repetición "i"
S	Sur
SF	Frecuencia a escala (Scaled Frequency)
SFT	Superficie foliar total en m ² /cepa
SFE	Superficie foliar externa m ² /cepa
snm	Sobre el nivel del mar
SST	Sólidos Solubles Totales (°Brix)
T	Testigo
TDR	Técnica que determina el contenido de agua en el suelo (Time-domain Reflectometry). % v/v
TH ₂	Ácido Tartárico
Thoja	Temperatura de la hoja (°C)
Tm	Temperatura media (°C)
V	Vendimia
VPD	Déficit de presión de vapor (Vapor Pressure Deficit); (KPa).
VSP	Sistema de posicionamiento vertical de los pámpanos (vertically shoot positioned)
W	Oeste
WUE	Eficiencia instantánea en el uso del agua (An/E)
WUE _i	Eficiencia en el uso del agua intrínseca (An/gS)
Zn	Zinc
	Coeficiente dieléctrico aparente del suelo.
<i>i</i>	Humedad del perfil en el intervalo "i" profundidad (% v/v)
<i>v</i>	Contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v)
<i>v⁽ⁱ⁾</i>	contenido medio de humedad del perfil (% v/v) en el día "i"
<i>vi</i>	Humedad media del conjunto del perfil (% v/v)
<i>f</i>	Potencial hídrico foliar (MPa; Bares)
<i>i</i>	Potencial hídrico foliar al mediodía en el día <i>t_i</i>
<i>m</i>	Potencial matricial; (MPa; Bares)
<i>md</i>	Potencial hídrico foliar al mediodía (MPa; Bares)
<i>pd</i>	Potencial hídrico foliar de base (MPa; Bares)
<i>stem</i>	Potencial hídrico de tallo (MPa; Bares)

CAPÍTULO I:

CONTEXTO DEL ESTUDIO, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

I.1	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
I.2	HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS.....	7
I.3	ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	11
I.4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	12

CAPÍTULO I: CONTEXTO DEL ESTUDIO, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

I.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.

Una gran parte del cultivo de la vid se establece en regiones semiáridas, las cuales se caracterizan principalmente por tener veranos cálidos y secos, con temperaturas medias elevadas, con evapotranspiraciones altas y con humedades bajas; así como precipitaciones escasas o casi inexistentes. También es típico de estas zonas precipitaciones anuales bajas, inferiores a 400 mm, y estacionales. Concentrándose la mayor parte del volumen anual de agua de lluvia en otoño e invierno.

Todo lo descrito anteriormente puede llegar a ocasionar en el periodo activo de la planta estreses hídricos, térmicos e higrométricos. Llegando a producir daños directos en la vid; y si, dichos estreses se intensifican pueden, incluso, llegar a afectar a la productividad y continuidad de la planta. Muchos viticultores se acogen a la aplicación de riegos deficitarios controlados, donde se reemplaza menos agua de la que potencialmente transpira la planta, para mitigar dichos estreses. Consiguiendo con ello ahorrar agua, incrementar el rendimiento, obtener plantas equilibradas, y sobre todo, respetar las características cualitativas del mosto. Para ello es necesario el estudio y conocimiento de las necesidades hídricas de la cepa, así como su comportamiento y respuesta a lo largo del ciclo a la disponibilidad hídrica de agua en el suelo.

A lo largo del ciclo activo de la vid las necesidades hídricas de la planta no son constantes, sino que varían dependiendo de varios factores como son: la disponibilidad de agua en el suelo, que a su vez depende de las características físico-químicas del mismo, así como de la profundidad y capacidad de retención del suelo; el desarrollo y crecimiento radicular, la demanda atmosférica, el desarrollo de la cubierta vegetal del suelo, la transpiración del cultivo y el desarrollo vegetativo del *canopy*, entre otros.

La demanda hídrica del viñedo al principio del ciclo activo de la vid, cerca del desborre, es baja, porque es cuando los contenidos de agua en el suelo se aproximan a capacidad de campo, y el consumo queda definido principalmente por la demanda atmosférica (ET_0) que es baja. A medida que avanza el ciclo los contenidos de humedad del suelo disminuyen aumentando las resistencias para la absorción de agua, y es la vid quién ejerce un mayor control sobre la transpiración (Smart y Coombe, 1983), coincidiendo con un *canopy* completamente desarrollado y con tasas

máximas de ET_0 (Hardie y Considine, 1976; Van Rooyen et al., 1980; Prior y Grieve, 1987; Williams y Grimes, 1987; Mullins et al., 1992) siendo máxima la demanda del viñedo.

En la región semiárida donde se realizó el ensayo las limitaciones al crecimiento vegetativo comienzan en floración, cuando los contenidos de agua en el suelo no satisfacen la demanda de la planta, debido a las condiciones climáticas (elevación de la demanda atmosférica) y a la superficie foliar alcanzada. Las limitaciones de agua, continúan en la etapa estival, con veranos cálidos y escasas o nulas precipitaciones, dónde la planta tiene que desarrollarse y producir en función de la reserva de agua acumulada en el suelo durante el periodo de reposo. Y esta limitación hídrica puede llegar a ser máxima en la etapa de maduración de la baya.

El crecimiento vegetativo se ve afectado por las condiciones ambientales, si existen limitaciones de agua en verano entonces el crecimiento vegetativo puede finalizar entre Julio y Agosto, debido a que el meristemo terminal dejará de funcionar, se desecará y caerá. Pero si no existen limitaciones hídricas en verano, el crecimiento se puede prolongar, finalizando en Septiembre u Octubre.

Si el ciclo se acorta y el crecimiento es rápido, la planta puede llegar a una situación de senescencia foliar precoz debido a la limitación de agua, este efecto causaría una prematura bajada de la actividad fotosintética en la planta provocando un desequilibrio en la acumulación de fotoasimilados en los racimos y en las reservas de la planta. Por otro lado, la senescencia foliar precoz, causaría una sobreexposición de los racimos a la radiación solar, al dejar desprovistas de hojas esta zona. Esto supone iluminaciones y temperaturas elevadas en la baya, provocando una mayor transpiración de las mismas, que se puede traducir en pasificación y pérdida de peso. También provocaría una mayor incidencia de oxidaciones y combustión (quemaduras) e inhibición de procesos de síntesis, cómo: incidencia de oxidaciones, disminución del contenido en ácidos (especialmente málico), reducción del color al frenar la síntesis y provocar oxidaciones de antocianos, pérdida de aromas por oxidaciones de fenoles y combustión de sustancias aromáticas (Reynolds et al. 1986); (Gao *et al.*, 1994); (Bergquist et al. 2001); (Carbonneau et al. 2004); (Reynolds et al. 2005).

La disponibilidad de agua puede influir también en la capacidad fotosintética de la planta y, por consiguiente, en el suministro de asimilados. Los carbohidratos producidos en la fotosíntesis son utilizados para formar nuevos tejidos y estructuras, y

mantener las existentes, esto se traduce en la formación y acumulación de materia seca vegetativa y reproductiva.

En la mayoría de las zonas vitivinícolas de España, y en concreto la de la zona centro, se vienen produciendo, desde hace varios años, uvas que presentan elevada concentración de azúcar, acidez baja y pH alto, lo que da lugar a vinos con graduaciones alcohólicas muy elevadas, acidez baja, u obligadamente corregida, y pH alto. Estos hechos representan en ocasiones situaciones no deseadas: en unos casos porque los mercados demandan vinos de graduación alcohólica más baja; y en otros casos porque se producen desequilibrios entre los componentes tanto en la uva como en el vino. La elevación del contenido en azúcar y del pH, en parte son debidos a que se persiguen, en vinos tintos, madureces más completas de los hollejos, y esto precisa de periodos prolongados durante los cuales la uva continua acumulando azúcar y potasio en la pulpa, y en ocasiones perdiendo agua en exceso.

Este marco de circunstancias hace que reconsideremos el manejo del viñedo. Empezando por la aplicación de agua de riego. Esta técnica de cultivo tiene como objetivo general controlar la expresión natural de la planta en un medio determinado. Sin embargo, el riego permite alcanzar otros objetivos específicos, entre los que se pueden destacar; el control del desarrollo vegetativo en primavera. Además, con el riego se puede controlar la maduración a través del alargamiento o acortamiento del ciclo, o a través del control del tamaño de la baya, o del contenido en azúcares, o del retraso en la degradación de los ácidos y mantenimiento del pH, entre otros. También con el riego se puede evitar la senescencia precoz de las hojas, y con ello, se puede evitar la sobreexposición de racimos y pasificación de bayas. Con el manejo del riego se puede evitar la deshidratación de bayas en la fase I, y se puede redireccionar los azúcares para desarrollo vegetativo durante la fase III de la baya. También se puede disminuir la temperatura foliar con el manejo del riego, y aumentar la acumulación de sustancias de reserva tras vendimia, entre otros.

Tradicionalmente, en un primer momento se estableció que en la fase de desarrollo de la baya había que suministrarle a la planta todo el agua que necesitase, para luego someterla a un cierto déficit hídrico en la fase final de maduración de la baya (Williams, 1990). Pero son posibles otras estrategias, como aquellas en las que se somete a un cierto déficit hídrico a la planta en el periodo de desarrollo y crecimiento del fruto para luego incrementar la dosis de riego tras el envero (McCarthy, 1997).

Las estrategias de riego centradas en los periodos anterior y posterior al envero tienen que tener presente el desarrollo y metabolismo de la baya. Desde cuajado hasta la madurez de la uva se distinguen tres fases de crecimiento de la baya:

- En la Fase I, existe una intensa división celular, dónde las bayas crecen por proliferación y alargamiento, alcanzando la baya, al final de esta fase, el 40-60 % de su tamaño definitivo.
- En la Fase II, el crecimiento está más o menos ralentizado, y las pepitas adquieren su constitución definitiva, alcanzando su madurez fisiológica. En estas dos fases la baya es verde, clorofílica. Pero, al final de la fase II, el contenido en clorofila y las tasas de fotosíntesis y respiración decrecen, hasta que al final en el envero, la baya pierde su carácter clorofílico y adquiere la coloración característica de la variedad, reanudándose el crecimiento de la baya.
- El envero determina el inicio de la maduración o Fase III. En esta fase la baya se desarrolla rápidamente debido, principalmente, a la acumulación de agua y de azúcares.

I.2. HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS.

En regiones semiáridas la viticultura se enfrenta a maduraciones de la uva desequilibradas, debido principalmente a la elevación de las temperaturas y al aumento del déficit hídrico en el periodo activo de la vid. Para conseguir la sostenibilidad del cultivo hay que reconsiderar muchos de los aspectos de la conducción y manejo del viñedo, que hasta ahora se consideraban apropiados.

Hay numerosos estudios basados en la reducción de los volúmenes de agua a aplicar sin afectar negativamente a la marcha del cultivo. Suministrándose menos agua de la que potencialmente transpira la planta, aumentando, así, las características cualitativas del mosto.

La aplicación con éxito de estas técnicas (¿cuánta cantidad y cuándo?) precisa de un conocimiento profundo de la fisiología de la vid y de cómo influyen los diferentes factores internos y ambientales en la marcha del crecimiento de sus diferentes órganos, en las relaciones fuente-sumidero, en el metabolismo de la baya, etc.

Por otro lado, la disponibilidad de agua a lo largo del ciclo de la vid influye, de modo decisivo en la capacidad fotosintética de la planta y en su respuesta a la variación de las condiciones ambientales. Además, el agua es un factor determinante en el desarrollo radicular, y esto tiene una gran importancia en el crecimiento del cultivo, en el desarrollo vegetativo y reproductivo, y en el rendimiento potencial.

El Cabernet Sauvignon, es una de las variedades tintas de mayor reconocimiento en el mundo, además es una de las 10 variedades más cultivadas en España, comprende unas 22000 ha, (MAGRAMA; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013), y es la variedad extranjera que más superficie ocupa en nuestro país por delante de las variedades: Syrah y Merlot. Es originaria de Burdeos. Altamente rica en taninos y colores, lo que la hace especialmente adecuada para la crianza.

Existen numerosos estudios, dónde se ha investigado el efecto del riego deficitario en la vid, comparando, la mayoría de las veces, cepas regadas con cepas no regadas, pero existe poca información cuantitativa disponible para determinar los niveles óptimos de déficit de agua en diferentes momentos fenológicos durante el periodo activo de la vid. El presente trabajo se centra en el estudio en la modificación del déficit hídrico continuo aplicado en los periodos anterior y posterior al envero, en cómo afecta dicho déficit al aprovechamiento de los recursos ambientales y a la respuesta del viñedo. Y para ello parte de la siguiente hipótesis:

El déficit hídrico moderado aplicado en los periodos anterior y posterior al envero se podría utilizar en climas cálidos con la variedad Cabernet Sauvignon, con la finalidad de conseguir un desarrollo de la cubierta vegetal (*canopy*) óptimo, que permita alcanzar la productividad potencial con la calidad deseada y que asegure una correcta maduración de las partes permanentes leñosas, responsables del desarrollo y la fertilidad del siguiente año.

Si el papel del agua es fundamental en el desarrollo y crecimiento radicular, así como en el transporte de sustancias del suelo a la planta, y el riego permite manipular el contenido volumétrico de agua en el suelo en la zona de raíces, entonces, una gestión adecuada del riego podrá provocar cambios favorables en la zona de máxima presencia radicular favoreciendo la absorción de agua y sustancias minerales por las raíces a la planta.

Por otro lado, el agua es un factor importante en la actividad fotosintética de la planta, así como en la regulación estomática, y en la transpiración. Por lo que la utilización de agua de riego va a permitir manipular el estado hídrico de la planta en regiones semiáridas. Entonces una gestión razonada del riego va a provocar cambios favorables en la fotosíntesis, en la regulación estomática y en la transpiración de la planta.

Además con el déficit hídrico moderado aplicado en los periodos anterior y/o posterior al envero se podrá obtener uvas con concentraciones moderadas de azúcar (no excesivas), buena acidez (no baja), pH bajos, con una correcta maduración de la piel tanto fenólica como aromática y pepitas maduras.

Así, el **objetivo principal** de este trabajo fue conocer para el cv. Cabernet Sauvignon, el efecto del déficit hídrico aplicado en los periodos anterior y posterior al envero, en el contenido volumétrico de agua en el suelo, en la fisiología de la planta, en el rendimiento de la cepa y en la calidad de la uva.

De forma más específica se plantearon los siguientes objetivos:

- Conocer cómo déficits hídricos estacionales con diferentes intensidades afectan a la variación del contenido volumétrico de agua en el suelo en las tres zonas de estudio: en la línea de plantación, en el centro de la calle y en la zona intermedia entre la línea de plantación y el centro de la calle. Cómo afectan al cómputo de la calle y en general cómo afectan a la variación global del viñedo.

- Comparar los efectos del régimen hídrico en el contenido de humedad del suelo en la zona de máxima densidad de raíces por ser la de mayor absorción y variación.
- Evaluar el efecto del riego deficitario estacional y con diferente intensidad en el consumo de agua del viñedo en los estados fenológicos de floración, cierre de racimos, envero, vendimia y final de riego; se evaluó también en los periodos anterior y posterior al cambio de riego.
- Conocer cómo déficits hídricos estacionales con diferentes intensidades afectan al comportamiento fisiológico de la planta a lo largo del ciclo.
- Estudiar qué indicador del estado hídrico de la planta es más sensible en condiciones de déficit hídrico moderado.
- Conocer cómo déficit hídricos estacionales con diferentes intensidades afectan al desarrollo vegetativo y a la productividad de la cepa con el fin de poder definir estrategias de riego que logren mejoras el equilibrio de la planta. Y para ello se estudió:
 - o La evaluación de los efectos de la disponibilidad hídrica en el desarrollo y crecimiento vegetativo y en su disposición.
 - o La determinación de los efectos de la disponibilidad hídrica en la producción de uva y sus componentes.
 - o La influencia de la disponibilidad hídrica en el equilibrio entre la parte vegetativa y productiva de la planta.
 - o Y se ha cuantificado la influencia del grado de déficit hídrico en la acumulación de materia seca y su distribución.
- Comparar los efectos de las diferentes estrategias de riego en la eficiencia de la planta y en el uso del agua en condiciones semiáridas.
- Evaluar la relación entre el volumen de agua recibido por el viñedo (riego mas lluvia) desde brotación por un lado, y desde floración por otro lado, con el rendimiento y sus componentes.
- Estudiar el metabolismo y la composición química de la baya, con el fin de poder definir estrategias de riego que logren mejorar las características cualitativas de la baya para la producción de vinos equilibrados, con una adecuada carga polifenólica para su envejecimiento y con unas características organolépticas favorables para la producción de vino tinto. Para ello se estudió:
 - o Las características meteorológicas de cada año centrándonos en dos etapas influyentes en el crecimiento y maduración de la baya. Por un lado se ha estudiado, una primera etapa que comprende, desde cuajado a pre-

envero y; por otro lado se ha estudiado, una segunda etapa que comprende desde pre-envero hasta vendimia.

- El estado hídrico de la planta desde cuajado hasta vendimia.
 - La influencia de la disponibilidad hídrica en la maduración y composición final de la baya.
- Y por último, evaluar y comparar los efectos de las diferentes estrategias de riego en la evolución, desde cuajado a vendimia, de los componentes químicos; como: sólidos solubles totales, acidez total titulable, pH y compuestos fenólicos, en condiciones semiáridas.

I.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

El presente trabajo se compone de ocho capítulos.

En los **capítulos I, II y III** se da una visión general del déficit hídrico continuo en los periodos anterior y posterior al envero en el viñedo. Acompañado de una revisión bibliográfica y del estudio del estado actual del déficit hídrico, enunciándose así, las hipótesis del trabajo de investigación y planteándose unos objetivos generales y otros más específicos. Además se exponen los materiales y metodologías generales empleados en el desarrollo de este trabajo, procurando describir de forma detallada las características de los ensayos, las condiciones ambientales en las que éstos se desarrollaron, los dispositivos y controles experimentales, y la metodología de análisis de los resultados obtenidos.

Los **capítulos IV, V, VI y VII** son el núcleo central del trabajo. Cada uno de ellos se estructura en un resumen del capítulo, en una introducción, en un material y métodos específicos, en unos resultados y en una discusión. Estos cuatro capítulos principales reflejan la influencia del déficit hídrico continuo aplicado en los periodos anterior y posterior al envero en la evolución de la humedad del suelo y en el consumo (capítulo IV); en la respuesta fisiológica de la planta (capítulo V); en la respuesta agronómica del viñedo, en la producción de biomasa y eficiencia de la planta (capítulo VI); y en las consecuencias en la evolución de la maduración y calidad de la uva (capítulo VII).

En el **capítulo VIII** se presentan las conclusiones generales y específicas del trabajo de investigación. Tomando como punto de partida las hipótesis enunciadas en el capítulo I.

I.4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Albuquerque-Regina, M. (1993). Responses des cepages de *Vitis vinifera* L. aux variations de l'environnement: effets de la contrainte hydrique sur la photosynthese, la photorespiration et la teneur en acide abscissique des feuilles. Francia., Universite de Bordeaux II: 213.
- Bergquist, J., N. Dokoozlian, et al. (2001). Sunlight exposure temperature effects on berry growth and composition of Cabernet-Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California. *Am.J.Enol. Vitic.* 52(1).
- Carbonneau, A. and P. Costanza (2004). Response of vine leaf water potential to quick variation in canopy exposure. Example of canopy opening manipulation of merlot. (*Vitis vinifera* L.). *Sciences de la Vigne et du Vin* 38/1: 27-33.
- Gao, Y. and G. A. Cahoon (1994). Cluster shading effects on fruit quality, fruit skin color, and anthocyanin content and composition in Reliance (*Vitis* hybrid). *Vitis* 33: 205-209.
- Hardie, W. J. and J. A. Considine 1976. Response of grapes to water deficit stress in particular stages of development. *American Journal of Enology and Viticulture* 27: 55-61
- Mullins, M. G., A. Bouquet and L. E. Williams. 1992. Developmental physiology: the vegetative grapevine. *Biology of the grapevine*. M. G. B. Mullins, A. Williams. L.E. Cambridge. U.K, Cambridge University Press: 80-111.
- Prior, L. D. and Grieve, A. M. 1986. Water use and irrigation requirements of grapevine. *Proc. VI Australian wine industry Technical Conference*. Adelaide, South Australia.: 14-17.
- Reynolds, A. G., R. M. Pool, et al. (1986). Influence de l'exposition des grappes sur la composition des fruits et la qualité des vins (var. Seyval blanc). *Vitis* 25: 85-95.
- Reynolds, A. G., T. Molek, et al. (2005). Timing of shoot thinning in *Vitis vinifera*: Impacts on yield and fruit composition variables. *Am. J. Enol. Vitic.* 56(4): 343-356.
- Smart, R. E. and B. G. Coombe 1983. Water relations of grapevines. Water deficits and plant growth. T. T. Kozlowski. New York, Academic Press. VII: 137-196.
- Van Rooyen, F. C., H. W. Weber and I. Levin. 1980. The response of grapes to manipulation of the soil-plant-atmosphere continuum. I Growth, yield and quality response. *Agrechemo-physica* 12: 59-68
- Williams, L. E. and D. W. Grimes. 1987. Modelling vine growth- development of a data set for a water balance subroutine. *Proceedings of VI Australian wine industry Technical Conference*, South Australia, 169-174.

CAPÍTULO II:

INTRODUCCIÓN GENERAL A LOS EFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (Vitis vinifera L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO.

II.1	RELACIÓN DE LA VID CON EL AGUA.....	15
II.2	EFECTOS DEL DÉFICIT HÍDRICO DURANTE EL CICLO VEGETATIVO.....	16
II.3	EFECTOS FAVORABLES O DESFAVORABLES DEL DÉFICIT HÍDRICO EN LA VID.....	18
	II.3.1 Efectos sobre la fisiología de la vid.....	18
	II.3.2 Efectos sobre el desarrollo vegetativo.....	22
	II.3.3 Efectos sobre el rendimiento.....	24
	II.3.4 Efectos sobre la composición de la uva (calidad).....	25
II.4	HERRAMIENTAS PARA EVALUAR EL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA..	27
II.5	ESTRATEGIAS DE RIEGO.....	32
II.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN GENERAL A LOS EFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (*Vitis vinifera* L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO.

II.1 RELACIÓN DE LA VID CON EL AGUA.

El cultivo de la vid consta de un elevado grado de adaptación a las condiciones de estrés hídrico. Sus necesidades de agua son bajas, la vid precisa de 300 a 800 litros de agua para producir 1 kg de materia seca (Lissarrague, 1997), siendo inferior a la de otros cultivos mediterráneos. La capacidad de sus raíces de profundizar en el suelo junto con su gran poder de succión, contribuye a que el cultivo de la vid se pueda dar en secano.

La vid se muestra resistente a las escasas precipitaciones, a los largos periodos de sequía, a las temperaturas extremas en verano que sobrepasan los 40°C. Todo esto se puede traducir en bajas producciones. Incluso, una falta de agua prolongada en el periodo estival puede dar lugar al descenso de la calidad, como puede suceder en condiciones áridas o semiáridas, dónde el riego puede llegar a ser indispensable.

A pesar de su marcada resistencia a la sequía la vid es una planta que requiere una alimentación hídrica equilibrada y suficiente para mostrar todo su potencial (García-Escudero, 2007). La disponibilidad hídrica influye favorablemente en la producción, con una incidencia directa en la calidad y en la producción dentro de un mismo potencial vegetativo (Hidalgo, 2011).

El componente principal de todo protoplasma fisiológicamente activo es el agua, viene a representar del 80 al 90 % del peso fresco total de la planta. (Martínez de Toda, 1991). El agua además de constituir gran parte de los órganos herbáceos y agostados, actúa como vehículo de las materias tomadas por las raíces y elaboradas en las hojas. También es reactivo en la fotosíntesis, en la hidrólisis de almidón, componente del protoplasma, disolvente de sustancias gaseosas, minerales, etc. y es factor esencial para la turgescencia, condición indispensable para la acción de los estomas y del crecimiento.

El agua es un elemento primordial para la planta. Es limitante y condicionante absoluto de las funciones de absorción y circulación, de la transpiración y de la fotosíntesis y, por tanto, del desarrollo vegetativo, crecimiento y maduración de los frutos (Lissarrague, 1997).

En las condiciones de cultivo tradicional el viñedo se encuentra en una situación deficitaria en agua, de ahí la necesidad del riego. El uso del riego en la viticultura actual proporciona la supervivencia de la planta en las primeras fases y garantiza una producción más estable. La viña es uno de los cultivos donde es más rentable la utilización del agua puesto que con la aportación de pequeñas cantidades se logra una producción estable y de mayor calidad.

El cultivo de la vid en España se realiza fundamentalmente en secano, ocupando el regadío un 34 % de la superficie total, según estadísticas del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente correspondiente al año 2013.

II.2 EFECTOS DEL DÉFICIT HÍDRICO DURANTE EL CICLO VEGETATIVO.

La baja disponibilidad de agua para la planta se verá reflejada en la vid según sea la intensidad del déficit y el estado de crecimiento en el que se encuentre la planta. Diversos autores como: Romero *et al.* (2010); Wample (2000), Williams *et al.* (1994), Düring (1987), McCarthy *et al.* (1992), entre otros, han estudiado los efectos del déficit hídrico en la planta según el estado fenológico en el que se encuentre, observando los efectos sobre el crecimiento, el desarrollo y la fisiología de la planta.

Durante la **brotación** y en las primeras fases del crecimiento del pámpano, es raro que exista estrés hídrico, salvo excepciones, como puede ser años con inviernos extremadamente secos o viñedos establecidos en suelos poco profundos o con muy poca disponibilidad hídrica. Además en esta fase el crecimiento se efectúa a partir de los carbohidratos almacenados en ciclos anteriores (Godoy Ávila *et al.*, 1990b; Keller *et al.*, 1995). El estrés hídrico en esta fase puede provocar brotaciones irregulares y crecimientos disminuido de los pámpanos. Bajo severas condiciones de estrés hídrico, se pueden producir deficiencias nutricionales, especialmente en nitrógeno, calcio y magnesio. En cambio, un exceso de agua en el suelo, lleva a producir encharcamiento, y de esta forma una deficiencia en oxígeno, produciendo ralentización del crecimiento de los brotes, amarilleamiento de las hojas y la muerte de la planta (McCarthy *et al.*, 1992).

La **floración** y el **cuajado** son estados muy sensibles al déficit hídrico, porque incluyen procesos de abscisión y división celular (McCarthy, *et al.*, 1992). Después de floración el consumo de la planta aumenta considerablemente, debido, por un lado, al desarrollo foliar del canopy, el cual se aproxima a su forma final y; por otro lado, a las condiciones medioambientales, como es el aumento de la temperatura y la baja

humedad del periodo en cuestión. Un estrés más severo y prolongado disminuye el crecimiento de las flores y reduce la viabilidad del pistilo y del polen, reduciendo el cuajado (Hardie and Considine, 1976), provocando el aborto de las flores y la abscisión del racimo (Düring, 1987) posiblemente asociado a cambios hormonales. Si existe estrés hídrico durante la diferenciación del racimo, se va a reducir la fertilidad de la planta, reduciéndose, al año siguiente, el número de racimos por pámpano. El primer crecimiento de la raíz ocurre durante este periodo y puede ser inhibida por la sequía o el encharcamiento. Después del cuajado, el estrés hídrico puede reducir la división y el alargamiento celular, produciendo bayas de menor tamaño y, por consiguiente, rendimientos menores.

El estrés hídrico en la fase de **maduración**, puede provocar el envejecimiento prematuro de las hojas que las haga no funcionales y que no contribuyan con efectividad al suministro de fotoasimilados a la baya, ya que se limita la capacidad fotosintética de la planta. Esto va a afectar a la composición y a la calidad de la uva, de manera que disminuye la acumulación de sólidos solubles, aumenta el pH, disminuye la acidez y se reduce la cantidad de sustancias antociánicas sintetizadas (Williams, 1996). Con el envejecimiento foliar se produce la abscisión y caída de las hojas en las zonas más bajas del canopy, disminuyendo aún más la superficie foliar efectiva. Esta falta de actividad foliar, además de afectar negativamente a la maduración del fruto, tendrá un efecto negativo en la acumulación de reservas en los órganos permanentes de la planta, que condicionará el crecimiento en el siguiente ciclo, por lo que provocará efectos negativos en el desarrollo posterior. De enero a vendimia es un periodo en el cual la demanda de carbono por parte de las bayas en maduración es muy grande (Coombe 1992).

Después de la **vendimia**, el déficit hídrico reduce la renovación y crecimiento de raíces y acelera la caída de hojas, reduciendo la acumulación de carbohidratos y nitrógeno en las zonas de reserva. Pudiendo influir negativamente en el crecimiento de las yemas y los brotes del año siguiente.

II.3 EFECTOS FAVORABLES O DESFAVORABLES DEL DÉFICIT HÍDRICO EN LA VID.

El déficit hídrico del suelo reduce el crecimiento vegetativo y reproductivo de la vid (Matthews and Anderson 1989; Grimes and Williams 1990; Williams and Matthews 1990; McCarthy 2000; Marsal *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2010 a, b); y como consecuencia de todo esto, la fisiología de la planta, la composición de la baya y las cualidades sensoriales del vino también se ven afectadas (Roby *et al.*, 2004). Sin embargo el riego y las precipitaciones mitigan el efecto negativo del déficit sobre la productividad de la planta (Matthews and Anderson 1989; McCarthy 2000; Williams *et al.*, 2010 a, b).

II.3.1 EFECTOS SOBRE LA FISIOLOGÍA DE LA VID:

Vitis vinifera L. está considerada como una especie adaptada a la sequía, porque presenta mecanismos de resistencia a la escasez de agua a través de procesos morfológicos y fisiológicos, como disminuir su desarrollo foliar o aumentar la resistencia estomática o reducir su potencial hídrico (Zamboni and Iacono 1988). Sin embargo, si el déficit hídrico persiste y se combina con otros factores climáticos como: altos niveles de radiación solar; temperaturas elevadas y/o déficit de presión de vapor (VPD) alto, dichas respuestas pueden provocar una reducción de la eficacia fotosintética, de la conductancia estomática y de la transpiración (Smart 1974; Matthews and Anderson 1989; Naor *et al.*, 1994; Ginestar *et al.*, 1998; Escalona *et al.* 1999; Zufferey 2000; Lawlor 2002; Romero *et al.*, 2010), limitando la asimilación de CO₂ (Flexas *et al.*, 1998; Williams 2012).

Asimilación de CO₂:

El déficit hídrico influye en la actividad fotosintética induciendo el cierre estomático lo que provoca una reducción de la transpiración, pero también una disminución de la absorción de CO₂ y por tanto de la fotosíntesis, limitando la productividad de la cepa (Medrano *et al.*, 2003), llegando incluso en condiciones de sequía extrema a paralizarse la función clorofílica y a afectar directamente a la maduración de la baya.

Medrano *et al.* (2007) concluyen que la mayor parte de la disminución de la tasa fotosintética en condiciones deficitarias es generada por el cierre estomático. Debido principalmente a la fuerte correlación curvilínea existente entre la conductancia estomática (*g_s*) y la tasa de fotosíntesis neta (*A_n*) (Dürin 1987; Escalona *et al.*, 1999;

Flexas *et al.*, 2002a; Cuevas *et al.*, 2006). Y al hecho de que el cierre estomático constituye una de las primeras respuestas de la planta frente al estrés hídrico.

Se pueden llegar a establecer tres niveles de inhibición de la fotosíntesis al utilizar la conductancia estomática como parámetro indicador del estrés hídrico de la planta:

Primero: $g_s > 150 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; donde predominan los efectos estomáticos. Disminuyen g_s y A_n , con un incremento progresivo en la eficiencia intrínseca en el uso del agua (A_n/g_s).

Segundo: $150 < g_s < 50 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; en la que los efectos estomáticos siguen siendo predominantes, aún así, en esta fase los efectos no estomáticos como fotoquímica, ciclo de Calvin, conductancia del mesófilo, etc., comienzan a ser detectables.

Tercero: $g_s < 50 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; los efectos no estomáticos son dominantes

Conductancia estomática (g_s):

A menudo, uno de los primeros efectos de la baja disponibilidad de agua en el suelo anterior a las primeras caídas en el potencial hídrico foliar es la reducción de la apertura estomática en las hojas.

Düring *et al.* (1996) estudiaron la relación entre el **déficit hídrico** y el cierre estomático utilizando el modelo de Tardieu, *et al.* (1993) que integra señales químicas e hidráulicas implicadas en el cierre estomático, llegando a la conclusión de que el intercambio gaseoso y los procesos de crecimiento están afectados por la duración y la intensidad del estrés, indicando que los cambios diarios normales de la conductancia estomática, parecen ser causados por la sensibilidad del estoma al ácido abscísico (*ABA*). Al aumentar el déficit hídrico del suelo, aumentará la concentración de *ABA* en el xilema, lo que mejorará la eficiencia en el uso del agua y la adaptación del crecimiento vegetativo. Y que sólo en casos extremos, con un déficit hídrico severo, las hojas comenzarán a sintetizar *ABA* causando el cierre total de los estomas. Correia *et al.* (1995) también comprobaron que las concentraciones de *ABA* del xilema incrementan al aumentar la falta de agua en el suelo, señalando además, que la velocidad de transporte del *ABA* cambia poco durante el día y que la concentración de *ABA* del xilema determina la conductancia máxima diaria de la hoja.

Se han efectuado numerosos estudios sobre la respuesta del comportamiento estomático al déficit hídrico en diferentes zonas y condiciones y para distintos cultivos (Shellie *et al.*, 2014; Bavestrello – Riquelme *et al.*, 2012; Rogiers *et al.*, 2011;

Rodríguez *et al.*, 2011; Prieto *et al.*, 2010; Sánchez de Miguel, 2007). Obteniéndose respuestas variadas; por un lado existe una correspondencia clara entre la caída de potencial hídrico y la conductancia estomática y en otros casos, no es posible evidenciar dicha correspondencia. Algunos autores (Schultz 2003; Soar *et al.*, 2006) llegaron a la conclusión de que según como sea la respuesta de la planta al déficit hídrico en *Vitis vinifera* L. se pueden diferenciar dos grupos de plantas con comportamientos diferentes:

- Las variedades **isohídricas** responden al déficit hídrico modificando su crecimiento y su fisiología para conservar y no agotar el agua que disponen y así escapar de las situaciones extremas de estrés que comprometen su estado hídrico, y lo hacen, principalmente, a través de la regulación estomática. A lo largo del día, y frente al incremento de la demanda evapotranspirativa de la atmósfera, ψ_f de estas plantas se mantiene relativamente constante y con valores independientes del contenido de agua en el suelo. En estas variedades los estomas parecen más sensibles a los cambios en el déficit de presión de vapor y en las temperaturas, ya que una fuerte demanda atmosférica parece provocar cambios en la sensibilidad al ABA de los estomas (Soar *et al.*, 2006). Por otro lado, son variedades con mayor conductividad hidráulica en los tallos, y principalmente en los peciolos, lo que las hace más sensibles a la cavitación, de tal forma que el cierre estomático se produce con ψ_f más altos, evitando daños por déficit hídrico (Schultz 2003). Los cultivares con conducta isohídrica son capaces de mantener el control de ψ_f en un rango de condiciones medioambientales.

- Las variedades **anhisoídricas**, responden utilizando todo el agua disponible para su crecimiento y fisiología, a la espera de que el nivel de agua se mantenga a lo largo del ciclo, pudiendo llegar a comprometer su supervivencia frente al agotamiento de la humedad del suelo. ψ_f decrece frente al aumento de la demanda evaporativa en la atmósfera y alcanza un valor más bajo en plantas con déficit hídrico que en plantas hidratadas (Schultz 2003; Soar *et al.*, 2006). Son plantas que maximizan su apertura estomática, y por lo tanto asimilación de CO₂, exponiéndose al riesgo del embolismo. En estas plantas las demandas evaporativas y las temperaturas altas no provocan cambios en la sensibilidad al ABA de los estomas porque tampoco parece que se aumente su concentración en el flujo xilemático (Soar *et al.*, 2006). Las plantas típicas anisoídricas exhiben pérdidas en el control estomático a través de la demanda evapotranspirativa y la humedad del suelo, permitiendo grandes fluctuaciones en el ψ_f ,

el cual oscila en respuesta a los cambios del medio (Tardien and Simonneau, 1998). El **Cabernet Sauvignon** tiene un comportamiento anisohídrico (Rogiers *et al.*, 2009).

La pérdida de agua disminuye con el cierre estomático más que con la reducción en el consumo de CO₂, debido a las diferencias entre el gradiente de presión de vapor del agua y CO₂ dentro y fuera de las hojas (Raven 2002). Por otro lado Jarvis and Mc Naughton (1986) señalan que el cierre estomático puede reducir inicialmente la pérdida de agua pero esto le da lugar a un aumento de la temperatura foliar lo que aumentará la transpiración de la planta, cancelando el impacto del cierre estomático.

Transpiración (E):

La transpiración estomática proporciona la mayor parte de la energía necesaria para el movimiento del agua a través de la planta al establecer un gradiente de potencial hídrico, permitiendo el transporte de los nutrientes absorbidos por las raíces hasta las partes aéreas de la planta. Además, en condiciones de buena disponibilidad hídrica, la transpiración puede intervenir en la regulación térmica de las hojas contribuyendo a disipar parte del exceso de energía (Mullins *et al.* 1992; Sánchez-Díaz *et al.* 1996a).

El proceso fisiológico de la transpiración está impulsado principalmente por la cantidad de energía solar interceptada por el canopy, la humedad del aire, el viento y la disponibilidad de agua en el suelo (Hetherington and Woodward 2003).

La resistencia estomática ejerce un significativo control en la tasa de transpiración en condiciones hídricas limitantes. La importancia de esta regulación estomática en la transpiración queda puesta de manifiesto en la correlación positiva encontrada entre g_s y E por Bartolomé (1993). También queda reflejada en la similitud encontrada por Archer *et al.* (1990) entre las pautas de evolución diaria y estacional de g_s y E .

La transpiración es sensible al régimen hídrico, así, la ausencia de estrés hídrico permite que la apertura de los estomas no resulte limitante para la E y que ésta se produzca al máximo ritmo determinado por la conductancia hidráulica entre el suelo y la planta y por la demanda evaporativa de la atmósfera (Williams *et al.* 1994). Pero si la disponibilidad hídrica comienza a ser limitante, la transpiración se verá disminuida

Potencial hídrico foliar (ψ_f):

El potencial hídrico foliar (ψ_f) indica el estado hídrico del sistema suelo-planta-atmósfera (Sanchez de Miguel 2007). La medida del potencial a lo largo del día es la resultante de los diversos mecanismos de regulación del estado hídrico de las hojas que se localizan en un suelo con un determinado potencial hídrico y en un ambiente con una determinada demanda atmosférica (Van Zyl and Weber 1977; Champagnol 1984). Cuando las hojas se deshidratan, su potencial hídrico se hace más negativo y la fotosíntesis se reduce.

Mullins *et al.* (1992) y Myburgh (2003) describen la trayectoria diaria del potencial hídrico foliar que parte de los máximos valores justo antes del amanecer y que, tras la salida del sol, inicia un rápido descenso hasta alcanzar valores mínimos en torno al mediodía. A continuación comienza una rápida recuperación hasta la puesta del sol y entonces prosigue su incremento algo más lento hasta volver a alcanzar de nuevo valores máximos poco antes del siguiente amanecer.

La evolución diaria del ψ_f difiere entre plantas regadas y no regadas, siendo las plantas con mayor estrés las que alcanzan generalmente valores menores de potencial, sobre todo en las horas de mayor demanda atmosférica (Girona, 1994; Grimes and Williams, 1990; Kliewer *et al.*, 1983). Por otro lado, el progresivo agotamiento del agua en el suelo a lo largo de la estación induce el cierre estomático y tiende a mantener el potencial al mediodía en un valor constante para tratar de evitar severas pérdidas de agua (Van Leeuwen *et al.*, 2001).

Dufourcq *et al.* (2005) observó que las plantas con mayor desarrollo vegetativo tienen una mayor transpiración y por tanto un consumo más intenso de agua. Esto hace que según avanza el ciclo, dichas plantas, agoten más intensamente las reservas de agua en el suelo y presenten valores de ψ_f inferiores a los existentes en plantas con menor desarrollo vegetativo.

II.3.2 EFECTOS SOBRE EL DESARROLLO VEGETATIVO:

La interacción entre el clima, el tamaño del *canopy* y la distribución de la superficie foliar definen el tamaño de la fuente, es decir, el área foliar funcional (Poni *et al.* 2006). El desarrollo foliar es uno de los procesos más sensible a la limitación de agua, reduciendo su tamaño y la producción de fotoasimilados.

El estado hídrico de la planta condiciona el crecimiento vegetativo. Por un lado la escasez de agua durante el desarrollo foliar reduce el crecimiento de los pámpanos y produce hojas de menor tamaño disminuyendo la superficie foliar, y por tanto, la producción de fotoasimilados (Lissarrague, 1997). Y por otro lado acelera la parada de crecimiento (Kliewer, *et al.*, 1983; Matthews, *et al.*, 1987; Paranychianakis, *et al.*, 2004; Poni, *et al.*, 1994). Además la falta de agua favorece la pérdida de hojas basales, las más viejas y las menos eficientes en el uso del agua (Bertamini *et al.*, 1995), adelantando la senescencia foliar, reduciendo la vida activa de las hojas y limitando la producción de azúcares.

Deloire, *et al.* (2004) resumen los efectos del déficit hídrico en el desarrollo vegetativo de la planta, produciéndose la reducción de la masa foliar a medida que el déficit aumenta a partir de cierto nivel de tolerancia a la sequía, propio en la vid (Prior, *et al.*, 1986), aunque, los efectos del déficit hídrico son distintos en función del estado de desarrollo en que se encuentren las plantas (Wample, 2000).

Por otro lado la disponibilidad de agua favorece el desarrollo radicular, puede retrasar el comienzo del agostamiento alargando el ciclo vegetativo (Lissarrague, 1997) y también favorece el vigor de la cepa, el cual es definido por el peso del sarmiento (Smart *et al.*, 1991) o peso de madera de poda. Sánchez-Llorente (2004) comprobó la influencia del riego en la producción de madera, obteniendo una relación lineal entre el consumo de agua y la producción de madera de poda. Yuste (1995), Bartolomé (1993), y Cuevas (2001) observaron un incremento en el peso de madera de poda con el riego.

Consumo de agua y desarrollo foliar están íntimamente relacionados, de forma que a mayor desarrollo foliar mayor consumo de agua. Al principio del ciclo, en el período de crecimiento vegetativo, un mejor estado hídrico supone un mayor crecimiento. Por otra parte, en fases avanzadas del ciclo, cuando la disponibilidad de agua es más limitada, un mayor desarrollo foliar implica mayor consumo de agua y, por tanto, peor estado hídrico (Linares 2009).

Antes del envero debería atenuarse o pararse el crecimiento vegetativo para no verse comprometida la maduración del racimo, porque si el pámpano sigue creciendo durante la maduración de la baya, este competiría con el racimo por los productos de la fotosíntesis. O, al contrario, si la parada de crecimiento ocurre muy pronto puede suceder que no se haya desarrollado el suficiente número de hojas para proporcionar los fotoasimilados necesarios para una correcta maduración del racimo.

Diferentes estudios han cuantificado la superficie foliar necesaria para obtener una buena maduración del fruto. Como es el caso de Archer *et al.*, (2004) en Sudáfrica que establecieron en espaldera una longitud de pámpanos de 1,2 a 1,6 m con hojas bien expuestas para conseguir la correcta maduración de 2 racimos por pámpano. Otros autores como Kliewer *et al.*, 1971 o Smart *et al.*, 1990 establecieron que es necesario disponer de 1 a 1,2 m² de hojas bien expuestas para producir una buena maduración del fruto. En años climáticamente desfavorables, sería necesario que el área fuese algo mayor.

II.3.3 EFECTOS SOBRE EL RENDIMIENTO:

Los efectos del déficit hídrico en el rendimiento dependen del estado de desarrollo en que se encuentre la planta. Numerosos estudios han evaluado los efectos de la escasez de agua en las distintas etapas de la uva. Van Zyl *et al.* (1977) vieron que el envero es la etapa de desarrollo más sensible seguido por el período justo después de floración. Posteriormente, Dry, *et al.* (2001), McCarthy (1997), Ojeda, *et al.* (2001) coinciden en señalar la primera fase de desarrollo de la baya como la etapa más sensible al déficit hídrico. Por otro lado, Hardie and Considine (1976) obtuvieron grandes pérdidas de rendimiento causado por un reducido cuajado, con condiciones de estrés hídrico durante 3 semanas después de floración. Y, sin embargo, Wildman *et al.* (1976) apreciaron pérdidas de rendimiento al existir un déficit hídrico intenso en cualquier momento del ciclo, incluida la dormición, el comienzo del crecimiento, el cuajado y la maduración del fruto. Por último, Reynolds *et al.* (1994) obtuvieron una relación inversa entre el crecimiento de la uva y la duración del estrés hídrico.

Los efectos del estrés hídrico en el crecimiento de la baya se reflejan en la cosecha final. El déficit hídrico post-envero tiene un efecto menos negativo en el rendimiento final que el déficit de pre-envero. Matthews, *et al.* (1987) observaron pérdidas de rendimiento cuando las plantas fueron sometidas a déficit hídrico antes de envero debido a un menor tamaño de las bayas, y sin embargo, no fueron significativas las pérdidas de rendimiento cuando el déficit se aplicó después de envero.

El aumento del rendimiento en cepas regadas se debe principalmente al aumento del peso de baya (Williams and Matthews 1990; García-Escudero *et al.*, 1997; Esteban *et al.*, 1999; Tandonnet *et al.*, 1999; Ojeda *et al.*, 2001; Junquera *et al.*, 2012). García-Escudero, *et al.* (2000) obtuvieron incrementos en el rendimiento con el riego, debido al aumento del peso del racimo y de la baya y a un mayor número de racimos por

cepa, lo que se puede asociar con el efecto constatado del riego sobre el proceso de inducción floral y la fertilidad de las yemas (Bravdo *et al.*, 1985; Matthews *et al.*, 1989). Por el contrario, otros estudios afirman que el aumento del rendimiento debido al riego, en ocasiones, disminuye la concentración de azúcares (Ginestar *et al.*, 1998, Williams and Grimes 1987).

En el estudio de la vid, el número y tamaño de los racimos, así como la dimensión final de las bayas, dependerán en gran parte de la intercepción de energía solar y de la temperatura, aunque también influirán otros factores como: factores genéticos, hormonales y la disponibilidad de agua (Champagnol 1984, Dokoozlian 1995).

II.3.4 EFECTOS SOBRE LA COMPOSICIÓN DE LA UVA (CALIDAD):

La disponibilidad de agua puede afectar a la maduración y composición del fruto a través del crecimiento vegetativo, de la actividad fotosintética foliar y del reparto de fotoasimilados. Dependiendo, estos efectos observados, de la fase en que se produce el déficit hídrico, de su severidad e intensidad, así como de la velocidad con que se impone (Cuevas, 2001).

La composición de la baya está estrechamente ligada al estado hídrico de la planta, y asociada al microclima de racimos y a la arquitectura de la vegetación (Deloire *et al.*, 2003).

La disponibilidad hídrica influye en el vigor de los pámpanos y por consiguiente en el microclima del canopy que regula el metabolismo de la uva. Niveles de humedad del suelo altos estimulan el vigor y el desarrollo de cubiertas vegetales densas que pueden provocar un retraso en la acumulación de sólidos solubles, debido a fenómenos de competencia y de sombreado de la zona de fructificación (Williams and Matthews, 1990).

El déficit hídrico limita el desarrollo foliar de la cepa, mejorando la penetración de la luz en la zona de racimos, pudiendo también aumentar la temperatura de la baya (Santos *et al.*, 2005), esto mejora la acumulación de sólidos solubles, y acelera la degradación de ácidos de la baya. Además un déficit hídrico moderado puede aumentar la concentración de azúcar, limitando el tamaño de la baya y mejorando su composición al restringir el crecimiento de los pámpanos y reducir la densidad foliar de la cepa (Kenedy *et al.*, 2002; Ojeda *et al.*, 2002; van Leeuwen *et al.*, 2004). Pero, estreses más severos, especialmente si se da en maduración, pueden retrasar el desarrollo y maduración de la baya, debido a la reducción de la actividad fotosintética y la exportación de azúcares desde las hojas (Currell *et al.*, 1983; Dry *et al.*, 2001;

Hardie y Considine, 1976; Matthews and Anderson, 1988; Peyrot des Gachons *et al.*, 2005; Rogiers *et al.*, 2004; Santesteban and Royo, 2006). O en casos extremos de sequía puede llegar a pararse la acumulación de azúcares en la baya y producirse caída de la hoja (Williams and Matthews, 1990; Williams *et al.*, 1994).

La disponibilidad hídrica ejerce una clara influencia sobre la evolución y el contenido final de los ácidos orgánicos de la uva. Primeramente la degradación del ácido málico por respiración de la baya se ve favorecida durante la maduración por la temperatura y la exposición de racimos, mientras que la dilución que afecta mayoritariamente al ácido tartárico está relacionada con incrementos de la producción y el tamaño de la baya. Por otro lado, el déficit o el exceso de agua pueden incrementar o disminuir la producción y el vigor de la planta, esto puede modificar la relación superficie foliar/volumen de cosecha así como, el microclima de racimos, además pueden modificar su incidencia en la dinámica de absorción de potasio (García – Escudero *et al.*, 1995), afectando a la evolución y el contenido final de los ácidos orgánicos.

El déficit hídrico de la planta en general conduce a bayas más pequeñas provocando cambios en la composición de la uva y del vino (Bravdo *et al.*, 1985; Kennedy *et al.*, 2002; Romero *et al.*, 2010), reduciendo el peso de los hollejos y de las semillas (Roby *et al.*, 2004), modificando la relación pulpa/hollejo (Santos *et al.*, 2005) y en definitiva incidiendo en la carga polifenólica de los mostos y vinos, así como, en la concentración de antocianinas y otros compuestos fenólicos. Kennedy *et al.*, 2002 observó que en cepas sometidas a un déficit moderado en pre-envero, mejoraba el color de la baya en vendimia; en cierto, punto debido al tamaño de la baya, ya que aumentó la relación hollejo/pulpa. Por otro lado, Dry *et al.*, 2001, observaron una relación directa del déficit hídrico sobre la mejora de la producción de antocianos en baya. Sin embargo, estreses severo antes del envero de la baya producen maduraciones irregulares e incompletas del racimo.

La acumulación de taninos y flavonoides, entre otros, parece ser bastante insensible a los cambios en el estado hídrico de la planta, tanto antes como después del envero (Downey *et al.*, 2006), a menos que el déficit hídrico mejore la exposición del racimo al sol. Por otro lado Peyrots des Gachons *et al.*, 2005, observaron que un déficit medio puede mejorar el potencial aromático de las bayas. Pero estrés severo, sin embargo, puede reducir el potencial aromático de la baya.

II.4 HERRAMIENTAS PARA EVALUAR EL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.

A lo largo de los años se han utilizado diversos tipos de indicadores para determinar la influencia de las condiciones ambientales y culturales sobre el estado hídrico del viñedo: visuales (como cambios en el color o ángulo de las hojas, enrollamiento de los limbos de las hojas), medidas de crecimiento (de hojas, frutos y tallos) o fisiológicas (como medidas de potencial hídrico en hoja, medidas de la respuesta estomática, actividad fotosintética o tasas de transpiración) (Sánchez de Miguel 2007).

Las medidas del estado hídrico se pueden dividir en las que se basan en la cantidad de agua o en su estado de energía del suelo y de la planta. El suministro de agua del medio y el estado hídrico actual de la planta se puede medir a través del estado de humedad del suelo (potencial hídrico del suelo o contenido de humedad del suelo), a través de los indicadores fisiológicos (cierre de estomas, reducción de la fotosíntesis) (Mullins 2001, Cuevas 2001; Fereres *et al.*, 2003; Kirkham 2004; Centeno 2005), a través de los indicadores basados en el estado hídrico de la planta (tasa de marchitamiento, tasa de crecimiento, cambios morfológicos en los tallos, hojas o deshidratación de la baya) (Naor and Cohen 2003), entre otros. Sin embargo no existe un único método de medida, pero es conveniente conocer el estado hídrico de la planta durante el crecimiento y desarrollo, para un correcto manejo del cultivo.

Mediciones basadas en la planta.

El estado hídrico del viñedo depende de múltiples factores, Choné *et al.* (2000) y Van Leeuwen *et al.* (2001) consideran que la planta es el mejor indicador de su estado hídrico ya que las medidas efectuadas sobre sus órganos y tejidos integran los factores del suelo y atmosféricos que controlan su balance hídrico (disponibilidad de agua del suelo, demanda evaporativa de la atmósfera) y también los factores relacionados con la propia planta (área foliar, tolerancia a la sequía).

a) Potencial hídrico foliar:

El potencial hídrico foliar engloba en una sola medida el potencial hídrico del suelo y aquellos factores relacionados con su control (precipitación, riego, marco de plantación, ...), la tasa de evapotranspiración del cultivo (radiación, humedad, temperatura, velocidad del viento, características de los estomas y área foliar), y la conductancia hidráulica en las distintas partes del camino que sigue el agua

(comportamiento fisiológico de la planta, principalmente cierre estomático) (Gómez del Campo, 1998).

El potencial hídrico foliar de base (p_d), medido antes del amanecer, permite obtener valores de potencial con menor variabilidad, esto es debido a la homogeneidad de las condiciones microclimáticas durante el período nocturno (Van Leeuwen *et al.*, 2001). Además existe una buena relación entre el estado hídrico de la planta medido con el p_d y la reserva útil de la fracción de suelo explorada por las raíces (Girona 1994; Cuevas 2001; Deloire *et al.* 2003). Sin embargo, bajo ciertas condiciones, el p_d puede no ser representativo del estado hídrico medio del suelo en la zona de las raíces ya que tiende a ser influido por el estado hídrico de las zonas más húmedas del suelo (Jones, 1992)

Diversos autores han estudiado la relación entre el potencial de base y el estado hídrico de la planta (ver tabla II.1). Por ejemplo, Zufferey (2000) señala cómo la intensidad fotosintética y la conductancia estomática son máximas cuando el potencial de base permanece por encima de -0,2 MPa. Por otro lado Williams *et al.* (1994) y Carbonneau (1998) coinciden en señalar potenciales de base superiores a -0,2 MPa como indicadores de buena disponibilidad de agua en el suelo sin efectos negativos en la actividad fisiológica de la planta. Valores de p_d inferiores a -0,6 MPa son considerados indicadores de intenso o severo estrés hídrico.

Tabla II.1: Relación entre los valores de potencial de base y el estado hídrico de la planta (Deloire *et al.* 2004; Carbonneau 2002).

Deloire et al. (2004)		Carbonneau 2002	
p_d (Mpa)	Estado hídrico de la vid	p_d (bares)	Estado hídrico de la vid
$0 < p_d < -0,15$	Sin estrés	$p_d > -2$	No existe estrés hídrico
$0,15 < p_d < -0,3$	Estrés ligero	$-2 > p_d > -5$	Estrés favorable a la calidad
$0,3 < p_d < -0,45$	Estrés Moderado	$-5 > p_d > -10$	Fuerte estrés con síntomas de sequía
$0,45 < p_d < -0,6$	Estrés elevado		
$p_d < -0,6$	Estrés severo		

El potencial hídrico foliar al mediodía (m_d) también se utiliza como estimador del estado hídrico de la vid (Williams *et al.*, 2012), porque muestra el estado hídrico de la planta cuando las condiciones son menos favorables. De acuerdo con la literatura más reciente $m_d = -0,8$ MPa indicaría que la cepa está bien regada (Girona *et al.*, 2006).

Tabla II.2 Severidad del estrés hídrico en función del potencial hídrico foliar medido al mediodía solar (Vallone *et al.*, 1997; Deloire *et al.*, 2004).

Vallone <i>et al.</i> , 1997		Deloire <i>et al.</i> (2004)	
m_d (MPa)	Estado hídrico de la vid	m_d (MPa)	Estado hídrico de la vid
$m_d > -1,4$	Ausencia estrés hídrico	$m_d > -1,0$	Sin estrés
$-1,4 > m_d > -1,6$	Estrés medio	$1,0 > m_d > -1,2$	Estrés ligero
$m_d < -1,6$	Estrés alto	$1,2 > m_d > -1,4$	Estrés moderado
		$-1,4 > m_d > -1,6$	Estrés elevado
		$m_d < -1,6$	Estrés severo

Intrigliolo *et al.* (2006), dice que en clima mediterráneo y en cv Tempranillo, cuando el potencial hídrico foliar al amanecer disminuye por debajo de $-0,54$ MPa, el potencial hídrico foliar al mediodía deja de ser un indicador válido para estimar el estado del estrés hídrico en la planta, ya que el cierre estomático a mediodía iguala los valores de potencial hídrico independientemente del déficit hídrico de la planta. Por tanto, bajo estas condiciones los valores de potencial hídrico foliar a media mañana son un indicador más fiable del estrés hídrico de la planta. No obstante los valores de potencial de base a partir de los cuales se produce este intenso cierre estomático pueden cambiar dependiendo de la variedad estudiada y del lugar donde esté cultivada.

b) Conductancia estomática (g_s):

Uno de los primeros efectos del déficit hídrico en el suelo es la reducción de la apertura de los estomas de las hojas, hecho que sucede antes de que sea detectable por el potencial hídrico foliar, existiendo una lógica correspondencia entre ambos valores, por lo que la medición de la conductancia estomática puede ser un fiable indicador del nivel de sequía del cultivo.

La conductancia estomática (g_s) es sensible a la disponibilidad de agua en el suelo, la reducción de la apertura de los estomas de las hojas sucede antes de que sea detectable el déficit hídrico del suelo por el potencial hídrico foliar. Existiendo una correspondencia lógica entre ambos valores, por eso la medición de la conductancia estomática (g_s) puede ser un fiable indicador del nivel de sequía de la planta (Jones 2004).

Las correlaciones encontradas entre la apertura estomática y la fotosíntesis (Williams *et al.*, 1994; Düring *et al.*, 1996; Padgett-Johnson *et al.*, 2000; Cuevas 2001) y

entre la apertura estomática y la transpiración (Morlat *et al.*, 1992; Cuevas 2001) hace de la conductancia estomática un dato muy sensible para conocer la fisiología de la planta y su estado hídrico, proporcionando una medida integrada de estrés hídrico que experimenta la planta (Flexas *et al.*, 2002; Medrano *et al.*, 2002). Muchos científicos consideran que la conductancia estomática refleja mejor el estado hídrico en la planta que la tasa de transpiración, Rogiers *et al.* (2009) indica que existe un mayor grado de correlación entre E y g_s .

c) Otros métodos:

- Dendrómetros.

Es un aparato que permite medir indirectamente el estado hídrico del sistema suelo-planta, utilizando a la planta como sensor. Con este aparato se puede conocer la evolución diaria de las reservas de agua en el tronco, mediante la medición de su diámetro en micras (contracciones y dilataciones diarias) determinándose en tiempo real si la planta está estresada.

- Fluorescencia de la clorofila.

Es posible medir la fluorescencia de la clorofila con fluorómetros a pocos centímetros de la hoja o con mediciones realizadas desde aviones.

La fluorescencia estacionaria (F_s) y la fluorescencia basal en la oscuridad (F_0), son los parámetros que normalmente se miden para evaluar la situación hídrica de las plantas, existiendo una estrecha correlación entre el índice de reflectancia de la clorofila F_s/F_0 y la conductancia estomática (g_s) y la fotosíntesis neta (An).

- Índices de reflectancia de la cubierta vegetal.

La reflectancia de la cubierta vegetal a diferentes longitudes de onda, y también por lo tanto de los cultivos, pueden ser indicadores del estado de las plantas, y en concreto también de su situación hídrica. Su detección se realiza normalmente con imágenes tomadas por satélites.

Mediciones basadas en el suelo.

El conocimiento del contenido hídrico del suelo proporciona un riguroso indicador de la disponibilidad de agua para las plantas. Hay numerosos trabajos que evalúan y comparan los diferentes procedimientos para determinar el contenido de agua en el suelo. Como el trabajo de Mullins (2001) que empleó sensores indirectos como los bloques de yeso que dependen de las características del suelo, como la porosidad. O Prior *et al.* (1986) y Toome (2002b) que realizaron la monitorización del contenido de agua en el suelo usando tensiómetros, llegando a la conclusión de que es una técnica eficaz para establecer cuándo se produce déficit hídrico y si la dosis de riego aplicada es suficiente para mantener los valores de potencial matricial dentro de unos límites fijados previamente.

Existen numerosos métodos para determinar el contenido de agua en el suelo, a continuación se describen aquellos que se han empleado en este trabajo.

Medidas basadas en las propiedades dieléctricas del suelo.

Esta medición se basa en las propiedades del suelo de actuar como un condensador eléctrico, midiendo un coeficiente dieléctrico aparente del mismo que a su vez depende de la humedad, dado que el del aire es ~ 1 , el de los sólidos del suelo es ~ 2 a 5 y el del agua es ~ 80 . Estos valores varían con la temperatura del orden de un 4 % cada grado centígrado ($^{\circ}\text{C}$) y también con la salinidad del suelo, excepto en las proximidades a la superficie del suelo, por lo que no se precisan correcciones en la mayoría de los casos.

a) Sensores TDR (Reflectometría en el dominio del tiempo)

Mide la constante dieléctrica del suelo evaluando el tiempo de recorrido de un pulso electromagnético entre dos varillas de acero inoxidable que se introducen dentro del terreno y que sirven de guía a las ondas. (ver capítulo IV, Material y Métodos).

b) Sensores FDR (Reflectometría en el dominio de la frecuencia)

Utilizan la capacitancia del suelo para medir el coeficiente dieléctrico () de la matriz del suelo. Son también conocidos como sensores de capacitancia, ya que, los circuitos del sensor oscilan con una frecuencia que depende de la capacitancia del suelo, determinada por la humedad del mismo. (ver capítulo IV, Material y Métodos).

II.5 ESTRATEGIAS DE RIEGO.

El riego es una herramienta eficaz en el manejo del cultivo que puede servir para conseguir unos objetivos previamente establecidos.

Cuando se plantea una estrategia de riego, ésta tiene que contemplar diferentes factores como: la demanda de la planta, la demanda de la atmósfera, la disponibilidad de agua en el suelo y los objetivos de cosecha previamente diseñados.

La aplicación deliberada de un déficit hídrico sobre la planta a lo largo del periodo activo de la vid es una de tantas estrategias de riego que se emplean en la producción de uva de calidad. Es conocido como riego deficitario controlado (RDI; Regulated deficit irrigation) en el que el déficit hídrico es aplicado durante un periodo de tiempo tan pronto como sea posible después de cuajado (Dry *et al.*, 2001; Keller, 2005; Kriedemann and Goodwin, 2003; Romero *et al.*, 2010). Está técnica es efectiva en zonas de escasa precipitación o elevada demanda evapotranspirativa y suelos con baja capacidad de almacenamiento de agua.

Con el déficit hídrico controlado limitas el crecimiento vegetativo y además de reducir el tamaño de la baya y aumentar la proporción de hollejo/pulpa, con RDI también mejora la exposición de los racimos.

Existen estrategias basadas en diferentes umbrales de déficit hídrico a lo largo del periodo activo de la vid, que sería una variación del riego deficitario controlado. El objetivo de este tipo de estrategias es adaptar el riego a la demanda de la planta y de la atmosfera, a la disponibilidad de agua del suelo y a los objetivos de la cosecha (Lissarrague *et al.*, 2007).

Por ejemplo hay trabajos donde se plantean distintos umbrales de déficit hídrico de la planta en función del estado fenológico medido a través del potencial hídrico foliar (Girona *et al.*, 2006; Deloire *et al.*, 2004), también existen trabajos donde el déficit hídrico controlado se centra en la etapa de maduración de la baya, como es el trabajo de Blanco *et al.* (2010) con uva de mesa. U otro tipo de trabajos donde realizan diferentes déficit hídricos controlados según el estado fenológico como Romero *et al.* (2010) antes y después de envero con la variedad Monastrell.

El estrés moderado parece ser más efectivo si se aplica durante la primera fase de rápida expansión de la baya para limitar el crecimiento de los pámpanos y de la baya y la densidad del canopy (Dry *et al.*, 2001). Buen manejo del déficit hídrico puede aumentar los componentes azucarados como los sólidos solubles, el pH, los

antocianos y fenoles, así como, reducir el crecimiento vegetativo y disminuye el peso de la baya (Ginestar *et al.*, 1998; Matthews and Anderson 1988; Reynolds and Naylor 1994).

El color de la uva puede mejorar cuando se aplica un estrés leve o moderado a la cepa (Kennedy *et al.*, 2000) es, en cierta medida, debido al menor tamaño de baya, dónde se incrementa la relación hollejo:pulpa. La producción de antocianos está altamente influido por el régimen hídrico (Dry *et al.*, 2001). Se ha encontrado que el déficit hídrico puede mejorar la acumulación de antocianos mediante la estimulación de la expresión de genes que codifican su biosíntesis (Castellarin *et al.*, 2007).

El estrés hídrico severo, especialmente antes del envero, puede generar una maduración desigual del racimo con bayas semimaduras, con poco color o verdes. La acumulación de taninos, flavonoles y la cinética de los ácidos, por un lado, son bastante sensibles al cambio del estado hídrico de la planta, tanto antes como después de envero (Downey *et al.*, 2006), a menos que el déficit hídrico cambie la exposición de los racimos a la radiación. La concentración de carotenoides en bayas desarrolladas en un ambiente con bajo contenido de agua en el suelo, gran parte de este efecto puede ser, probablemente, atribuible a la alta exposición al sol, debido a la reducción de la densidad del canopy (reducción del área foliar total) lo que acelera la degradación de carotenoides.

Hay evidencias considerables que sugieren que el Cabernet Sauvignon puede ser relativamente insensible a las variaciones en el rendimiento (Keller *et al.*, 1998, 2005), y que la respuesta puede depender de cómo y cuando la variación de la cosecha se ha establecido (Chapman *et al.*, 2004). Además no está claro si este (u otro) cultivar puede madurar la misma cantidad de uva bajo diferentes grados de déficit. Porque muchos estudios han investigado el efecto de RDI comparando cepas regadas con no regadas, hay poca información cuantitativa disponible para determinar los niveles óptimos de déficit de agua en diferentes momentos fenológicos durante el periodo activo de la vid. Además SST y otros parámetros relevantes de la calidad suelen ser mayores en las uvas que han sufrido un poco de estrés hídrico, estreses excesivos influyen negativamente en la composición de la baya (Esteban *et al.*, 1999).

II.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Archer, E. and J. J. Hunter. 2004. Vine balance: its importance to successful cultivation. Wynboer. A technical guide for wine producers. Vol. 2.
- Bartolomé, M. C. 1993. Respuestas de la vid (*V. vinifera* L.) a condiciones de estrés hídrico: efectos sobre las relaciones agua-planta, el crecimiento, la producción y la calidad (cv. Tempranillo). Producción Vegetal: Fitotecnia. E.T.S.I. Agrónomos. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid: 445.
- Bavestrello-Riquelme, C., L. Cavieres, J. Gallardo, A. Ibacache, N. Franck, A. Zurita-Silva. 2012. Evaluación de la tolerancia a estrés por sequía en cuatro genotipos naturalizados de vid (*Vitis vinifera*) provenientes del norte de Chile. Idesia vol. 30, nº 3. Páginas: 83-92.
- Blanco O., J.M. Faci and Negueroles J. 2010. Response of table grape cultivar "Autumn Royal" to regulated deficit irrigation applied in post-verasion period. Spanish Journal of Agricultural Research. Vol 8; pp: 76 – 85.
- Bravdo, B., Y. Hepner, C. Loinger, S. Cohen, and H. Tabacman. 1984. Effect of crop level on growth, yield, and wine quality of a high yielding Carignane vineyard. Am. J. enol. vitic 35(4): 247-252.
- Bravdo, B., Y. Hepner, C. Loinger, S. Cohen, H. Tabacman. 1985. Effect of crop level and crop load on growth, yield, must and wine composition, and quality of Cabernet Sauvignon. Am. J. Enol. Vitic. 36: 125-131.
- Carbonneau, A. 1998. Aspects qualitatifs. Traite d'irrigation. J. R. Tiercelin. Paris, Tec & Doc: 257-276.
- Castellarin, S.D., A Pfeiffer, P. Sivilotti, M. Degan, E. Peterlunger, and G. Di Gaspero. 2007. Transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis in ripening fruit of grapevine under seasonal water deficit. Plant Cell Envir. 30:1381-1399.
- Centeno, A. 2005. Evaluación del comportamiento de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) en condiciones de déficit hídrico: efectos sobre el estado hídrico, crecimiento, rendimiento, biomasa y composición de la uva. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. Agrónomos. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia.: 193.
- Champagnol, F. 1984. Elements de physiologie de la vigne et de viticulture generale. F. Champagnol. Montpellier. France.
- Chapman, D.M., M.A. Matthews, J.X. Guinard. 2004. Sensory attributes of Cabernet Sauvignon wines made from vines with different crop yields. Am. J. Enol. Vitic. 55: 325-334.
- Choné, X., O. Tregoat, C. V. Leeuwen, and D. Dubourdieu. 2000. Déficit hydrique modéré de la vigne: parmi les 3 applications de la chambre à pression, le potentiel tige est l'indicateur le plus précis. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 34(4): 169-176.
- Coombe, B.G., P.R. Dry. 1992. Viticulture. Volume 2 Practices, Winetitles. Adelaide. Australia
- Correia, M. J., Pereira, J. S., Chaves, M. M., Rodrigues, M. L. and Pacheco, C. A. (1995). ABA xylem concentrations determine maximum diurnal leaf conductance of field-grown *Vitis vinifera* L. plants. Plant, Cell and Environment 18: 511-521.

- Cuevas, E. 2001. Estudio de mecanismos de adaptación ecofisiológica de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) al déficit hídrico. Evaluación del consumo de agua y de las respuestas agronómicas en diferentes regímenes hídricos. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.: 219.
- Cuevas, E., P. Baeza and J. R. Lissarrague 2006. Variation in stomatal behaviour and gas exchange between mid-morning and mid-afternoon of north-south oriented grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo) at different levels of soil water availability. *Scientia Horticulturae* 108: 173-180.
- Currle, O., O. Bauer, W. Hofäcker, F. Schumann, and W. Frisch. 1983. *Biologie der Rebe*. Meiningen, Neustadt an der Weinstrasse, Germany.
- Deloire, A., A. Carbonneau, B. Federspiel, H. Ojeda, Z. Wang and P. Constanza. 2003. La vigne et l'eau. *Progès Agricole et Viticole* 120 (4): 79-90
- Deloire, A., A. Carbonneau, Z. Wang, H. Ojeda. 2004, Vine and water, a short review. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 38: 1-13.
- Dokoozlian, N. and W. M., Kliewer. 1995. The light environment within grapevines canopies. I. Description and seasonal changes during fruit development. *Am.J.Enol. Vitic.* 46(2): 209-218.
- Downey, M. O., N. K. Dokoozlian and M. P. Krstic. 2006. Cultural practice and environmental impacts on the flavonoid composition of grapes and wine. A review of recent research. *Am. J. Enol. Vitic.* 57: 257-268.
- Dry, P. R., B. R. Loveys, M. G. McCarthy, and M. Stol. 2001. Gestion des stratégies d'irrigation dans les vignobles australiens. *Progrès Agricole et Viticole* 118(21): 457- 470.
- Dufourcq, L., E. Gontier, N. Serrano and N. Ollat. 2005. Rapport surface foliaire et poids de récolte: incidences sur l'alimentation hydrique de la vigne, la qualité du moût, la qualité du vin a partir de quatre cépages de Midi-Pyrénées. *Progès Agricole et Viticole* 122(23): 503-507.
- Düring, H. 1987. Stomatal responses to alterations of soil and air humidity in grapevines. *Vitis* 26: 9-18.
- Düring, H. and B. R. Loveys. 1996. Stomatal patchiness of field-grown sultana leaves: diurnal changes and light effects. *Vitis* 35(1): 7-10.
- Escalona, J. M., J. Flexas, and H. Medrano. 1999. Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis under water stress in field-grown grapevines. *Aus. J. Grape and Wine Research* 26: 421-433.
- Esteban, M.A., M.J. Villanueva, and J.R. Lissarrague. 1999. Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugar, organic acids, and mineral elements. *Am. J. Enol. Vitic.* 50: 418-434.
- Fereres, E., D.A. Goldhamer, and L.R. Parsons. 2003. Irrigation water management of horticultural crops. Historical review compiled for the American Society of Horticultural Science's 100 th Anniversary. *HortSci.* 38:1036-1042.
- Flexas, J., J. Escalona, and H. Medrano. 1998. Down-regulation of photosynthesis by drought under field conditions in grapevine leaves. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 25: 893-900

- Flexas, J. and H. Medrano. 2002. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: Stomatal and non-stomatal limitations revisited. *Annals of Botany* 89: 183-189
- García-Escudero, E., R. López, P. Santamaría, and O. Zaballa. 1997. Ensayos de riego localizado en viñedos productivos de cv. Tempranillo. *Viticultura y Enología Profesional* 50: 37- 47,
- García-Escudero, E., R. López, P. Santamaría and O. Zaballa. 2000. Control de rendimiento en viñedos conducidos en régimen de riego localizado. *Viticultura y Enología Profesional* 69: 12-24.
- García-Escudero. 2007. "Experiencias de riego en la DOCa Rioja" en *Fundamentos, aplicación y consecuencias del riego en la vid*. Eds. Pilar Baeza Trujillo, José Ramón Lissarrague y Patricia Sánchez de Miguel (Editorial Agrícola Española) pp. 201-230.
- Ginestar, C., J. Eastham, S. Gray and P. Iland. 1998. Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of Shiraz grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* 49(4): 421-428.
- Girona, J. 1994. Respuesta fisiológica y productiva del estrés hídrico en diferentes especies frutales: melocotonero, avellano y nogal. Tesis doctoral. Universidad de Lleida, pp.150.
- Girona, J., M. Mata, J. del Campo, A. Arbones, E. Bartra, and J. Marsal. 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig. Sci.* 24: 115-127.
- Godoy Avila, C. and I. López Montoya. 1990b. Uso de agua de la vid (*Vitis vinifera* L.) durante la brotación y crecimiento del brote. *Información Técnica Económica Agraria: Revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario*. 86(2): 75-86
- Grimes, W. and L. E. Williams. 1990. Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson seedless grapevines. *Crop Science* 30: 255-260.
- Hardie, W. J. and J. A. Considine. 1976. Response of grapes to water deficit stress in particular stages of development. *American Journal of Enology and Viticulture* 27: 55-61
- Hetherington, A.M., and F.I. Woodward. 2003. The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature* 424:901-908.
- Hidalgo Fernández-Cano L., J. Hidalgo Togores. *Tratado de Viticultura. Volumen II*. (Ediciones Mundi-Prensa, 2011).
- Intrigliolo, D. S. and J. R. Castel. 2006. Vine and soil-based measures of water status in a Tempranillo vineyard. *Vitis* 45(4): 157-163
- Jarvis P.G. and K.G. Mc Naughton. 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*. Vol. 15 Academic Press, London, pages: 1- 49.
- Jones, H.G. 1992. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press. London.
- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J. Exp. Bot.* 55:2427-2436.

- Junquera, P., J.R. Lissarrague, L. Jiménez, R. Linares and P. Baeza. 2012. Long-term effects of different irrigation strategies on yield components, vine vigor, and grape composition in cv. Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera* L.). *Irrig Sci.* 30: 351-361.
- Keller, M. and W. Koblet. 1995. Dry matter and leaf area partitioning, bud fertility and second season growth of *Vitis vinifera* L.: responses to nitrogen supply and irradiance. *Vitis* 34(2): 77-83.
- Keller, M., K. Arnink, and G. Hrazdina. 1998. Interaction of nitrogen availability during bloom and light intensity during veraison. I. Effect on grapevine growth, fruit development, and ripening. *American Journal of Enology and Viticulture* 49: 333-340
- Keller, M. 2005. Deficit irrigation and vine mineral nutrition. *Am. J. Enol. Vitic.* 56: 267-283.
- Keller, M., J. Smith, and B. Bondada. 2006. Ripening grape berry remain hydraulically connected to the shoot. *J. Exp. Bot.* 57:2577-2587.
- Kenedy et al 2002
- Kenedy, A. J., M. A. Matthews and A. Waterhouse. 2002. Effect of maturity and vine water status on grape skin and wine flavonoids. *American Journal of Enology and Viticulture* 53(4): 269-274
- Kirkham, M.B. 2004. Principles of soil and plant water relations. Elsevier Academic Press Burlington, MA.
- Kliewer, W. M. and R. J. Weaver. 1971. Effect of crop level and leaf area on growth, composition and coloration of Tokay grapes. Annual meeting of the American Society of Enologist.
- Kliewer, W.M., B.M. Freeman, and C. Hosson. 1983. Effect of irrigation, crop level and potassium fertilization on Carignane vines. I. Degree of water stress and effect on growth and yield. *Am. J. Enol. Vitic.* 34:186-196.
- Kriedemann, P.E., and I. Goodwin. 2003. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying: an overview of principles and applications. *Irrigation insights* no. 4. (Land and Water Australia: Canberra). Lawlor, D. 2002. Limitation to Photosynthesis in Water-stressed Leaves: Stomata vs. Metabolism and the Role of ATP. *Annals of Botany* 89: 871-885.
- Lissarrague, J.R. 1997. Necesidades de agua de la vid. *Agricultura: Revista agropecuaria*, (785), 943-950.
- Marsal J, Mata M, del Campo J, Arbones A, Vallverdú X, Girona J, Olivo N (2008) Evaluation of partial root-zone drying for potential field use as a deficit irrigation technique in commercial vineyards according to two different pipeline layouts. *Irrig Sci* 26:347–356.
- Martínez de Toda F. 1991. *Biología de la Vid*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Matthews, M., M. Anderson, and H. Schultz. 1987. Phenologic and growth response and late season water deficits in Cabernet franc. *Vitis* 26: 147-160.

- Matthews, M. and M. Anderson. 1988. Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 39(4): 313-320.
- Matthews, M. and M. Anderson. 1989. Fruit reproductive development in grape (*Vitis vinifera* L.) responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 40(1): 52-59
- McCarthy, M. G., L. D. Jones and G. Due. 1992. Irrigation - Principles and practices. En: *Viticulture*, Vol. 2. Ed. B. G. Coombe and P. R. Dry. 2: 104-128. Practices, Adelaide, Australia.
- McCarthy, M.G. 1997. The effect of transient water deficit on berry development of cv. Shiraz (*Vitis vinifera* L.). *Aust. J. Grape Wine Res.* 3: 102-108.
- McCarthy, M., 2000. Developmental variation in sensitivity of *Vitis vinifera* L. (Shiraz) berries to soil water deficit. *Aust. J. Grape Wine Res.* 6, 136–140.
- Medrano, H., J. M. Escalona, J. Bota, J. Gulías and J. Flexas. 2002. Regulation of Photosynthesis of C3 Plants in Response to Progressive Drought: Stomatal Conductance as a Reference Parameter. *Annals of Botany* 89: 895-905.
- Medrano, H., J.M. Escalona, J.Cifre, J. Bota, and J. Flexas. 2003. A ten-year study on the physiology of grapevines cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Funct. Plant Biol.* 30: 607-619.
- Medrano H., J.M. Escalona, J. Flexas. 2007. “Indicadores integradores del estado hídrico de la planta” en *Fundamentos, Aplicación y consecuencias del riego en la vid*. Eds. Pilar Baeza Trujillo, José Ramón Lissarrague y Patricia Sánchez de Miguel (Editorial Agrícola Española) pp. 15-34.
- Morlat, R., M. Penavayre, A. Jacquet, C. Asselin and C. Lemaitre. 1992. Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthese de la vigne en millésime exceptionnellement sec. (1990). Conséquence sur la maturation du raisin. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin.* 26(4): 197-220
- Mullins, C.E. 2001. Matric potential. En: *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (2nd Edn). (Smith, K.A.; Mullins, C., eds). Marcel Dekker, New York, USA. pp: 65-93.
- Mullins, M. G., A. Bouquet and L. E. Williams. 1992. Developmental physiology: the vegetative grapevine. *Biology of the grapevine*. M. G. B. Mullins, A. Williams. L.E. Cambridge. U.K, Cambridge University Press: 80-111.
- Myburgh, P. A. (2003). Responses of *Vitis vinifera* L. cv. Sultanina to Level of soil water depletion under semi-arid conditions. *South African Journal of Enology and Viticulture* 24(1): 16-24
- Naor, A., B. Bravo and J. Gelobter. 1994. Gas exchange and water relations in field-grown Sauvignon blanc grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 45(4): 423-428.
- Naor, A, and S. Cohen. 2003. Response of apple tree stem diameter, midday stem water potential and transpiration rate to a drying and recovery cycle. *Hortsci.* 38:547-551.
- Ojeda, H., A. Deloire and A. Carbonneau. 2001. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* 40(3): 141-145.

- Ojeda, H., C. Andary, E. Kraeva, A. Carbonneau and A. Deloire. 2002. Influence of Pre- and Postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture* 53(4): 261-267
- Padgett-Johnson, M., L. E. Williams and M. A. Walker. 2000. The influence of *Vitis riparia* rootstock on water relations and gas exchange of *Vitis vinifera* cv Carignane scion under non-irrigated conditions. *American Journal of Enology and Viticulture* 51 (2): 137-143
- Paranychianakis, N. V., K. S. Chartzoulakis and A. N. Angelakis. 2004. Influence of rootstock, irrigation level and recycled water on water relations and leaf gas exchange of Soultanina grapevines. *Agricultural Water Management* 69(1): 13-27
- Peyrot des Gachons, C., van Leeuwen, C., Tominaga, T., Soyer, J-P., Gaudillère, J-P., Dubourdieu, D. (2005) Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon Blanc in field conditions. *J. Sci. Food Agric.* 85:73-85.
- Poni, S., C. Intriери and O. Silvestroni. 1994. Interactions of leaf age, fruiting, and exogenous cytokinins in Sangiovese grapevines under non-irrigated conditions. I. Gas exchange. *American Journal of Enology and Viticulture* 45(1): 71-78.
- Poni, S., A. Palliotti and F. Bernizzoni. 2006. Calibration and evaluation of a STELLA software-based daily CO₂ balance model in *Vitis vinifera* L. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 131(2): 273-283
- Prieto J.A., E. Lebón, H. Ojeda. 2010. Respuesta estomática de variedades de vid al estado hídrico del suelo y al déficit de presión de vapor de agua. 5ª Jornada de Riego y Fertirriego. Mendoza, Argentina.
- Prior, L. D. and A. M. Grieve. 1986. Water use and irrigation requirements of grapevine. Proc. VI Australian wine industry Technical Conference. Adelaide, South Australia.: 14-17.
- Reynolds, A.G., D.A. Wardle. 1994. Impact of training system and vine spacing on vine performance and berry composition of Seybal blanc. *Am. J. Enol. Vitic.* 45: 444-451.
- Reynolds, A. G. and A. P. Naylor 1994. Pinot noir and Riesling grapevines respond to water stress duration and soil water-holding capacity." *HortScience* 29(12): 1505-1510.
- Roby, G., Harbertson, J. F., Adams, D. A. and M. A. Matthews. 2004. Berry size and vine water deficits as factors in winegrape composition: anthocyanins and tannins. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 10: 100-107.
- Rodríguez Fernández, L.C.; S. Sánchez-Élez; P. Sánchez de Miguel; J.R. Lissarrague. 2011. Efecto en el comportamiento fisiológico y agronómico de la aplicación de diferentes dosis de riego, en la variedad Cabernet Sauvignon. XXXIII Jornadas de Viticultura y Enología de la Tierra de Barros. Cultural Santa Ana 2012. págs. 59-80.
- Rogiers, S. Y., J. M. Hatfield and M. Keller. 2004. Irrigation, nitrogen, and rootstock effects on volumen loss of berries from potted Shiraz vines. *Vitis* 43(1): 1-6

- Rogiers, S.Y., D.H. Greer, R.J. Hutton, and J.J. Landsberg. 2009. Does night-time transpiration contribute to anisohydric behaviour in a *Vitis vinifera* cultivar? *J. Exp. Bot.* 60:3751-3763.
- Rogiers S., D. Greer D., Hulton R., Clarke S. 2011. Transpiration efficiency of the grapevine cv. Semillon is tied to VPD in warm climates. 2011. *Annals of Applied Biology*. Volume 158; Issue 1; pages 106-114.
- Romero, P., J.I. Fernández-Fernández, A. Martínez-Cutillas. 2010. Physiological thresholds for efficient regulated deficit-irrigation management in winegrapes grown under semiarid conditions. *Am. J. Enol. Vitic.* 61:3 (300-312).
- Sánchez de Miguel, P. 2004. Respuesta de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) en relación a la evolución del contenido de agua en el suelo en regímenes hídricos deficitarios. Departamento de Producción Vegetal; Fitotecnia. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica.: 228.
- Sánchez de Miguel, P. 2007. Producción y distribución de fotoasimilados en la vid (*Vitis vinifera* L.) durante el periodo de maduración. Cambios en la respuesta fotosintética a la luz de las hojas por factores biológicos, ambientales y culturales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez-Díaz, M. and J. Aguirreola (1996). Relaciones hídricas. Fisiología y bioquímica vegetal. J. Azcon-Bieto and T. M. Madrid,, McGraw Hill Interamericana de España: 49-90. Sánchez-Llorente, P. 2004. Respuesta de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) en relación a la evolución del contenido de agua en el suelo en regímenes hídricos deficitarios. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Producción Vegetal: Fitotecnia. Universidad Politécnica de Madrid: 228.
- Santesteban, L.G. and J. Bernardo Royo. 2006. Water status, leaf area and fruit load influence on berry weight and sugar accumulation of cv. Tempranillo under semiarid conditions. *Sci. Hort.* 109: 60-65.
- Santos T.P., Lopes C.M., Rodrigues M.L., De Souza C.R., Ricardo-Da-Silva J.M., Maroco J.P., Pereira J.S., Chaves M.M. (2005) Effects of partial root-zone drying irrigation on cluster microclimate and fruit composition of field-grown Castelão grapevines. *Vitis*, 44,117–125.
- Schultz, H. R. (2003). Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment* 26: 1393-1405. Shellie K., P. Bowen. 2014. Isohydrodynamic behavior in deficit irrigated Cabernet Sauvignon and Malbec and its relationship between yield and berry composition. *Irrigation Science*. Volume: 32; Issue: 2; pag: 87-97.
- Smart R.E., 1974. Photosynthesis by grapevine canopies. *J. Appl. Ecol.* 11, 997 – 1006.
- Smart, R., J. K. Dick and I. Gravett. 1990a. Shoot devigoration by natural means. Proceedings 7 th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, South Australia., Winetitles.
- Smart, R.E. and M. Robinson. 1991. Sunlight into wine. A handbook for winegrape canopy management. Winetitles, Adelaide, Australia.

- Soar, C. J., J. Speirs, S. M. Maffei, A. B. Penrose, M. G. McCarthy and B. R. Loveys (2006). Grape vine varieties Shiraz and Grenache differ in their stomatal response to VPD: apparent links with ABA physiology and gene expression in leaf tissue. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 12(1): 2-12.
- Tandonnet, J.P., N. Ollat, M. Neveux, and J.L. Renoux. (1999). Effect of three levels of water supply on the vegetative and reproductive development of Merlot and Cabernet Sauvignon grapevines. *Acta Hort.* 493, 301-307.
- Tardieu, F. and T. Simonneau (1998). Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *J. Exp. Bot.* 49(suppl_1): 419-432.
- Tardieu, F. and Davies, W. J. (1993). Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant, Cell and Environment* 16: 341-349.
- Toome, P. 2002a. Soil moisture monitoring with gypsum blocks. I. Gypsum blocks as an irrigation scheduling tool. *The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker Nov.:* 82- 84,
- Toome, P. 2002b. Soil moisture monitoring with gypsum blocks. II. Interpreting tension readings. *The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker Dic.:* 19-23.
- Vallone, R., J. Pérez Peña, L. Nijensohn, and J. B. Cavagnaro. 1997. Aplicación del índice de transpiración relativa para determinar oportunidad de riego en vid. *XXIII Congreso Anual de la Vid y el Vino. Argentina.*
- Van Leeuwen, C., O. Trégoat, X. Choné and J. P. Gaudillère. 2001. The use of physiological indicators to assess vine water uptake and to manage vineyard irrigation. *The Australian Grapegrower and Winemaker* 449: 18-24
- Van Leeuwen, C., P. Friant, X. Choné, O. Tregoat, S. Kondouras, and D. Dubourdieu. 2004. Influence of climate, soil and cultivar on Terroir. *Am. J. Enol.* 55 (3), 207-217.
- Van Zyl, J. L. and H. W. Weber. 1977. L'irrigation du cepage Chenin blanc dans la region Stellen Bosch, dans le cadre du continuum climat-sol-eau-plante. *Int. Symp. Qual. Vintage.:* 331-350.
- Wample, R. L. 2000. Regulated deficit irrigation as a water management strategy in *Vitis vinifera* production. *Water reports* 22. (www.fao.org/docrep/004/Y3655E/y3655e12.html.)
- Wildman, W.E., R.A. Neja, and N.A. Kasimatis. 1976. Improving grape yield and quality with controlled irrigation. *Am. J. Enol. Vitic.* 27:168-174.
- Williams, L. E. 1996. Grape. Photoassimilate Distribution in Plants and Crops: Source-Sink Relationships. E. Zamski and S. A.A. New York, Marcel Dekker, Inc.: 851-881.
- Williams LE, D.W. Grimes, C.J. Phene (2010a) The effects of applied water at various fractions of measured evapotranspiration on water relations and vegetative growth of Thompson Seedless. *Irrig Sci* 43:221–232

- Williams LE, D.W. Grimes, C. J. Phene CJ (2010b) The effects of applied water at various fractions of measured evapotranspiration on reproductive growth and water productivity of Thompson Seedless. *Irrig Sci* 28:233–243
- Williams, L. E. and D. W. Grimes. 1987. Modelling vine growth- development of a data set for a water balance subroutine. *Proceedings of VI Australian wine industry Technical Conference, South Australia*, 169-174.
- Williams, L. E. and M. A. Matthews. 1990. "Grapevine." *Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy monograph*. 30: 1019-1055.
- Williams, L. E., N. K. Dokoozlian and R. L. Wample. 1994. *Grape. Handbook of environmental physiology of fruit crops*. S. B. and A. P.C. Orlando. Florida., CRC. Press.: 85-133.
- Yuste, J. 1995. *Comportamiento fisiológico y agronómico de la vid (Vitis vinifera L.) en diferentes sistemas de conducción en secano y regadío. Tesis Doctoral. Madrid, E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid: 280.*
- Zamboni, M. and Iacono, F. 1988. *Etude des variations du potentiel osmotique et de l'elasticite cellulaire dans des vignes soumises a un stress hydrique . Conn. Vigne Vin* 22, 241-249.
- Zufferey, V. 2000. *Echanges gazeux des feuilles chez Vitis vinifera L. (cv. Chasselas) en fonction des parametres climatiques et physiologiques et des modes de conduite de la vigne. Tesis Doctoral. Zurich, Ecole Polytechnique Federale: 335.*

CAPÍTULO III:

MATERIAL Y MÉTODOS GENERALES.

III.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	45
III.2	CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS.....	46
III.3	CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS.....	49
III.4	CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS.....	53
III.5	PARCELAS EXPERIMENTALES.....	54
	III.5.1 Diseño y dispositivo experimental.....	54
	III.5.2 Alimentación hídrica.....	56
	III.5.3 Inicio y programación del riego.....	60
III.6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	61
III.7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	61

CAPÍTULO III: MATERIAL Y MÉTODOS GENERALES.

En este capítulo se desarrolla el material y métodos común a todos los estudios realizados y descritos en los cuatro capítulos de resultados correspondientes (Capítulos: IV, V, VI y VII). Además, cada capítulo de resultados contiene un material y métodos específico de cada estudio.

III.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.

La parte experimental de campo se desarrolló en la finca “La Alcoholera”, perteneciente a Bodegas Licinia, ubicada en la localidad de Chinchón, Comunidad de Madrid, España (40° 12' N, 3° 28' W, 550 snm). Durante 2010 y 2011 se realizaron estudios en cepas del cv. Cabernet Sauvignon (clon 15), injertadas sobre 41B y plantadas en 2005. Con poda corta en Cordón Royat unilateral de 80 cm de altura, y cuya vegetación alcanzó una altura de 97 cm. Las cepas del ensayo estaban conducidas verticalmente en espaldera (VSP), con 10 yemas por metro lineal. Las plantas dentro de la fila estaban separadas 1 m y la distancia de la calle era de 3 m. La orientación de las filas era norte – sur.

Tabla III.1: Caracterización de las parcelas de referencia donde se establece el ensayo. Bodegas Licinia. Año 2010 y 2011.

Variedad	Cabernet Sauvignon
Clon	15
Patrón	41B
Año de Plantación	2005
Marco de Plantación	3 x 1
Sistema de Conducción	VSP; Cordón Royat Unilateral
Poda	Corta, pulgares 2 yemas vistas
Yemas-cepa⁻¹	10
Orientación	N - S
Sistema de Riego	Goteo (dgoteo = 1 m) (Q = 2,5 L/h)
Pendiente	< 2 %
Manejo del Suelo	Cubierta vegetal (bromo y vulpia) Eliminación en Floración

Las técnicas empleadas en el manejo del cultivo se han aplicado por igual en toda la parcela experimental, atendiendo siempre a un correcto cultivo del viñedo, así como, al cumplimiento de la legislación vigente de cultivos ecológicos: abonado natural, mantenimiento del suelo, etc.

El manejo del suelo consistió en una cubierta vegetal autosemillada, controlada mediante siega. Las especies sembradas fueron bromo y vulpia. Se practicó una primera siega después de que la cubierta formase la semilla para así, segarla y dejarla en la calle favoreciendo el autosemillado de la cubierta y la supervivencia para el año próximo.



Imagen III.1: Situación de la parcela experimental. Fuente: Visor SigPac. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

III.2 CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS.

El suelo donde se realizó el ensayo corresponde a un Xerochrept calcixerolico, según la clasificación USDA-Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2006). El horizonte más superficial, de 0 a 30 cm de profundidad, es el horizonte orgánico de laboreo y contiene las raíces de la cubierta vegetal, tiene una textura franco-limosa, un contenido en caliza activa de 5,15 % y un contenido en materia orgánica de 0,92 %. A partir de los 30 cm de profundidad se encuentra un horizonte cálcico, hasta los 90 cm de profundidad, con una textura franco-arcillosa, un contenido en caliza activa de 9,72 % y un contenido en materia orgánica de 0,87 %. (Ver tabla III.2)

La parcela se encuentra situada al final de una ladera. El material originario del terreno son margas y calizas, con una pedregosidad inferior al 1%, los afloramientos rocosos y la salinidad son nulos y la pendiente es inferior al 2%.



Imagen III.2: Perfil del suelo de la parcela donde se desarrollo el ensayo.

Tabla III.2: Características edafológicas del ensayo, descripción de los horizontes del perfil del suelo hasta 130 cm de profundidad, clasificación según USDA-Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2006), análisis textural, el contenido en materia orgánica (M.O.; %), la conductividad eléctrica (CE; mmhos/cm), el pH, el contenido en caliza activa (C. activa; %), los cationes extraíbles (meq/100g) y la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.; meq/100g).

Prof (cm)	Hzte genérico	E.Gruesos (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural
0-30	Bk	8,98	31,9	49,5	18,6	Fr-Lim
30-150	Bm	15,9	32,8	46,1	21,1	Fr - Ar
	M. O. (%)	CE (mmhos/cm)	pH (1;2,5)	C. activa (%)	Carbonatos	
0-30	0,92	0,48	7,7	5,17	21,69	
30-150	0,87	2,39	7,4	9,72	25,38	
	K (ppm)	P (ppm)	Mg (ppm)	K/Mg	Ca/Mg	Sat. (%)
0-30	208	19,3	135	0,5	15,3	46
30-150	136	7,9	137	0,3	15,3	53
	Cationes Extraíbles (meq/100g)				(meq/100g)	
	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	C.I.C.	C.I.C.E.
0-30	17,01	1,12	0,53	0,38	8,92	19,05
30-150	17,23	1,13	0,35	0,44	9,73	19,14
	Oligoelementos (ppm)					
	Hierro	Cobre	Mg	Zn	Boro	
0-30	6,11	0,89	6,19	0,39	0,11	
30-150	5,8	0,8	4,5	0,2	0,1	

III.3 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS.

La región donde se realizó el estudio presenta un clima semiárido, con una precipitación media anual de 400 mm, de los cuales algo menos del 50 % cae durante el período de reposo.

Los parámetros meteorológicos fueron registrados por la estación Meteorológica GroweatherTM System (Davis), situada en la parcela experimental. La evapotranspiración de referencia (ET_0) fue calculada utilizando el método FAO Penman-Monteith (Allen et al. 1998). La precipitación efectiva (Pe), después de consultar diversos autores (Coombe y Dry, 1992; FAO, 1990) se calculó mediante los siguientes criterios:

- Una lluvia aislada menor de 7 mm se consideró no efectiva.
- Una lluvia aislada de 7 – 12 mm se considero efectiva en un 50%.
- Una lluvia aislada en más de 12 mm se considero efectiva el 100%.
- Lluvias continuas de más de 7 mm se consideraron efectivas al 100% exceptuando los primeros 7 mm.



Imagen III.3: Estación meteorológica GroweatherTM System (Davis), situada en la parcela experimental.

En el tiempo de reposo (caída de hoja hasta brotación), las precipitaciones en el 2010 fueron abundantes (351,4 mm) aproximándose a la precipitación media anual de la zona (~ 400 mm), recargándose el perfil del suelo y dejando escasas precipitaciones en la fase de brotación y crecimiento inicial de los pámpanos. Sin embargo en el 2011 se registraron menos precipitaciones en el periodo de reposo (181,8 mm) y abundantes lluvias en los meses de Abril y Mayo, de brotación a floración (Figura III.2). En la etapa de crecimiento vegetativo de la baya, las lluvias en ambos años fueron similares y próximas a 0 mm.

En Julio y Agosto del 2011 se registraron temperaturas inferiores que en 2010 pero, sin embargo, en los meses de Junio y Septiembre éstas fueron mayores. Sucediéndose la elevación de la temperatura con anterioridad al 2010, ocasionando, así, un mayor periodo de altas temperaturas en 2011 (ver figura III.2).

Amerine y Winkler (1944) utilizaron la temperatura para definir la aptitud vitivinícola de las regiones. Para ello utilizaron la integral térmica eficaz (GDD_{10} , grados-día⁻¹) definida como la suma de las temperaturas medias diarias por encima de la temperatura umbral de crecimiento de la vid, o temperatura activa, (10°C) desde el 1 de abril al 30 de octubre. En 2011 se registraron 1952 grados-día⁻¹, que supone 246 grados más que en 2010.

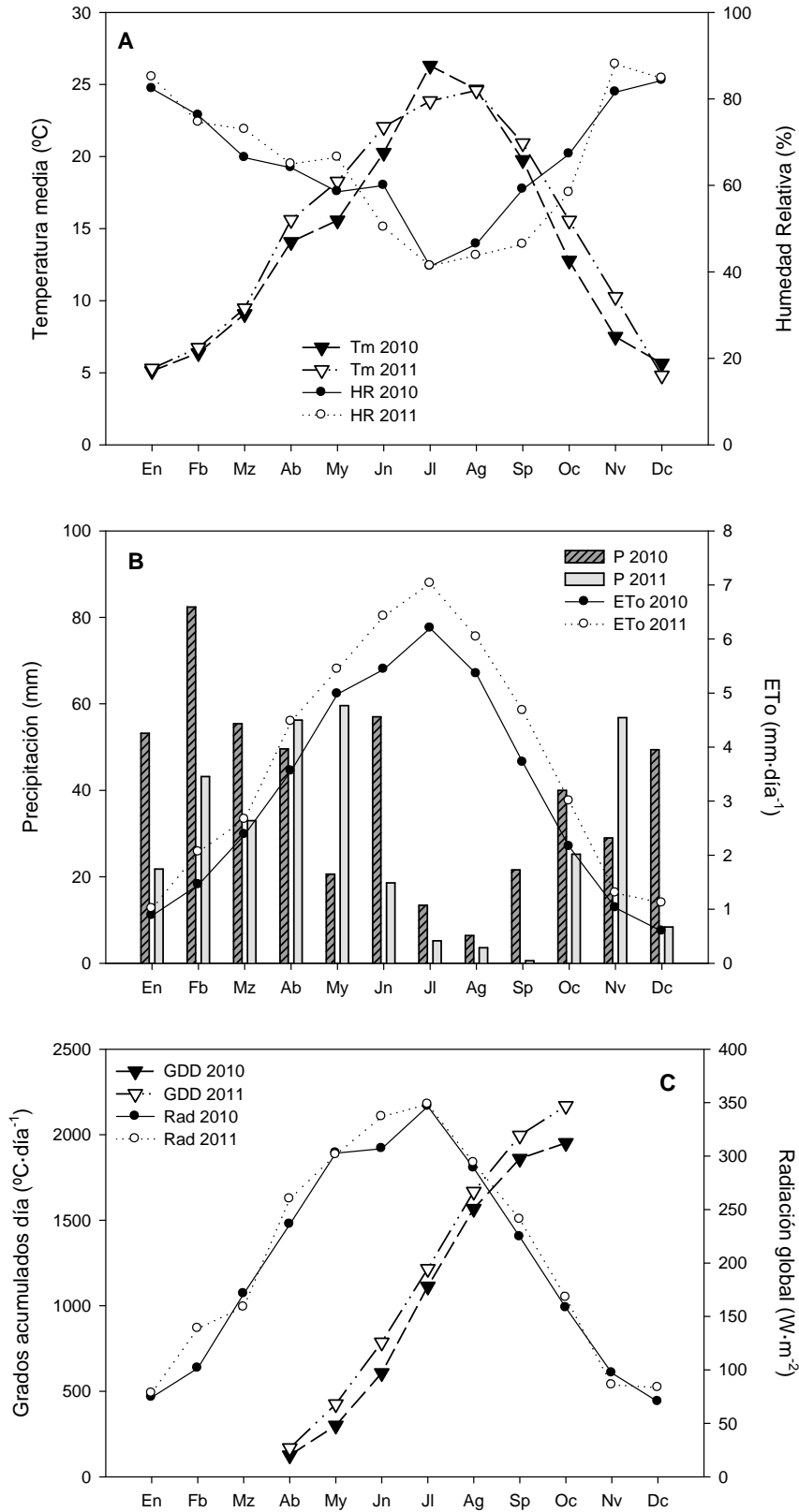


Figura III.1: Evolución anual de: (A) la temperatura media (T, °C) y humedad relativa (HR, %), (B) precipitaciones efectivas (Pe, mm) y evapotranspiración de referencia (ET₀, mm·día⁻¹), (C) radiación solar global (Rad.Solar, W/m²) y de los grados día acumulados desde el 1 de abril (GDD₁₀, grado·día⁻¹), del año 2010 y 2011. Los datos proceden de la estación situada en la propia parcela.

En la tabla III.3 se muestran los datos meteorológicos de las dos campañas (2010 y 2011) diferenciados en los siguientes periodos: reposo de la vid (desde caída de hoja hasta brotación), de brotación (Br) a prefloración (PFI), de prefloración (PFI) a cierre de racimos (CR), de cierre de racimos (CR) a envero (E) y de envero (E) a vendimia (V). Siguiendo la clasificación de Eichhorn y Lorenz, modificada por Coombe, los estados fenológicos descritos serían los siguientes: Brotación = 4; pre-floración = 19; cierre de racimos = 33; envero = 35; vendimia = 38

Tabla III.3: Temperatura media (Tm; °C), precipitación efectiva* (Pe; mm), evapotranspiración de referencia (ET₀; mm) y acumulación de temperaturas eficaces** (GDD₁₀; grado-día) durante el periodo de reposo y en los periodos comprendidos entre: brotación (Br; 4) y prefloración, prefloración (PFI; 19) y cierre de racimos, cierre de racimo (CR; 33) y envero, envero (E; 35) y vendimia (V; 38); en el 2010 y 2011.

	Tm (°C)	Pe (mm)	ET ₀ (mm)	GDD ₁₀ (grado-día ⁻¹)
2010				
Reposo		209,9	258,4	
Br - PFI	17,4	7,8	193,1	235,6
PFI – CR	21,9	45,4	260,3	546,4
CR – E	26,2	0	119,6	296,1
E – V	21,6	12,4	290,5	753,7
Br – V	21,7	65,6	863,5	1831,7
FI – V	23,2	57,8	670,4	1596,1
Año	13,9	233,6	1147,2	1952**
2011				
Reposo		59,7	245,1	
Br - PFI	16,1	69,0	201,6	243,3
PFI – CR	19,0	23,5	182,6	304,7
CR - E	24,4	0	219,0	416,8
E - V	23,9	0	344,0	794,8
Br – V	20,9	92,5	947,3	1759,6
FI – V	22,4	23,5	745,7	1516,3
Año	14,8	191,3	1377,1	2168**

(*) Lluvia aislada < 7 mm no es efectiva; lluvia aislada de 7-12 mm es efectiva en un 50%; lluvia aislada > 12 mm es efectiva al 100%; y lluvias continuas > 7 mm son efectivas al 100% exceptuando los primeros 7 mm. (**) Grados día calculados desde el 1 de Abril hasta el 31 de Octubre.

La demanda atmosférica del 2011 fue mayor durante el crecimiento y maduración de la uva, 563 mm desde el cierre del racimo hasta vendimia, frente a 410 mm del 2010. Debido a las altas temperaturas de Junio y Julio del 2011 en el periodo comprendido entre cierre de racimos y pre-envero 416,8 grados-día, que supuso 121 grados más que el año anterior, 2010. Además, la temperatura media de floración a vendimia fue mayor en el 2010, 1 °C más que en el 2011, pero, sin embargo, el periodo de pre-envero a vendimia, el cual es muy importante para la maduración del fruto fue 2,3 °C superior en el 2011.

En el periodo de maduración de la baya el 2011 fue un año más extremo climatológicamente hablando que el 2010. Debido a que la precipitación fue menor, la demanda evapotranspirativa fue mayor desde cuajado a vendimia, al igual que las temperaturas medias, que fueron mayores en este periodo.

III.4 CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS.

En la tabla III.4 se muestran las fechas de los estados fenológicos principales de los años de estudio (2010 y 2011). Cada fecha se obtuvo como media de las parcelas experimentales, cuando más del 50 % de sus yemas o brotes habían alcanzado cada uno de los estados fenológicos señalados. Para su determinación se optó por la descripción de Eichhorn *et al.*, 1977, modificada por Coombe (1995). La madurez junto con la fecha de vendimia se determinó a partir de los resultados de los análisis semanales del mosto iniciados desde enero.

Tabla III.4: Fecha, días transcurridos desde el 1 de enero (Doy) y los grados día acumulados (GDD_{10} ; grados \cdot día⁻¹) de los estados fenológicos más representativos del 2010 y 2011. Según el método de Eichhorn y Lorenz (1977) modificado por Coombe (1995).

	Fecha		Doy		GDD_{10} (grados-día ⁻¹)	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011
Brotación	21-abr	08-abr	111	98	48	39
Floración	09-jun	19-may	160	139	410	287
Cuajado	14-jun	01-jun	165	152	438	415
Envero	13-ago	21-jul	225	202	1315	1049
Vendimia	07-oct	15-sep	280	258	1900	1830

Tabla III.5: Días transcurridos entre los estados fenológicos más representativos del 2010 y 2011. Según el método de Eichhorn y Lorenz (1977) modificado por Coombe (1995).

	Días Transcurridos	
	2010	2011
Brotación - Floración	49	41
Floración - Cuajado	5	13
Cuajado - Envero	60	50
Envero - Vendimia	55	56

III.5 PARCELAS EXPERIMENTALES.

III.5.1 Diseño y dispositivo experimental.

El dispositivo experimental general correspondió a un diseño de 4 tratamientos con 3 repeticiones cada uno, un total de 12 parcelas experimentales escogidas de forma aleatoria sobre el terreno (Figura III.3). Diseño totalmente aleatorio.

Cada parcela experimental constó de 5 filas, en las 3 filas del medio se realizó la toma de datos; y las filas externas, así como las cepas extremas de cada fila, se consideraron como bordes. El número de plantas en cada fila constó de 30 cepas como mínimo.

Son parcelas diseñadas con un sistema de riego por goteo que permitió variar la dosis de agua a través de válvulas de cierre individuales, colocadas al inicio de cada fila de plantas.



Imagen III.4: Parcelas experimentales en diferentes momentos del ciclo de la vid.

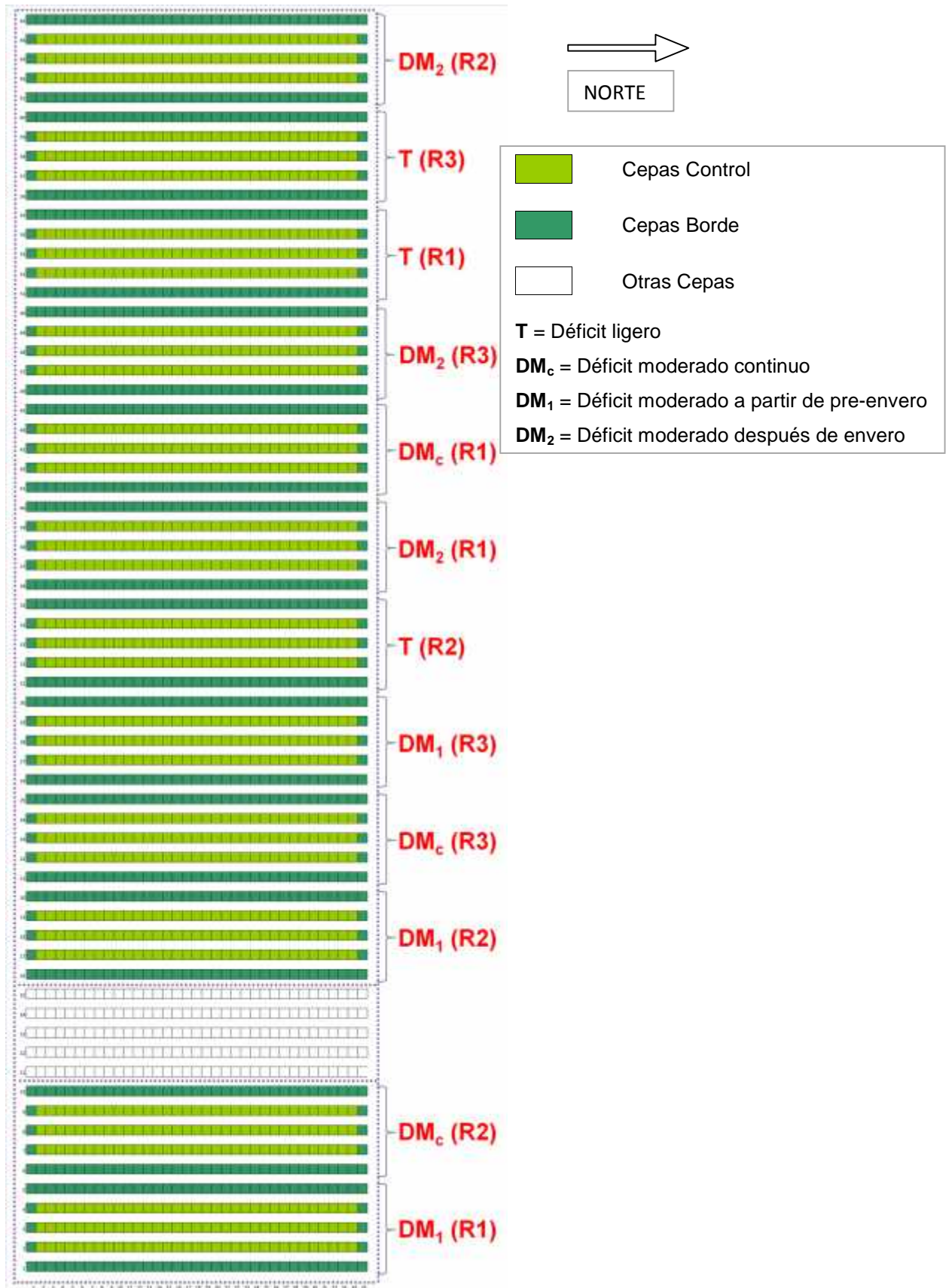


Figura III.2: Esquema del dispositivo experimental de la parcela de Cabernet Sauvignon.

III.5.2 Alimentación hídrica.

Los tratamientos corresponden al establecimiento de regímenes deficitarios de riego en diferentes intensidades: déficit moderado y déficit ligero; y en distintas etapas del cultivo: en los periodos anterior y posterior al envero.

En la zona centro de la Península Ibérica donde se realizó el ensayo, las limitaciones al crecimiento vegetativo comienzan en floración, cuando los contenidos de agua en el suelo no satisfacen la demanda de la planta, debido a las condiciones climáticas (elevación de la demanda atmosférica) y a la superficie foliar alcanzada. Por eso se planteó iniciar el riego en aquellas plantas sometidas a déficit ligero en el momento justo anterior a la floración completa, (en prefloración), para conseguir obtener las diferentes intensidades de riego que se habían planteado en el diseño del experimento: plantas con déficit ligero frente a plantas con déficit moderado.

En la parcela de estudio se repitió el mismo tratamiento experimental en 2010 y 2011. Se estudió 4 tratamientos deficitarios en agua dependiendo del estado fenológico.

- **T:** *Déficit ligero.* Tratamiento con un $k_c = 0,6$ desde floración.
- **DM_c:** *Déficit moderado continuo.* Aporte hídrico a partir de cierre de racimos en 2010 y de pre-envero en 2011 con un $k_c = 0,3$ hasta vendimia.
- **DM₁:** *Déficit moderado a partir de pre-envero.* Se comenzó a regar en floración, con un $k_c = 0,6$ en 2010 y un $k_c = 0,5$ en 2011; y se redujo el aporte hídrico a partir de pre-envero, con un $k_c = 0,3$ en 2010 y un $k_c = 0,2$ en 2011.
- **DM₂:** *Déficit moderado hasta pre-envero.* Se inició el riego en 2010 en el cierre de racimos, a igualdad de condiciones que el tratamiento DM_c, con un $k_c = 0,3$. En pre-envero se aumentó el riego en 2010 hasta $k_c = 0,6$ y en 2011, fue en pre-envero cuando se comenzó a regar con un $k_c = 0,6$.

Se consideró pre-envero, al inicio de la segunda curva sigmoideal que describe el peso de la baya (Figura III.4), se correspondió con el estado fenológico 34, (comienzan a ablandarse las bayas y comienza a incrementarse el °Brix) que describe el método de Eichhorn y Lorenz (1977) modificado por Coombe (1995)

Por otro lado, en la alimentación hídrica del ensayo se reemplazó menos agua de la que potencialmente transpiró la planta, para ello se establecieron unos porcentajes de la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (ET_0) dependiendo del estado fenológico. Y esto es lo que se denominó coeficiente de cultivo (k_c).

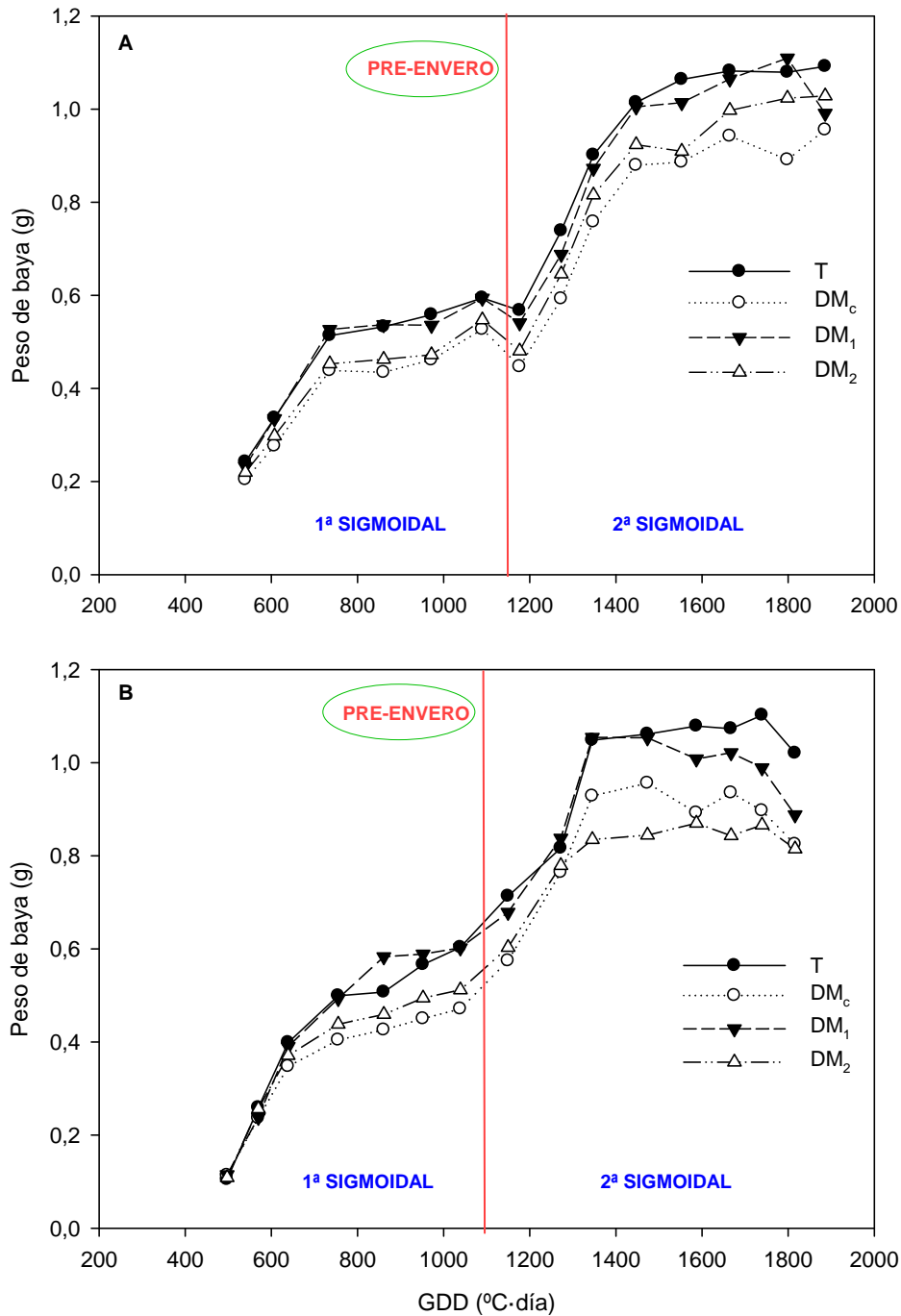


Figura III.3: Evolución del peso de baya para las diferentes dosis de riego, en función de los grados día acumulados (GDD_{10} ; $^{\circ}C \cdot día^{-1}$) en 2010 (**A**) y 2011 (**B**). La línea roja señala el pre-enero.

Los coeficientes que se eligieron para este trabajo se definieron después de realizar un meticuloso estudio a partir de los trabajos anteriormente realizados en el grupo de investigación (GI Viticultura) en la zona centro de España con la variedad Cabernet Sauvignon y otras variedades como: Syrah, Tempranillo, Merlot, Cabernet Franc, etc. Y se estudió que coeficientes de cultivo eran necesarios para obtener un déficit moderado y un déficit ligero, para el diseño del ensayo.

Los coeficientes de cultivo (k_c) de los 4 tratamientos variaron de 0 a 0,6 en función del momento fenológico y de las características climáticas de cada año. El riego aportado fue similar en los dos años, pero en el tratamiento T (déficit ligero), fue mayor el volumen de agua aplicado, 50 mm más en el 2011, debido principalmente al aumento de la evapotranspiración y de la temperatura, y al crecimiento desmesurado de las cepas, se aportó más agua para cubrir parte de las necesidades hídricas de la planta y que siguiese actuando como déficit ligero. Además en 2011 se empezó a regar después DM_2 que en 2010 (próximo a envero en 2011, mientras que en el 2010 se inició cerca del cierre de racimos) para extremar los tratamientos.

A continuación se representa un esquema de la alimentación hídrica media de cada tratamiento. Acompañado de tablas explicativas donde se detallan los coeficientes de cultivo teóricos (k_c) que se establecieron al inicio del ensayo (ver tabla III.6), el volumen de agua aplicado a cada tratamiento y en cada año diferenciado en 2 etapas (ver tabla III.7): la primera desde el inicio del riego hasta el cambio de riego y la segunda desde el cambio de riego hasta final de riego. Y por último se detallan los porcentajes de la ET_0 reales que se aplicaron cada año y en cada momento (ver tabla III.8).

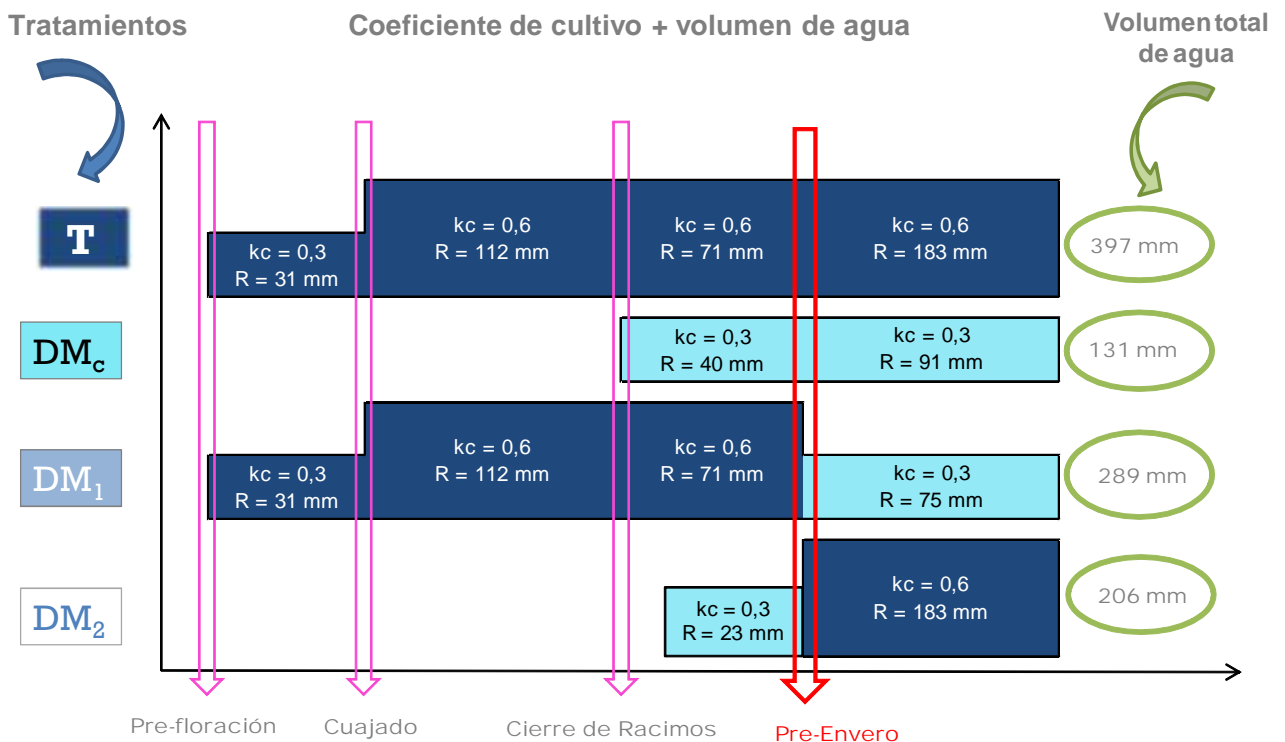


Figura III.4: Esquema del diseño experimental. Valores medios de los dos años de estudio 2010 y 2011.

Tabla III.6: Descripción de los distintos tratamientos del ensayo de riego en Cabernet Sauvignon. Periodos de aplicación de los distintos riegos: 1 Abril (1 Ab), prefloración (PFI), cuajado (C), cierre de racimos (CR), pre-enero (PEn), vendimia (V), final del riego. **Coefficientes de cultivo teóricos (kc) y volumen de agua (R; mm)** utilizado en cada tratamiento y periodo de riego. 2010 y 2011.

2010		Déficit ligero (T)		Déficit moderado continuo (DMc)		Déficit moderado a partir de pre-enero (DM ₁)		Déficit moderado hasta pre-enero (DM ₂)	
Periodos riego	kc	R (mm)	kc	R (mm)	kc	R (mm)	kc	R (mm)	
1 Ab – PFI	0	-	0	-	0	-	0	-	
PFI – C	0,3	31	0	-	0,3	31	0	-	
C – CR	0,5	88	0	-	0,5	88	0	-	
CR – PEn	0,6	93	0,3	46	0,6	93	0,3	46	
PEn – V	0,6	173	0,3	85	0,3	85	0,6	173	
V - 24 Oct	0,3	10	0,3	10	0,3	10	0,3	10	

2011		Déficit ligero (T)		Déficit moderado continuo (DMc)		Déficit moderado a partir de pre-enero (DM ₁)		Déficit moderado hasta pre-enero (DM ₂)	
Periodos riego	kc	R (mm)	kc	R (mm)	kc	R (mm)	kc	R (mm)	
1 Ab – PFI	0	-	0	-	0	-	0	-	
PFI – C	0,3	32	0	-	0,3	32	0	-	
C – CR	0,5	135	0	-	0,5	135	0	-	
CR – PEn	0,5	49	0,3	33	0,5	49	0	-	
PEn – V	0,6	192	0,3	96	0,2	64	0,6	192	
V - 16 Oct	0,3	38	0,3	38	0,3	38	0,3	38	

Tabla III.7: Volumen de agua aplicado en mm, diferenciado en dos etapas: **Etapa I** desde el inicio del riego (floración) hasta el cambio de riego (pre-enero) y **Etapa II** desde el cambio de riego hasta final de riego. En los cuatro tratamientos y en los dos años de estudio.

	2010			2011		
	Etapa I	Etapa II	Total 2010	Etapa I	Etapa II	Total 2011
T	212	183	395	215	230	445
DM_c	46	95	141	33	134	167
DM₁	212	95	307	215	102	317
DM₂	46	183	229	0	230	230

Tabla III.8: Descripción de los distintos tratamientos del ensayo de riego en Cabernet Sauvignon. Fecha de los estados fenológicos: brotación, pre-floración, cierre de racimos, pre-verano y vendimia. Periodos de aplicación de los distintos riegos. **Coefficientes de cultivo reales** aplicados en cada tratamiento y periodo de riego (expresados como % de la ET_0).

2010	T	DM _c	DM ₁	DM ₂
Periodos riego		% ET ₀		
1 Ab – Prefloración				
Prefloración – Cuajado	25	0	25	0
Cuajado – Cierre racimo	50	0	50	0
Cierre racimo – Pre-verano	70	35	70	35
Pre-verano – Vendimia	70	35	35	70
Vendimia - 24 Oct	35	35	35	35
2011	T	DM _c	DM ₁	DM ₂
Periodos riego		% ET ₀		
1 Ab – Prefloración				
Prefloración – Cuajado	30	0	30	0
Cuajado – Cierre racimo	50	0	50	0
Cierre racimo – Pre-verano	50	35	50	0
Pre-verano – Vendimia	70	35	25	70
Vendimia - 16 Oct	35	35	35	35

III.5.3 Inicio y programación del riego.

En 2010 se inicio el riego en prefloración, para los tratamientos T y DM₁ con un coeficiente de cultivo $k_c=0,3$ y en pre-verano para los tratamientos DM_c y DM₂, con un coeficiente de cultivo $k_c=0,3$. En 2011, en el tratamiento DM₂ se inició en verano el riego para conseguir extremar los tratamientos.

La programación del riego fue semanal desde su inicio y se realizó en base a la demanda atmosférica.

- Evapotranspiración potencial del cultivo de referencia: ET_0 (mm/semana)
 - Evapotranspiración del cultivo: $ET_c = k_c \times ET_0$ (mm/semana)
 - Precipitación efectiva: Pe (mm)
 - Necesidades de riego (mm): **Riego Neto = $(ET_c - Pe) / Ce$**
- siendo: ET_c = evapotranspiración del viñedo (mm/día)
 Pe : precipitación efectiva (mm)
 Ce : eficiencia del riego (<1)
- Caudal gotero: 2,5 l/h y por superficie: 2,5 l/h.m²
 - Marco del gotero: 1 m²/gotero

La evapotranspiración de referencia (ET_0) fue calculada utilizando el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998).

III.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Según el diseño experimental el análisis estadístico de la mayoría de los resultados se ha efectuado mediante el análisis de varianza. Las diferencias entre tratamientos fueron evaluadas por el test múltiple de Duncan, con un nivel de probabilidad de p 0.05. La significación del análisis de varianza se ha determinado para alcanzar los siguientes niveles de probabilidad: p 0.05, p 0.01 y p 0.001 (*, ** y ***, respectivamente). Para ello se ha utilizado el programa estadístico SPSS, versión 15.0 (SPSS Inc. Chicago, Illinois).

Para testar relaciones entre variables se efectuaron regresiones simples de diversos tipos mediante el programa estadístico R versión 3.0.1. Se presentaron igualmente las ecuaciones, coeficientes de determinación y niveles de significación estadística para los niveles de probabilidad p 0.05, p 0.01 y p 0.001 (*, ** y ***, respectivamente). Para la realización de los gráficos se utilizó el programa SigmaPlot 2000 (Systat, Richmond, CA).

III.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. FAO, Rome.
- Amerine, M.A. & Winkler, A.J., 1944. Composition and quality of musts and wines of Californian grapes. *Hilgardia*, 15,493-637.
- Coombe, B.G., 1995. Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1, 104-110.
- Coombe, B.G., P.R. Dry. 1992. *Viticulture. Volume 2 Practices, Winetitles*. Adelaide. Australia.
- Eichhorn, K.; H. Lorenz. 1977. *Phaenologische Entwicklungsstadien der Rebe. Deutsche Weinbau* 1.
- Soil Survey Staff. 2006. *Keys to Soil Taxonomy*, 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

CAPÍTULO IV:

EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO. CONSUMO.

IV.1	RESUMEN.....	65
IV.2	INTRODUCCIÓN.....	66
IV.3	MATERIAL Y MÉTODOS.....	70
IV.3.1	MEDIDAS DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA EN EL SUELO	70
IV.3.2	CALIBRACIÓN DE LA SONDA FDR	72
IV.3.3	DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO	75
IV.3.4	DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DEL SUELO	76
IV.3.5	CÁLCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y DEL CONSUMO DEL VIÑEDO	77
IV.4	RESULTADOS.....	78
IV.4.1	CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO.....	78
IV.4.1.1	Calibración de las sondas de humedad.....	78
IV.4.1.2	Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en 3 zonas de estudio: en la línea, la rodadura y en el centro de la calle.....	79
IV.4.1.3	Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en la zona de raíces.....	85
IV.4.1.4	Evolución del contenido volumétrico de agua en el viñedo.....	89
IV.4.2	CONSUMO.....	92
IV.5	DISCUSIÓN.....	98
IV.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

CAPÍTULO IV: EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO. CONSUMO.

IV.1 RESUMEN.

Se estudió el efecto del déficit hídrico en los estados anterior y posterior al envero sobre la variación del contenido volumétrico de agua en el suelo y, más específicamente, en la zona de raíces; en un viñedo del cv. Cabernet Sauvignon cultivado en espaldera (*VSP*) y con riego localizado. También, se evaluó los efectos en el consumo estacional y anual del viñedo.

Se establecieron cuatro tratamientos experimentales que consistieron en: déficit ligero (T), déficit moderado continuo (DM_c), déficit moderado a partir de pre-envero (DM_1) y déficit moderado hasta pre-envero (DM_2). En todos ellos se mantuvo el mismo número de pámpanos por cepa. El riego se inició en al inicio de la floración en 2010 y en plena floración en 2011.

Mediante un sensor de capacitancia portátil se midió el contenido de agua en el suelo hasta 0,9 m de profundidad. Las mediciones se realizaron en la línea de plantación; en el centro de la calle; y en la posición intermedia entre la línea de plantas y el centro de la calle. El objetivo principal de este capítulo fue conocer como el déficit hídrico continuo en los estados anterior y posterior al envero afecta a la distribución de la humedad en el suelo y al consumo de agua del viñedo.

De desborre a floración la humedad del perfil fue alta y las necesidades de la planta bajas, por lo que las cepas no sufrieron limitaciones de agua que comprometieran su crecimiento vegetativo. Entre floración y envero el aumento de la demanda evaporativa y del consumo de la planta; y la escasez de lluvias, hizo disminuir las reservas de agua en el suelo, acentuándose con el déficit hídrico. Se observó que bajo condiciones de estrés hídrico, el crecimiento vegetativo se limita disminuyendo la migración de fotoasimilados hacia los órganos vegetativos. Esto hace que las plantas desarrolladas bajo déficit hídrico moderado obtengan menor área foliar; y por consiguiente, su consumo también sea menor. En la fase de maduración de la baya, entre envero y vendimia, la humedad del suelo dependió del riego aplicado y del consumo de la planta; dicho consumo dependió a la vez del desarrollo foliar del *canopy* y de la necesidad hídrica de la vid. Por último, se observó que bajo condiciones de déficit moderado continuo (DM_c) las plantas pudieron adaptarse a las condiciones impuestas y fueron capaces de regular su consumo en función de la disponibilidad hídrica del suelo.

IV.2 INTRODUCCIÓN.

La cepa necesita tomar agua del suelo para crecer, desarrollarse, multiplicarse, diferenciarse y realizar sus funciones vitales. En la práctica es necesario determinar en qué momento la cepa requiere agua y cuánta cantidad necesita para lograr los objetivos planteados de producción y calidad del producto final en una explotación vitivinícola. Para conocer el volumen de agua que necesita el viñedo hay que tener en cuenta diferentes factores, así como; el clima, el tipo de suelo, la variedad, el patrón, la conducción del viñedo, el número de yemas o el número de racimos por hectárea, el manejo del suelo, las prácticas culturales, etc.

Numerosos autores han estudiado a lo largo de los años como influye la disponibilidad hídrica en el desarrollo y producción de la cepa, Smart and Coombe (1983), Williams and Matthews (1990), Mc Carthy *et al.* (1992), Goodwin (1995), Nicholas (2004), Creasy and Creasy (2009), White (2009) and Keller 2010. Demostrándose que el suelo va a influir significativamente en el régimen hídrico de la vid a través de su reserva útil (Tregoat, *et al.*, 2002). Y que dependiendo de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo, este diferirá en la capacidad de absorción, almacenar y transmitir el agua de la planta, proporcionando un medio más o menos idóneo para su desarrollo (Gardner, 1983; Pelletier, *et al.*, 1993; Sottile, 2001).

- Variabilidad del contenido volumétrico de agua en el viñedo, distribución espacial.

Existen varios estudios basados en la variabilidad en profundidad del contenido de agua en el suelo y como ésta afecta al desarrollo de la planta (Williams *et al.*, 2012; Ramos *et al.*, 2006; Centeno 2005; Junquera 2011; Romero *et al.*, 2012; Williams 2014; Niculcea *et al.*, 2014 en maceta). También existen trabajos basados en la distribución espacial del contenido de humedad en el suelo en el conjunto del viñedo (Junquera 2011; Romero *et al.*, 2010; Intrigliolo *et al.*, 2012; Williams 2014).

En este capítulo se ha querido estudiar el efecto de los aportes de agua como el riego y la lluvia; y las salidas como la evapotranspiración del suelo y la transpiración del viñedo en la variabilidad del contenido volumétrico de agua en el conjunto del suelo. Además, hay que tener en cuenta que, los riegos localizados aumentan la variabilidad espacial de la humedad del suelo, generando zonas húmedas donde se haya el emisor y alrededores frente a zonas secas. Por eso se ha hecho un primer

estudio de la evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en tres posiciones de la calle.

- En la línea de goteo coincidiendo con la línea de plantación, donde la variabilidad del contenido volumétrico de agua en el suelo va a estar influenciada por el riego y por la absorción de las raíces.
- En la zona media de la calle a 1,5 m. de la línea de plantación; donde la variabilidad del contenido de humedad del suelo va a depender de la lluvia, de la evapotranspiración del suelo y del consumo de la cubierta vegetal.
- En la zona intermedia entre la línea de goteo y la zona media de la calle a 0,75 m. de la línea de plantación.

Se monitorizó la humedad del suelo a través de sensores de capacitancia utilizando la técnica de reflectometría en el uso de la frecuencia (FDR; frequency domain reflectometry). El uso de estas sondas presenta algunos inconvenientes, uno de ellos es que el volumen de suelo muestreado es reducido (Fares y Polyakov 2006, Intrigliolo et al. 2007, IAEA 2008). Por eso se plantearon tres puntos de medida en cada parcela experimental.

Intrigliolo (2012) en Requena con la variedad Tempranillo observó que las sondas de capacitancia instaladas en el suelo determinaban el estado hídrico de la planta. Al relacionar el índice del contenido relativo de agua en el suelo (RSWC) con el potencial hídrico del tallo (ψ_{stem}), pero dicha relación fue específica y se obtuvo previamente una calibración del estado hídrico de la planta "in situ" para poder relacionar ambos parámetros.

McCarthy en 1998 ya consideró necesaria la monitorización de la humedad del suelo para llevar a cabo estrategias de riego deficitario controlado. Este autor añadió que la monitorización regular del suelo también indica las necesidades de riego durante otros periodos del ciclo, además dicha información ayudará al viticultor a saber cuándo comenzar a regar, que volumen de agua tiene que aplicar en cada riego y en qué momentos.

- **Variabilidad del contenido volumétrico de agua en el suelo en la zona de raíces.**

La disponibilidad hídrica del medio está altamente relacionada con el desarrollo de las raíces de la vid. Tanto el exceso como el déficit hídrico severo impiden el desarrollo

de las raíces (Van Zyl 1984). Un déficit en el contenido hídrico del suelo limita el desarrollo de raíces, dificulta la penetración y exploración de éstas en el suelo y limita la movilización de fotoasimilados (Buttrose 1966; Hsiao *et al.* 2000; Keller 2004; Comas *et al.* 2005). Por otro lado, el exceso de agua en el suelo limita el desarrollo de raíces debido principalmente a la falta de oxígeno (Van Zyl 1988; Morlat *et al.* 1993a).

En estudios anteriores se ha demostrado que el déficit hídrico del suelo reduce la capacidad de las raíces de tomar el agua (Steudle 2000), influyendo negativamente en el crecimiento vegetativo y reproductivo de la vid (Matthews and Anderson 1989; Grimes y Williams 1990; Marsal *et al.*, 2008; Williams 2010a,b). Sin embargo mediante técnicas de riego el efecto negativo del estrés hídrico del suelo sobre la productividad de la planta se puede mitigar (Williams *et al.*, 2010a,b). Por otra parte; mediante la regulación del contenido de agua en el suelo, es posible lograr el equilibrio entre el crecimiento vegetativo y el de la baya (McCarthy *et al.*, 2002) pudiendo mejorar la calidad del vino de diferentes formas (McCarthy *et al.*, 2002; Cortell *et al.*, 2005; 2007)

Bravdo y Proebsting (1993) señalaron que, en el caso de sistemas de riego localizado, no tiene sentido el empleo del contenido hídrico medio del perfil para programar el riego. Esto se debe a que la absorción del agua es más rápida habitualmente en las capas superiores del suelo, donde el potencial matricial es mayor, aumentando progresivamente la absorción en zonas profundas al consumirse el agua en las más superficiales.

- Consumo del viñedo y su estacionalidad.

La evaporación de la superficie del suelo y el uso de agua de la planta, determinan el consumo del viñedo (ET) variando enormemente, en consecuencia, según la zona, la estación y las prácticas de cultivo (McCarthy, 1997).

El consumo de la planta está altamente correlacionado con la disponibilidad de agua en el suelo (Van Rooyen *et al.*, 1980; Coombe and Dry, 1992; Mullins *et al.*, 1992; Trambouze and Voltz, 1996; Eastham and Gray, 1998; Gómez del Campo, 1998; Junquera 2011).

Además, hay que tener en cuenta que las necesidades hídricas de la vid no son constantes a lo largo del ciclo, sino que varían dependiendo de la evapotranspiración atmosférica, de la cubierta vegetal, de la transpiración del cultivo y del desarrollo vegetativo del *canopy*.

La demanda del viñedo al principio, cerca del desborre, es baja, porque es cuando los contenidos de agua en el suelo se aproximan a capacidad de campo, y el consumo queda definido principalmente por la demanda atmosférica (ET_0) que es baja. A medida que avanza el ciclo los contenidos de humedad del suelo disminuyen aumentando las resistencias para la absorción de agua, y es la vid quién ejerce un mayor control sobre la transpiración (Smart y Coombe, 1983), coincidiendo con un *canopy* completamente desarrollado y con tasas máximas de ET_0 (Hardie y Considine, 1976; Fűri, 1977; Van Rooyen et al., 1980; Prior y Grieve, 1987; Williams y Grimes, 1987; Mullins et al., 1992) siendo máxima la demanda del viñedo.

Los objetivos de este capítulo fueron conocer cómo déficits hídricos estacionales con diferentes intensidades afectaron a la variación del contenido volumétrico de agua en el suelo en las tres zonas de estudio: en la línea de plantación, en el centro de la calle y en la zona intermedia entre la línea de plantación y el centro de la calle. Cómo afectaron al cómputo de la calle y en general cómo afectaron a la variación global del viñedo.

Por otra parte se compararon los efectos del régimen hídrico en el contenido de humedad del suelo en la zona de máxima densidad de raíces por ser la de mayor absorción y variación.

Y finalmente se evaluó el efecto del riego deficitario estacional y con diferente intensidad en el consumo de agua del viñedo en los estados fenológicos de floración, cierre de racimos, envero, vendimia y final de riego; se evaluó también en los periodos anterior y posterior al cambio de riego.

IV.3 MATERIAL Y MÉTODOS:

IV.3.1 MEDIDAS DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA EN EL SUELO

El balance del contenido de agua en el suelo y el estudio del consumo de agua se realizó semanalmente durante el ciclo de la planta (del 1 de Abril al 31 de Octubre), y mensualmente en la etapa de reposo de la cepa (del 1 de Noviembre al 31 de Marzo) en 2010 y 2011.

El contenido de agua en el suelo se midió mediante un sensor FDR (Reflectometría en el Dominio de Frecuencia). Este sensor se basa en las propiedades del suelo como condensador eléctrico y mide el coeficiente dieléctrico aparente del mismo (ϵ'), el cual es fundamentalmente función de la humedad, dado que el aire es 1, el de los sólidos del suelo es 2-5 y el del agua es 80. Los circuitos del sensor oscilan con una frecuencia que depende de la capacitancia del suelo, determinada por la humedad del mismo (Intrigliolo et al. 2007).

Las medidas en campo se realizaron mediante sondas FDR portátiles (Diviner 2000, Sentek Pty Ltd, Australia) en las que el sensor se desliza manualmente a lo largo de unos tubos de acceso que previamente se han instalado en el terreno. El sensor realiza automáticamente una medida cada 10 cm.

La zona de influencia, sobre la que se realiza la medida, corresponde a unos 10 cm en altura y 7 cm aproximadamente de radio, si bien es en los primeros 3 cm donde se mide el 90% de la señal. Por ello, la instalación del tubo de acceso debe ser muy cuidadosa, a fin de que exista un completo contacto del tubo con el suelo, evitando que queden huecos que darían lectura falsas, tanto si se llena de aire o de agua, dadas las diferencias de coeficiente dieléctrico (Intrigliolo et al. 2007).



Imagen IV. 1: Sensor FDR junto con la unidad de visualización portátil de la sonda Diviner 2000.

En cada parcela experimental se instalaron tres tubos de acceso, en una línea perpendicular a la dirección de las filas y equidistante a los troncos de dos plantas consecutivas. Un tubo de acceso en la línea de plantación, otro separado 0,75 m de la línea de plantación, y otro en el centro de la calle (a 1,50 m de la línea de plantación). El contenido de agua en el suelo se midió a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 cm de profundidad.

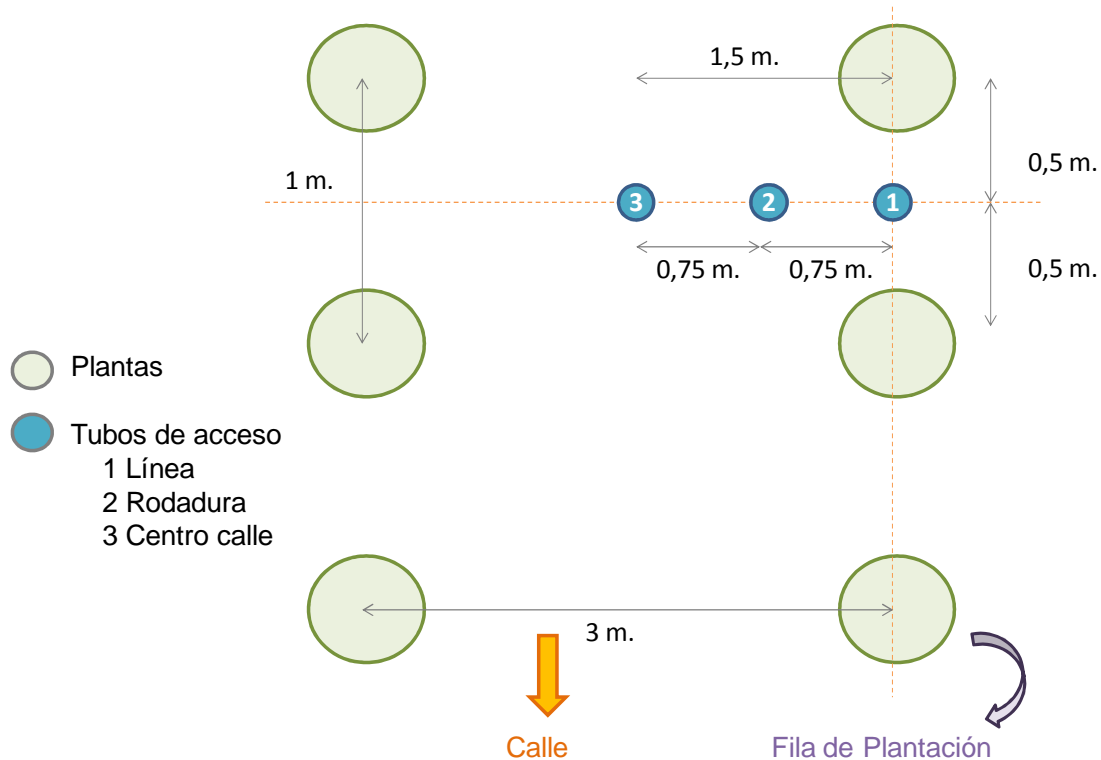


Figura IV.1: Esquema de la colocación de los tubos de acceso de la sonda portátil Diviner 2000, para medir la humedad del suelo en el perfil.

En el documento se ha utilizado una nomenclatura para determinar las distintas posiciones de los tubos de acceso, se ha llamado “línea” al tubo de acceso situado en la línea de plantación, se ha llamado “rodadura” al tubo de acceso situado a 0,75 m de la línea de plantación y por último se ha llamado “centro de la calle” al tubo de acceso situado en mitad de la calle a 1,5 m de la línea de plantación.

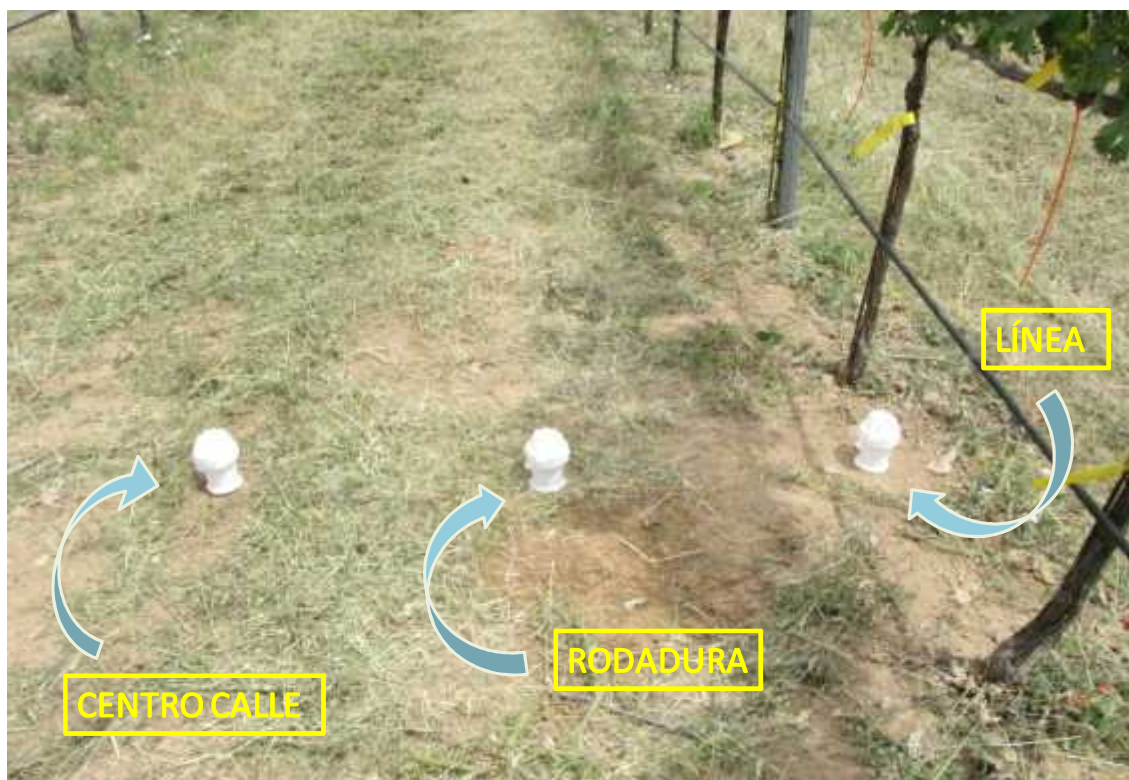


Imagen IV.2: Tubos de acceso de la sonda portátil Diviner 2000, para medir la humedad del suelo en el perfil. Y nomenclatura utilizada en el trabajo para determinar las distintas posiciones de los tubos de acceso.

Los sensores de FDR, requieren transformar la señal medida a valores de humedad volumétrica mediante un calibrado, el cual se realiza internamente en el procesador de datos (Intrigliolo et al. 2007). En la mayoría de los suelos es suficiente con la calibración estándar (precisión del 5%). Sin embargo, en nuestro ensayo se calibró para aumentar la precisión de la medida.

IV.3.2 CALIBRACIÓN DE LA SONDA FDR.

La calibración se realizó en dos momentos del ciclo; un primer momento donde la humedad del suelo fuera máxima (suelo saturado de agua); y un segundo momento donde la humedad del suelo fuera mínima (suelo seco).

La ecuación de calibración de la sonda Diviner 2000 es derivada de un análisis de regresión de las medidas de SF (frecuencia a escala) frente a la humedad del suelo obtenida con el método gravimétrico θ_v (%). El fabricante propone una ecuación por defecto que se puede emplear para obtener los datos relativos. Pero en nuestro caso se prefirió desarrollar una ecuación de calibración específica para el suelo dónde se ubicaba el ensayo.

Para obtener la curva de calibración se siguió las indicaciones propuestas por el fabricante (Sentek Pty Ltd 2001).

Mediante una retroexcavadora se abrió una franja en la calle contigua a la calle donde se hallaban los tubos de acceso. Con una profundidad de 1 metro, un ancho comprendido entre la fila de plantación y el centro de la calle y una longitud de 3 metros. Esta operación se realizó en las 12 parcelas elementales del ensayo, ya que todas ellas tenían tubos de acceso para medir la humedad mediante la técnica de FDR.

En cada franja se simuló la posición de cada tubo de acceso (línea de plantación, rodadura y centro de la calle) y se marcó cada 10 cm en profundidad hasta 1 metro. Para así medir el contenido volumétrico de agua en el suelo en las tres posiciones y cada 10 cm de profundidad hasta 1 metro mediante la técnica de TDR (Time-domain Reflectometry), con un equipo portátil Modelo No. 6050X1 del sistema Trase, Soil moisture Equipment Corp. (Santa Bárbara, California). Este proceso se realizó dos veces, una primera vez el 16 de Mayo del 2011, con un contenido volumétrico de agua en el suelo alto. Y una segunda vez el 19 de Octubre del 2011, con una humedad del suelo baja.



Imagen IV.3: TDR (Time-domain Reflectometry), equipo portátil Modelo No. 6050X1 del sistema Trase, Soil moisture Equipment Corp. (Santa Bárbara, California).

El sistema TDR utiliza pulsos de onda electromagnéticos en el rango de 1 MHz a 1 GHz (Da Silva *et al.*, 1998), que se envía a lo largo de una línea de transmisión terminada en guías de acero inoxidable paralelas que se encuentran en estrecho contacto con el suelo. El sistema determina la constante dieléctrica “aparente” como función del tiempo necesario para que las ondas viajen a lo largo de la guía y la longitud de la misma. La relación entre la constante dieléctrica aparente y el porcentaje volumétrico de agua se han establecido bajo condiciones de laboratorio por el fabricante del aparato.

Pasos para obtener la curva de calibración:

Primeramente se realizó la normalización del aparato, obteniéndose la frecuencia a escala para cada muestra según la siguiente fórmula:

$$S = \frac{F_A - F_S}{F_A - F_W}$$

Dónde:

- F_A es la lectura de frecuencia en el tubo de acceso mientras se encuentre suspendido en el aire
- F_S es la lectura en el tubo de acceso en el suelo a un horizonte de profundidad específico.
- F_W es la lectura en el tubo de acceso sumergido en agua.

Se registró las lecturas de SF por cada plano de profundidad y en cada sonda sin hacer ningún promedio.

En segundo lugar se obtuvo el contenido volumétrico de agua en el suelo en volumen (% volumen de agua por volumen de suelo). Además de medir con el TDR el 19 de Octubre se tomaron simultáneamente muestras de suelo cada 10 cm en las tres posiciones (línea, rodadura y centro de la calle) y en las 12 parcelas elementales, para determinar la humedad del suelo en el laboratorio mediante el método gravimétrico. Con estos datos se establecieron pares entre el contenido volumétrico de agua de las muestras determinado en el laboratorio, y sus respectivos valores obtenidos mediante el TDR. Se observó que el contenido volumétrico de agua en la muestra de suelo obtenido en el laboratorio expresado en volumen de agua por volumen de suelo (% vol/vol) tenía un error inferior al 5 % del valor obtenido con el TDR. Se utilizó los datos registrados por el TDR el 16 de Mayo y el 19 de Octubre para establecer pares entre el contenido volumétrico de agua de las muestras, determinado con el TDR, y sus respectivas lecturas de frecuencia a escala (SF).

Y en tercer lugar se diseñó un gráfico donde la variable independiente fueron valores del contenido volumétrico de agua de las muestras, y la variable dependiente fueron valores de frecuencia normalizada, obtenida con las lecturas realizadas por el Diviner 2000. Obteniéndose una ecuación de la siguiente forma:

$$S = A(\theta_v^B) + C$$

Dónde:

SF = Frecuencia a escala (adimensional)

A, B y C = coeficientes de calibración dependiendo del tipo de suelo.

θ_v = Contenido volumétrico (%).

A través de esta gráfica se obtuvo la ecuación de calibración de nuestro suelo y mediante un análisis de regresiones se determinó el coeficiente de determinación R^2 (ver apartado IV.4 Resultados).

IV.3.3 DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO.

La textura es la cantidad relativa expresada en % de arena, % de limo y % de arcilla contenida en una porción de suelo. Este término se refiere a las diferentes proporciones de separados en la fracción mineral del suelo, denominándose de la siguiente manera:

Arenas (Ar): Si sus tamaños son de 2,00 a 0,05 mm de diámetro.

Limos (L): Si sus tamaños son de 0,05 a 0,002 mm de diámetro.

Arcillas (Ac): Si sus tamaños son menores de 0,002 mm de diámetro.

Método empleado para determinar la textura

Método del hidrómetro (*Bouyoucos Modificado*): Permite expresar como porcentaje (%) de peso seco total los diferentes tamaños de partículas que constituyen la fracción de tierra fina del suelo. Se basa en la velocidad de decantación en un medio acuoso de las partículas de arena, limo y arcilla sobre la base de la ley de Stokes.

Primeramente se agregó a la muestra el agente dispersante para separar las partículas de arena, limo y arcilla y se dejó reposar durante veinticuatro horas. Después se agitó de cinco a diez minutos en la licuadora. Y el contenido se vertió en

un cilindro y se aforó, agitándolo con una varilla hasta lograr la homogeneidad en la suspensión. Si se produce espuma, se agrega alcohol amílico. A cada lectura del densímetro de *Bouyoucos* efectuada se tomó la temperatura de la suspensión, con el fin de obtener, el factor de corrección. A los cuarenta segundos se hizo una primera lectura para el cálculo del porcentaje de arena y a las cinco horas se hizo una segunda lectura para el cálculo del porcentaje de arcilla.

$$\% A = (Y * 2) - 100$$

$$\% A = X * 2$$

$$\% Li = 100 - (\% A - \% A)$$

Donde:

Y = lectura del hidrómetro a los 40 segundos ± temperatura corregida a los 40 segundos.

X = lectura del hidrómetro a las 5 horas ± temperatura corregida a las 5 horas.

Este procedimiento se realizó con todas las muestras de suelo obtenidas en el campo. Se dividieron por horizontes: primer horizonte hasta 30 cm de profundidad y un segundo horizonte de 40 - 100 cm de profundidad. Y dentro de cada horizonte se diferenciaron 2 zonas en el primero y 3 zonas en el segundo. Obteniendo 5 muestras por cada parcela elemental.

IV.3.4 DETERMINACIÓN LAS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DEL SUELO.

Se obtuvo la clase textural en diferentes puntos del ensayo para poder definir las características hidrológicas del suelo a través de correlaciones estadísticas entre la textura del suelo, el potencial matricial del suelo y la conductividad hidráulica del mismo. A través de un sistema informático predictivo llamado Soil Water Characteristics Estimates (<http://hydrolab.arsus.gov/soilwater/Index.htm>) Es un modelo de Saxton y Rawls (2006). Se obtuvo la capacidad de campo, el punto de marchitez y la disponibilidad total de agua en el suelo (TSWA).

Este método predictivo ha sido utilizado por diferentes autores en los últimos años para describir las características hidrológicas de su suelo, como por ejemplo: van Leeuwen *et al.*, 2010; Acevedo *et al.*, 2013; Sebastián *et al.*, 2015.

IV.3.5 CÁLCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y DEL CONSUMO DEL VIÑEDO.

La humedad media del conjunto del perfil se determinó ponderando el valor de cada medida y en cada intervalo. En función de la profundidad evaluada y su relación respecto a la profundidad total del perfil considerado, tal y como queda reflejado en la expresión:

$$v_i = (10 \cdot v_1 + 10 \cdot v_2 + 10 \cdot v_3 + 10 \cdot v_4 + 10 \cdot v_5 + 10 \cdot v_6 + 10 \cdot v_7 + 10 \cdot v_8 + 10 \cdot v_9) / 90$$

La humedad del suelo para el conjunto de la calle fue calculada considerando la importancia relativa de la humedad medida en cada posición respecto a la distancia a la línea de plantación, de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$v = (60 \cdot v_1 + 60 \cdot v_2 + 30 \cdot v_3) / 150$$

dónde v_1 , v_2 y v_3 son los contenidos volumétricos de agua en el suelo para el conjunto del perfil (0-90 cm) medidos en la línea, a 75 cm de la línea y en el centro de la calle, respectivamente.

El consumo de agua por el viñedo fue estimado considerando la variación del contenido de agua en el suelo para el perfil 0-90 cm en el conjunto de la calle.

El cálculo de agua consumida en un intervalo comprendido entre los días "i" y "j", ET_{ij} (mm), se ha efectuado según la fórmula:

$$ET_{ij} = [(v^{(i)} - v^{(j)}) \cdot f] + Pe_{ij} + R_{ij} - D_{ij}$$

siendo $v^{(i)}$ y $v^{(j)}$ los contenidos medios de humedad del perfil (expresados en % v/v) en los días "i" y "j" respectivamente; f es el factor de conversión de % v/v a mm de agua en el 1 m de perfil; Pe_{ij} , R_{ij} y D_{ij} son los volúmenes de precipitación efectiva, riego aplicado y drenaje en ese mismo intervalo (mm).

IV.4 RESULTADOS

IV.4.1 CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

IV.4.1.1 Calibración de las sondas de humedad.

La literatura define diferentes métodos para la realización de la calibración, en este trabajo se optó por emplear la metodología propuesta por el fabricante (Sentek Pty Ltd 2001).

Se obtuvo la relación entre las medidas de frecuencia a escala (SF), proporcionadas por el sensor de capacitancia, y los contenidos volumétricos de agua en el suelo (Figura IV.4). Esta relación se ajustó a una ecuación potencial con un alto grado de correlación y altamente significativa. La ecuación obtenida fue:

$$v = 43,38 \cdot SF^{3,26} \quad (p < 0,001; R = 0,85)$$

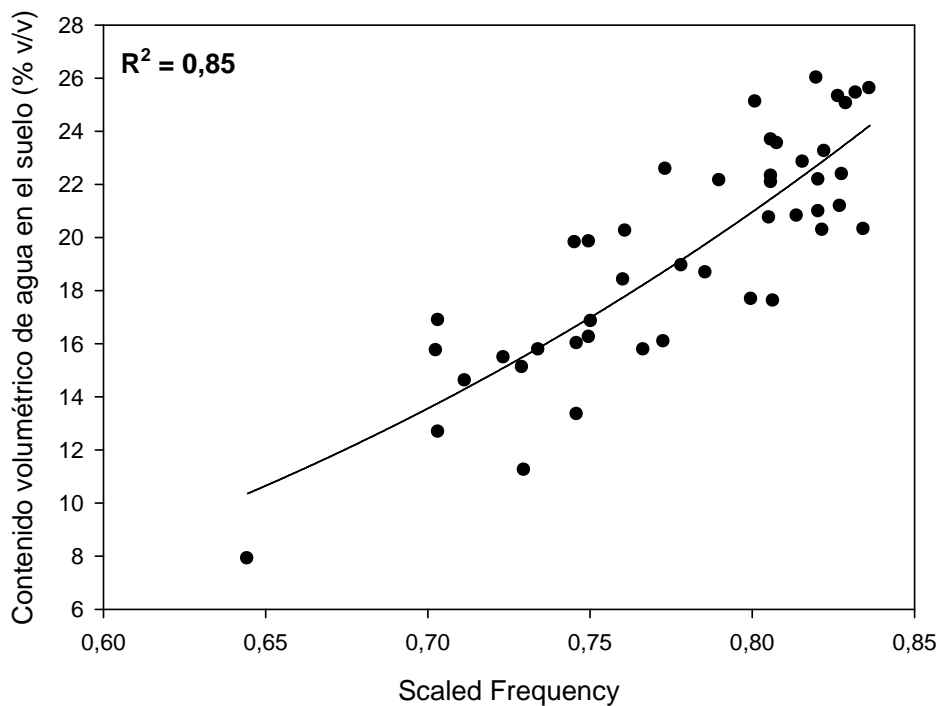


Figura IV.2: Relación entre las medidas de frecuencia a escala (Scaled Frequency) y el contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v), $v = 43,38 \cdot SF^{3,26}$ ($p < 0,001$; $R^2 = 0,85$).

IV.4.1.2 Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en 3 zonas de estudio: en la línea, la rodadura y en el centro de la calle.

Las figuras IV.3, IV.4 y IV.5 muestran las evoluciones de la humedad del suelo para los diferentes regímenes hídricos en las tres posiciones de la calle estudiadas (línea; rodadura = a 0,75 m de la línea; centro de la calle = 1,5 cm de la línea), así como las cantidades de riego aportadas y las precipitaciones, en mm.

En el **desborre** del 2011, como consecuencia de las lluvias de invierno, los valores de humedad fueron altos; y con una demanda hídrica baja por parte de la planta y de la atmósfera, la vid dispuso de suficiente agua para su correcto desarrollo inicial. La humedad del perfil fue alta, entre 20 y 24%, y las necesidades de la planta fueron bajas, las cepas en el desborre no sufrieron limitaciones de agua que comprometieran su crecimiento vegetativo.

Hasta floración la humedad tiende a disminuir, pero en 2011 se produjeron precipitaciones (64 mm) que aumentaron la humedad del suelo en la línea hasta valores próximos a capacidad de campo y superiores a los registrados en desborre. Además el contenido volumétrico de agua en el suelo fue similar en los 4 tratamientos al no haber comenzado el riego.

En **prefloración-floración** se inició el riego en los tratamientos de déficit ligero (T) y déficit moderado a partir de pre-verano (DM_1). En la línea y a 0,75 m de distancia de ésta (rodadura) se empezaron a diferenciar los tratamientos, 2 a 2. Por un lado T y DM_1 , aumentando la humedad del suelo, hasta 23% y por otro lado DM_c (déficit moderado continuo) y DM_2 (déficit moderado hasta pre-verano), disminuyendo el contenido de agua en el suelo, hasta 16%, en ambos años. El centro de la calle, sin embargo, no se vio afectado por el tratamiento ni por el consumo de la planta.

La evolución de la humedad del suelo en los tratamientos de secano entre floración y cierre de racimos (DM_c y DM_2) descendió hasta valores de 16% (v/v) en 2010; hasta que se produjo el inicio del riego, aumentando la humedad del suelo en la línea, hasta alcanzar valores de 23% (ver figuras IV.3).

En 2011 antes de iniciarse el riego de DM_c y DM_2 el contenido volumétrico había descendido hasta 16%, tanto en la línea como en la rodadura, frente a una humedad de 23% en la línea y 22% en la rodadura que presentaron los tratamientos regados desde pre-floración. En el centro de la calle no se observaron estas diferencias (ver figura IV.5).

En 2010 el cambio de riego se realizó en pre-verano, DM_1 pasó de $k_c = 0,6$ a $k_c = 0,3$ y DM_2 pasó de $k_c = 0,3$ a un $k_c = 0,6$. No se observaron diferencias significativas en el contenido volumétrico de agua en el suelo debido al riego aplicado.

En 2011 se realizó el cambio de riego en verano, DM_1 pasó de $k_c = 0,5$ a $k_c = 0,2$ y DM_2 pasó de $k_c = 0$ a $k_c = 0,6$. En la línea la humedad del suelo aumentó notablemente en DM_c y DM_2 igualándose a la de los otros tratamientos (20-22%). Sin embargo a 75 cm de la línea no fue tan inmediata la recarga del perfil del suelo, existiendo diferencias significativas entre los tratamientos.

Entre floración y verano el aumento de la demanda evaporativa, el consumo de agua de la planta y la escasez de lluvias, hacen que las reservas de agua en el suelo disminuyan.

Entre **verano y madurez** la demanda hídrica de la atmósfera y de la planta aumentó a la vez que disminuyó progresivamente el contenido volumétrico de agua en el suelo. En ambos años de estudio la humedad del suelo disminuyó en los tratamientos con menor dosis de riego (DM_c y DM_1). Por otro lado el tratamiento de déficit ligero (T) también disminuyó alcanzando valores próximos a los de déficit moderado continuo (DM_c). Esto puede ser debido al elevado desarrollo vegetativo que alcanzaron las cepas (ver capítulo VI. Resultados tabla VI.3) aumentando la demanda hídrica de la planta; no siendo suficiente la dosis empleada para la recarga del perfil del suelo. Sin embargo, el tratamiento de déficit moderado hasta pre-verano (DM_2) en la línea llega a valores de 23,5% en 2010 y 25% en 2011; es el único que aumenta su contenido volumétrico de agua en el suelo en este periodo.

En el centro de la calle la variación de la humedad del suelo en los 4 tratamientos disminuyó progresivamente en 2010, los tratamientos con déficit ligero y déficit moderado hasta pre-verano (T y DM_2), de verano a vendimia, alcanzaron un contenido volumétrico 2 puntos por encima de los tratamientos más estresados (DM_c y DM_1). Sin embargo, en 2011 en el centro de la calle el contenido volumétrico de agua en el suelo del tratamiento con déficit moderado continuo (DM_c) se igualó en esta etapa al contenido volumétrico de agua en el suelo de los tratamientos de déficit ligero y déficit moderado hasta pre-verano (T y DM_2). Esto se debió a que la planta consiguió adaptarse a las condiciones de estrés hídrico a las que estuvo sometida durante todo el ciclo y fue capaz de regular su consumo en función de la disponibilidad hídrica del suelo.

En 2011 en **vendimia** se observaron diferencias significativas en la línea, siendo el tratamiento de déficit moderado hasta pre-enero (DM_2) el que alcanzó un contenido volumétrico de agua en el suelo mayor (figura IV.6). Estas diferencias se debieron a que en este periodo disminuye la demanda evapotranspirativa y las necesidades de la planta; y a que, el desarrollo foliar de DM_2 (déficit moderado hasta pre-enero) fue menor ya que el crecimiento de las cepas estaba limitado, al contrario que en T (déficit ligero) dónde esa limitación no fue tan grande.

En la rodadura (a 0,75 m de la línea) se observaron diferencias estadísticas dos a dos: por un lado los tratamientos sin estrés (T y DM_2) con humedades mayores, 20% y 22% en el 2010 y 20% en el 2011, y por otro lado los tratamientos con déficit (DM_c y DM_1) con humedades menores, 15% en 2010 y 16% en 2011 (figuras IV.4).

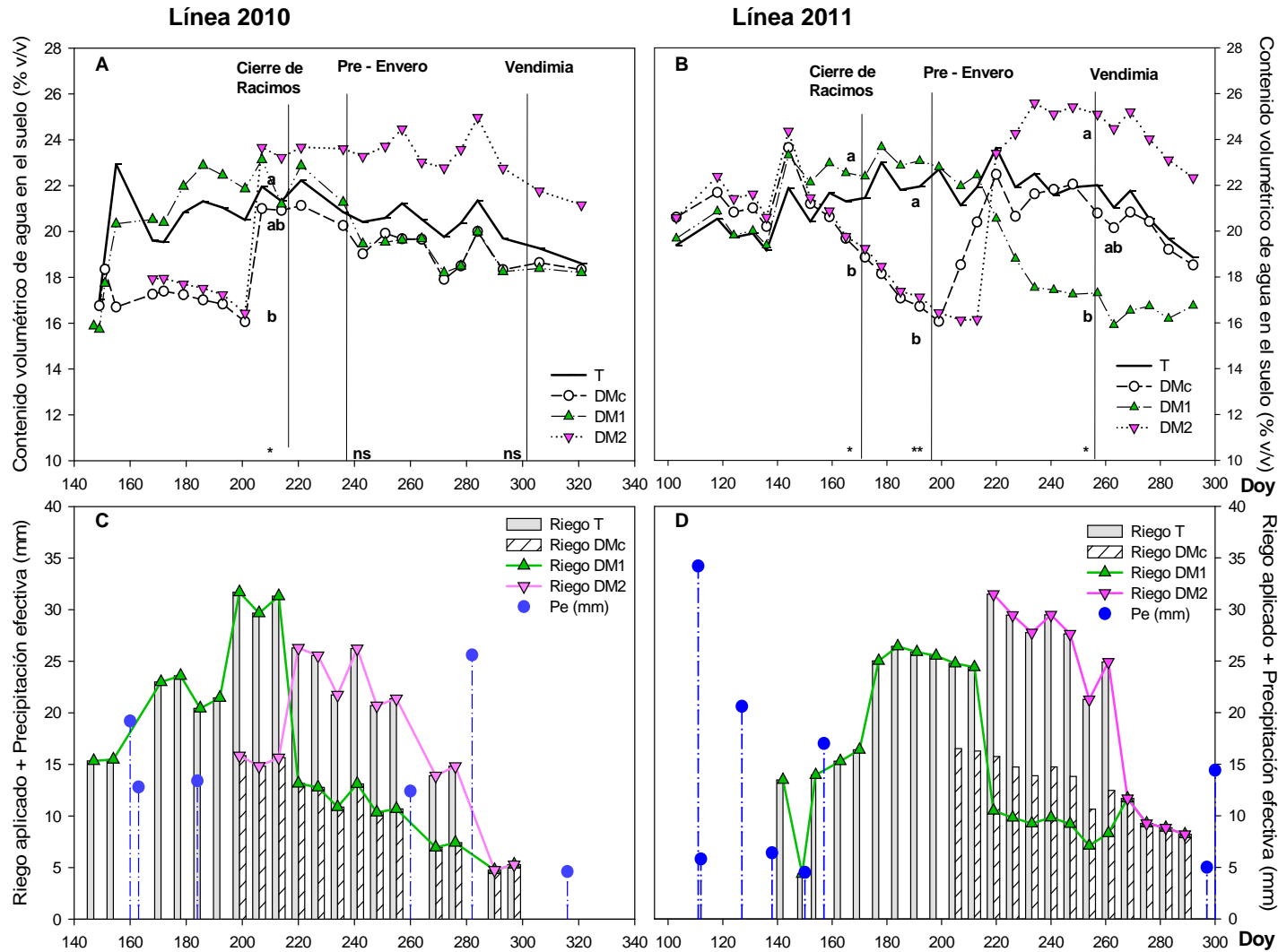


Figura IV.3: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 0,9 m de profundidad en la línea de plantación (**A** y **B**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-enero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-enero (DM₂; triángulos rosas), en 2010 (**A**) y 2011 (**B**), indicando las fechas de cierre de racimos (33¹), pre-enero (34¹) y vendimia (38¹). Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (=0.05). (**C** y **D**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento en 2010 (**C**) y 2011 (**D**).

¹ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995

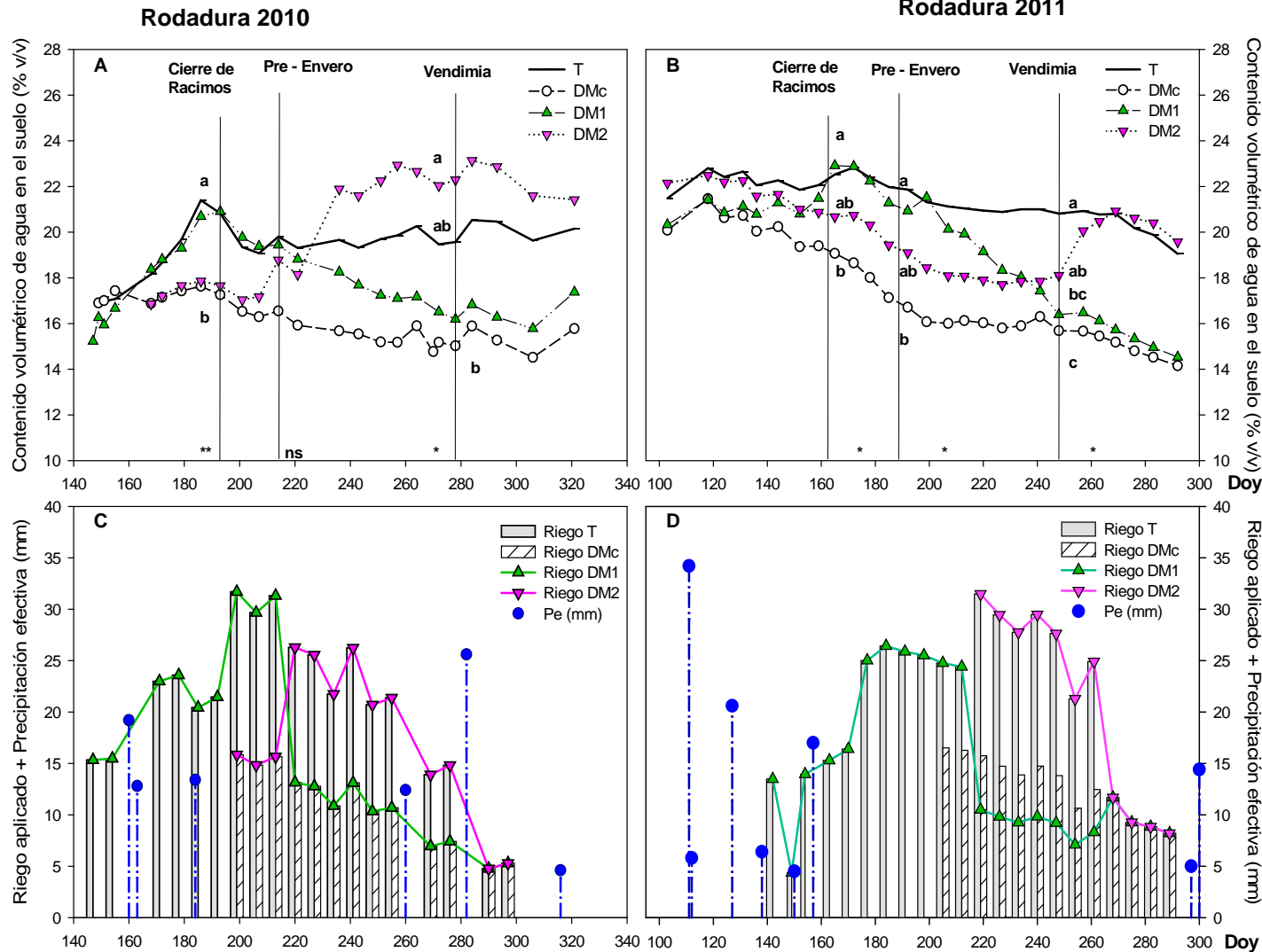


Figura IV.4: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 0,9 m de profundidad en la rodadura (a 0,75 m de la línea de plantación) (**A** y **B**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_C; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-enero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-enero (DM₂; triángulos rosas), en 2010 (**A**) y 2011 (**B**), indicando las fechas de cierre de racimos (33²), pre-enero (34²) y vendimia (38²). Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (=0.05). (**C** y **D**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento en 2010 (**C**) y 2011 (**D**).

² Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

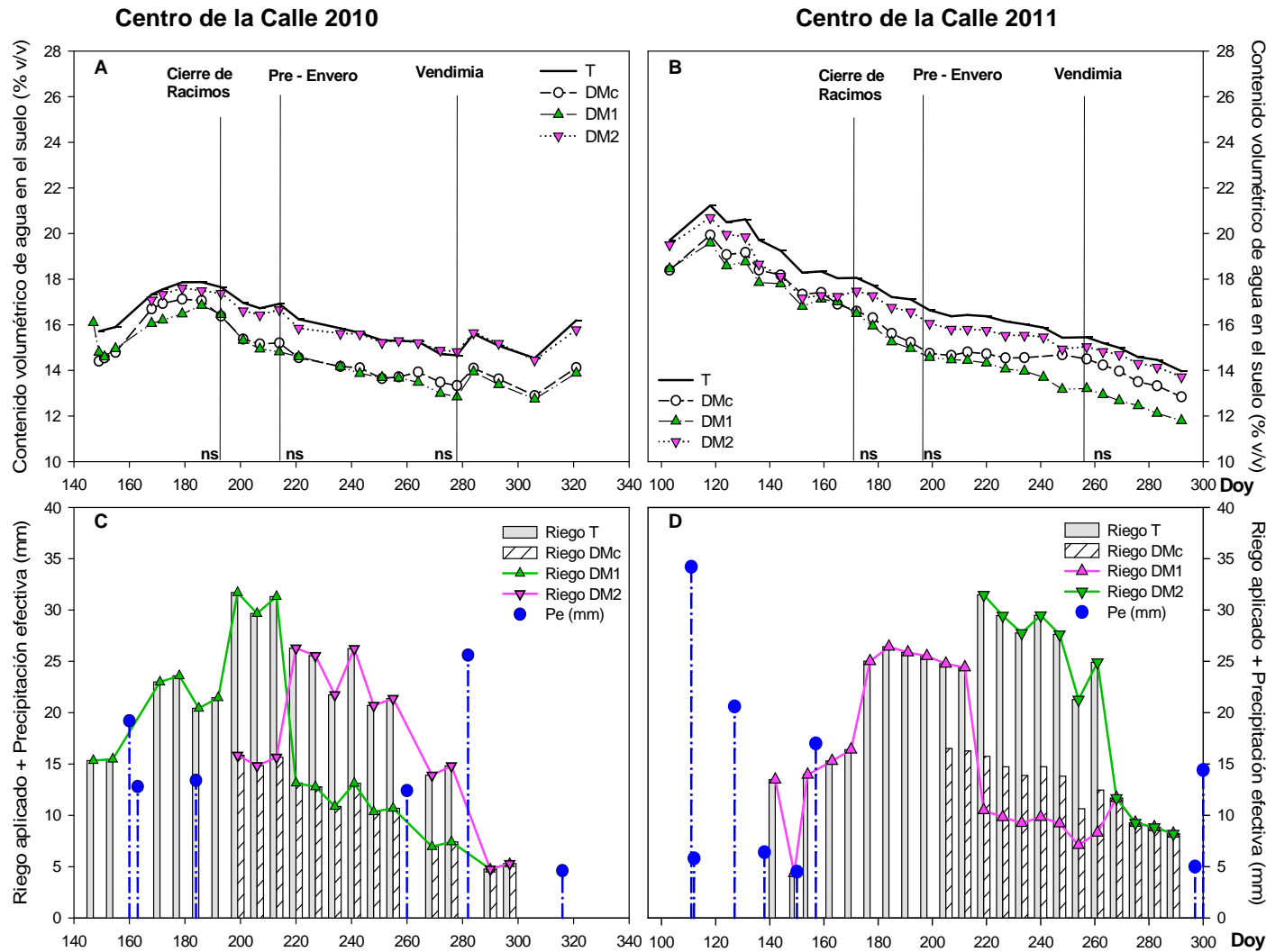


Figura IV.5: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 0,9 m de profundidad en el centro de la calle (a 1,5 m de la línea de plantación) (**A** y **B**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_c; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-enero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-enero (DM₂; triángulos rosas), en 2010 (**A**) y 2011 (**B**), indicando las fechas de cierre de racimos (33³), pre-enero (34³) y vendimia (38³) en 2010 y 2011. Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (α=0.05). (**C** y **D**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento en 2010 (**C**) y 2011 (**D**).

³ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995

IV.4.1.3 Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en la zona de raíces.

La disponibilidad de agua en el suelo depende de las propiedades físico-químicas del suelo y de la frecuencia y la lámina de riego. A su vez, la velocidad de absorción de las raíces es función de la demanda hídrica de la planta (Kramer y Boyer, 1995). Y la demanda hídrica de la planta depende principalmente de la tasa de transpiración (E), que varía en función de las condiciones atmosféricas y del tamaño y tipo de planta. La densidad de raíces por volumen de suelo, la eficiencia de las raíces como superficie absorbente y la conductividad hidráulica del suelo (que varía con el tipo de suelo y su contenido en agua) determinan el suministro de agua a la planta. Para satisfacer la demanda hídrica de la planta en un clima semiárido es necesario conseguir un adecuado contenido hídrico del suelo en la zona de raíces.

Entre 20 y 50 cm de profundidad y en la línea de plantación se concentra la masa radicular. Se estudió la humedad del suelo a esas profundidades, observando la influencia de los parámetros extrínsecos, entre los que se encuentran la demanda atmosférica, la demanda hídrica de la planta, el agua de lluvia y el riego aplicado (figuras IV.9 y IV.10).

A estas profundidades el contenido volumétrico de agua en el suelo reacciona de forma inmediata al aporte y a la demanda de agua. A pesar de esto se observó a lo largo del ciclo una tendencia descendente de la humedad del suelo.

En **2010** los primeros datos recogidos por la sonda de capacitancia del suelo corresponden con el inicio del riego (hacia floración). La humedad en la zona de raíces aumentó en T y DM₁ (22% v/v), es decir, que el agua aplicada consiguió humedecer la zona de mayor presencia radicular. Al iniciarse el riego se establecieron diferencias entre los tratamientos, presentando T y DM₁ valores de humedad superiores y siguiendo una tendencia ascendente hasta el cierre de racimos. Los tratamientos de déficit moderado continuo y déficit moderado hasta pre-verano (DM_c y DM₂) aumentaron su contenido de agua en el suelo en la zona de raíces debido a las lluvias (45,4 mm) 17% v/v, pero al aumentar la demanda de la planta y de la atmósfera y al no recibir riego, disminuyó la humedad del suelo, alcanzando valores de 13 – 14% v/v hasta el cierre de racimos. Tras el inicio del riego en DM_c y DM₂, estos alcanzaron humedades próximas a las de los tratamientos T y DM₁, próximas a capacidad de campo. Al transcurrir el ciclo y aumentar la demanda hídrica de la planta y de la atmósfera, el agua de riego no llega a ser suficiente para evitar el agotamiento hídrico en la zona de raíces, disminuyendo el contenido volumétrico de agua en el suelo de

forma diferente entre tratamientos, siendo más lento a medida que se aporta mayor dosis de riego.

En **2011** se registraron lluvias antes de iniciarse el riego, en los meses de Abril y Mayo (67 mm), obteniéndose una tendencia ascendente de la humedad del suelo en todos los tratamientos (22 - 24% v/v). Al iniciarse el riego en T y DM₁ aparecen diferencias significativas entre tratamientos; por un lado en T y DM₁ aumentó la humedad en la zona de raíces hasta el cierre de racimos, y por otro lado, en DM_c y DM₂ disminuyó el contenido volumétrico de agua en el suelo debido al consumo de la planta y al aumento de la demanda atmosférica, llegando a valores de 14% frenándose la velocidad de disminución de la humedad del suelo. En el cambio de riego, DM₁ pasó de $k_c = 0,5$ a $k_c = 0,2$ y DM₂ pasó de $k_c = 0$ a $k_c = 0,6$; DM₁ disminuyó drásticamente hasta vendimia y DM₂ aumentó la humedad en la zona de raíces, manteniendo una tendencia ascendente hasta vendimia, alcanzando el contenido volumétrico de la capacidad de campo. Por otro lado el contenido de humedad de agua en el suelo del tratamiento de déficit ligero (T) y el tratamiento de déficit moderado continuo (DM_c) se equipararon. La demanda hídrica de la cepa fue diferente (distinto nivel de desarrollo vegetativo), pero la humedad en la zona de raíces fue similar en los tratamientos T y DM_c, esto nos indica que T necesitó un mayor volumen de agua disponible en el suelo para cubrir sus necesidades hídricas en la fase de maduración de la baya; mientras que DM_c con un volumen menor de agua de riego consiguió adaptarse a las condiciones de déficit hídrico moderado continuo al que fue sometido, moderando su consumo. Al disminuir la demanda evapotranspirativa, la tensión descendió lentamente hasta coincidir con las primeras lluvias del otoño.

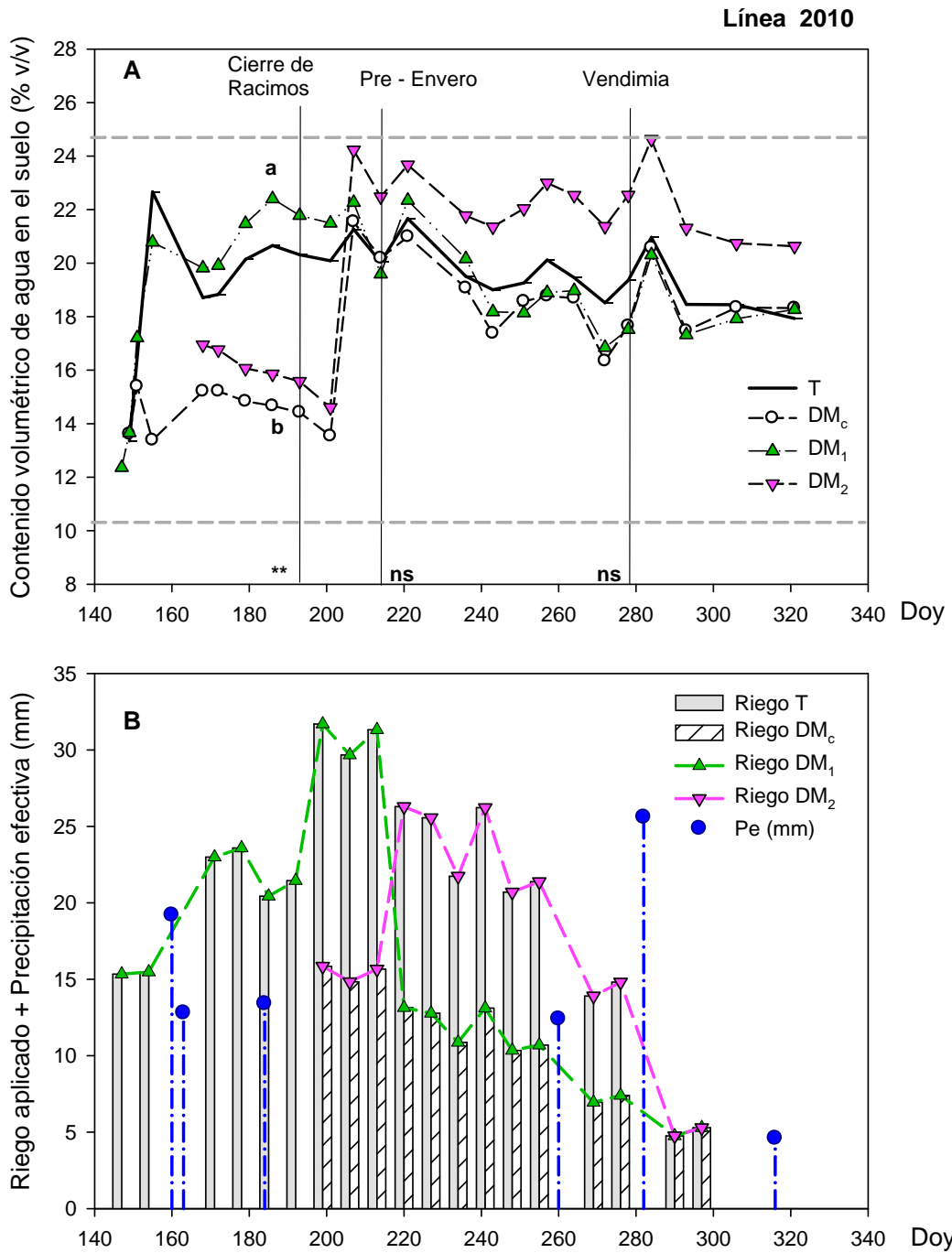


Figura IV.6: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en la zona de raíces (20-50 cm), en la línea de plantación en 2010 (**A**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_c; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-enero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-enero (DM₂; triángulos rosas), indicando el nivel de capacidad de campo y punto de marchitez (líneas horizontales discontinuas grises) indicando las fechas de cierre de racimos (33⁴), pre-enero (34⁴) y vendimia (38⁴). Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (=0.05). (**B**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento.

⁴ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995

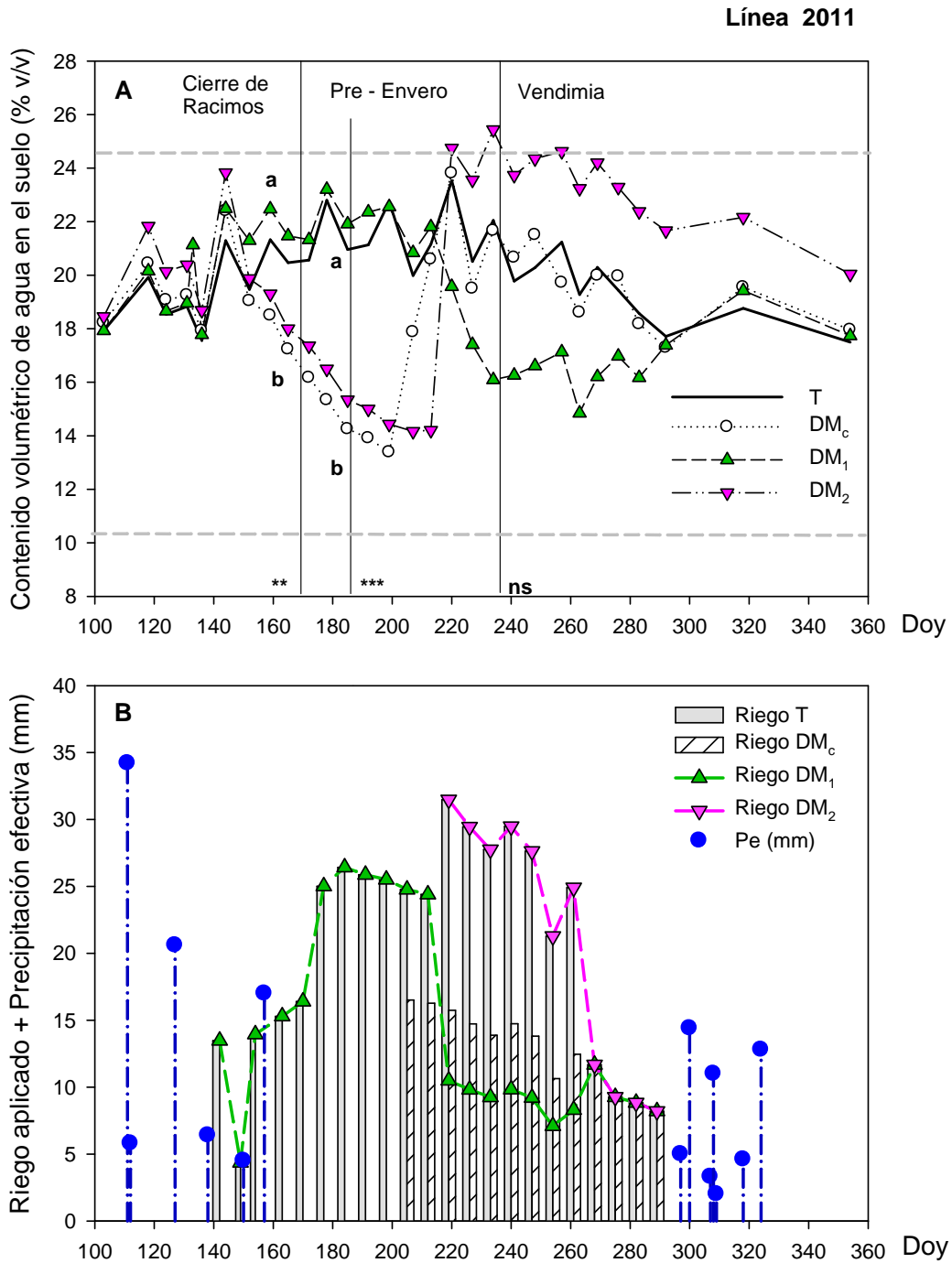


Figura IV.7: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en la zona de raíces (20-50 cm), en la línea de plantación en 2011 (**A**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_c; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-envero (DM₂; triángulos rosas), indicando el nivel de capacidad de campo y punto de marchitez (líneas horizontales discontinuas grises), las fechas de cierre de racimos (33⁵) pre-envero (34⁵) y vendimia (38⁵). Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (α=0.05). (**B**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento.

⁵ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

IV.4.1.4 Evolución del contenido volumétrico de agua en el viñedo.

En las figuras IV.11 y IV.12 se representa la evolución del contenido volumétrico de agua en toda la calle para los años 2010 y 2011 respectivamente, expresado como porcentaje de volumen de agua respecto al volumen de suelo, v (%v/v) en el perfil del suelo (0,9 m de profundidad).

En 2010 y 2011, durante el período de estudio, se observaron diferencias entre las distintas disponibilidades hídricas, en el contenido de agua en el suelo del viñedo.

En el tratamiento de déficit ligero (T) en 2010 (figuras IV.11), se observó que cuando la demanda hídrica de la planta fue máxima, el riego aplicado no compensó las pérdidas, manteniendo humedades del suelo bajas durante el periodo de maduración de la baya. Sin embargo en el 2011, se pudieron paliar esas necesidades aumentando el agua de riego a partir de enero (en el momento donde la planta tiene mayor demanda).

El tratamiento sometido a déficit moderado continuo (DM_c) es el que menos agua recibió (141,7 mm en 2010 y 166,8 mm en 2011) y el que más tiempo mantuvo niveles bajos de humedades. Con el riego que se le aplicó se consiguió no agotar totalmente los recursos hídricos de la planta, sin llegar a alcanzar el punto de marchitez. Y la planta fue capaz de autoregular su consumo.

El tratamiento de déficit moderado a partir de pre-enero (DM_1) consumió más cantidad de agua de la que recibió, debido principalmente a un excesivo desarrollo foliar y disminuyó la humedad del suelo hasta valores de 16% v/v en vendimia en ambos años de estudio.

Mientras que el tratamiento de déficit moderado hasta pre-enero (DM_2) no consumió todo el agua que recibió, porque la demanda hídrica de la cepa fue menor, debido a un menor desarrollo foliar (ver capítulo VI. Resultados tabla VI.3), esto hizo que aumentara el contenido hídrico en el suelo durante la fase de maduración hasta vendimia, alcanzando valores de 21 y 22% v/v en 2010 y 2011 respectivamente.

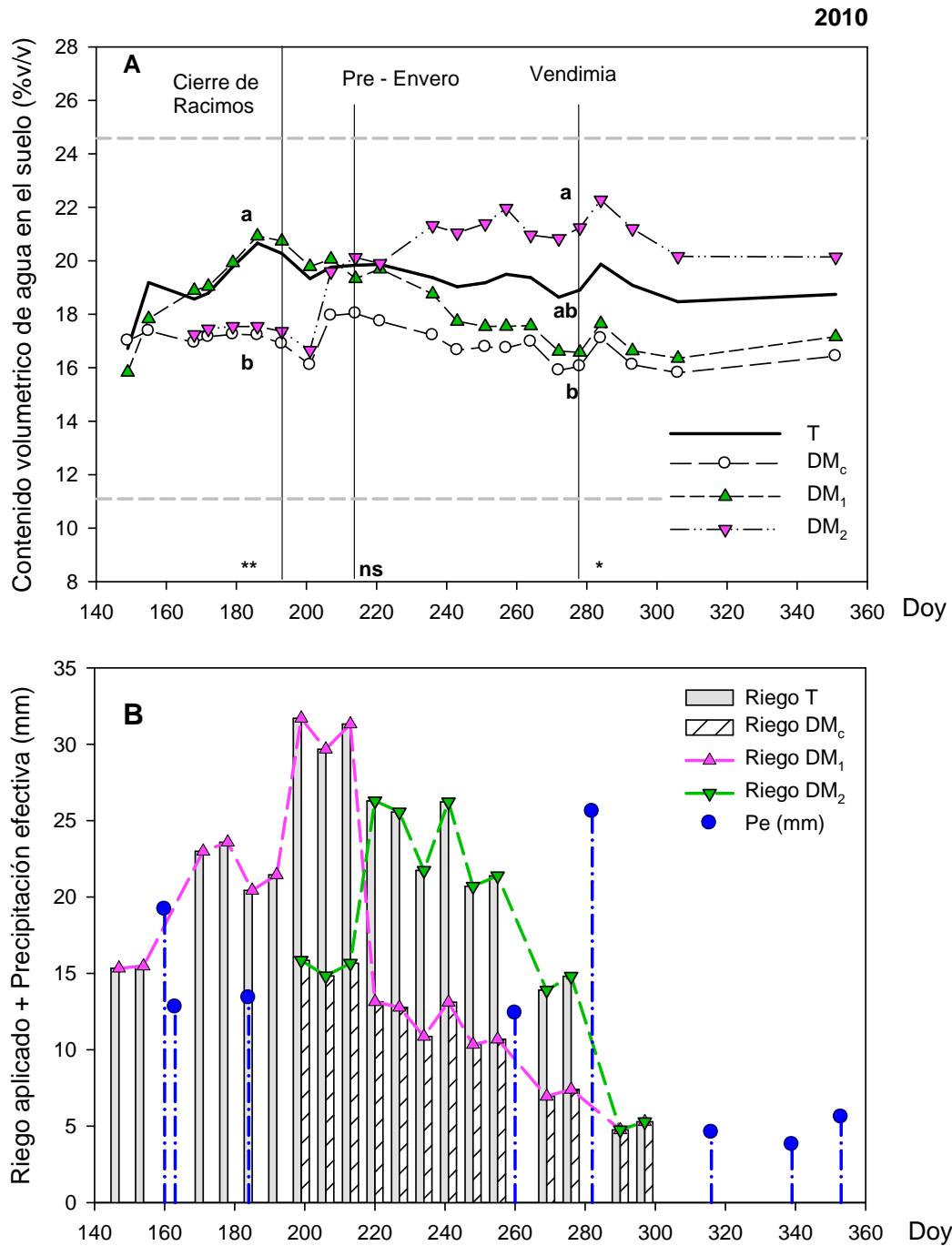


Figura IV.8: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 0,9 m de profundidad, en la calle en 2010 (**A**) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_c; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-enero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-enero (DM₂; triángulos rosas), indicando el nivel de capacidad de campo y punto de marchitez (líneas horizontales discontinuas grises), las fechas de cierre de racimos (CR; 33⁶), pre-enero (PE; 34⁶) y vendimia (V; 38⁶). Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (=0.05). (**B**) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento.

⁶ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

2011

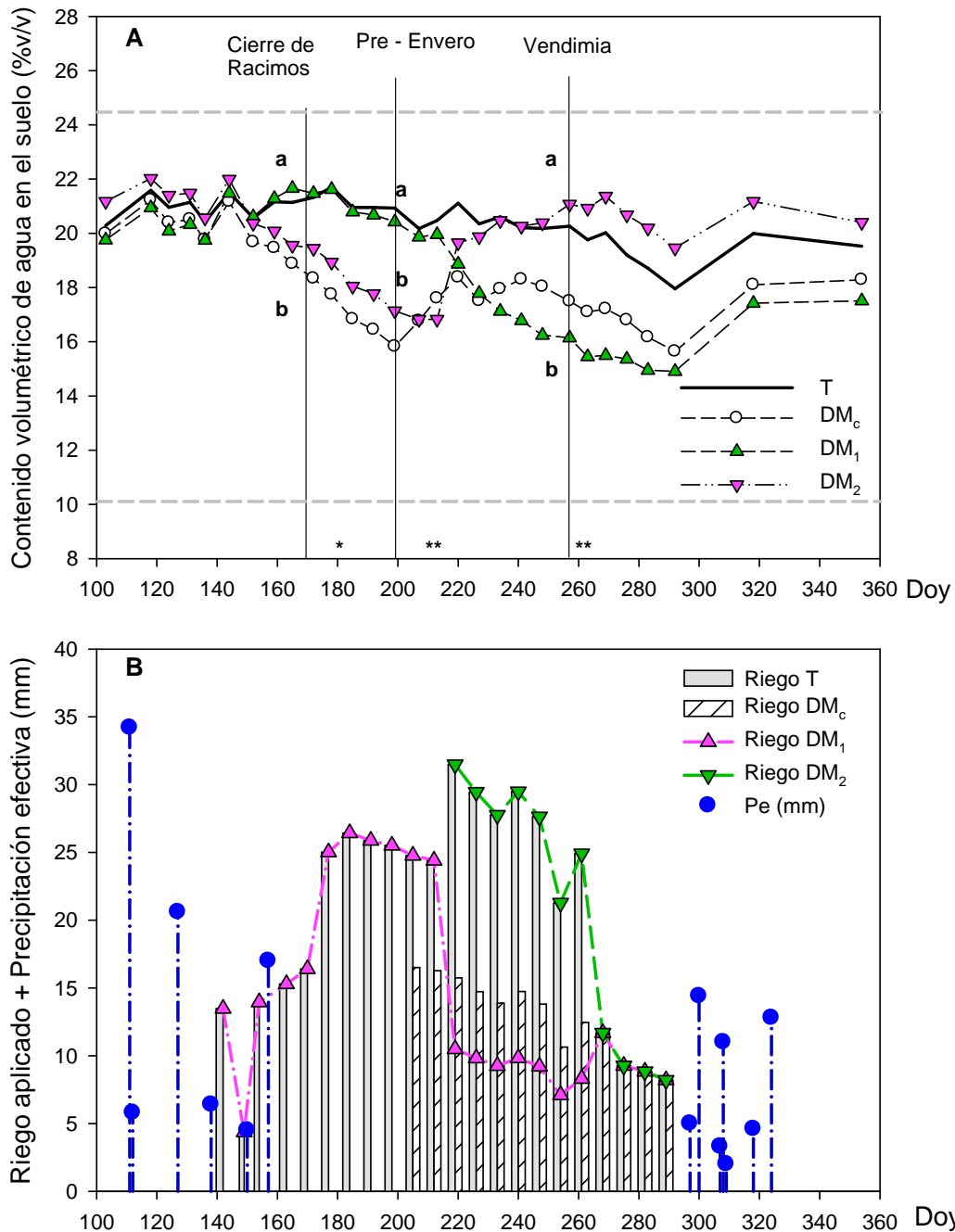


Figura IV.9: Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v) en el perfil de 90 cm de profundidad, en la calle en 2011 (A) para los 4 tratamientos: déficit ligero (T; línea negra continua), déficit moderado continuo (DM_c; círculos blancos), déficit moderado a partir de pre-enero (DM₁; triángulos verdes), déficit moderado hasta pre-enero (DM₂; triángulos rosas), indicando el nivel de capacidad de campo y punto de marchitez (líneas horizontales discontinuas grises), indicando las fechas de pre-enero (PE; 34⁷), mitad de maduración (MM; 36⁷) y vendimia (V; 38⁷). Las distintas letras representan diferencias significativas entre los tratamientos para cada momento fenológico señalado en el gráfico, con un nivel de significación ns: no significativo, *:p<0.05, **:p<0.01 y separación de medias (=0.05). (B) Representación de la precipitación eficaz (Pe, mm; círculos azules) y del riego aplicado (mm; barras verticales) en cada tratamiento.

⁷ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

IV.4.2 CONSUMO:

En las tablas IV.1 y IV.2 se muestran los consumos de agua por etapas de los cuatro tratamientos en 2010 y 2011.

Entre desborre y floración en 2011 el consumo medio diario de agua no presentó diferencias significativas entre tratamientos, obteniéndose valores bajos oscilando entre 1,34 mm/día - 1,59 mm/día (tabla IV.1). Estos bajos consumos se debieron principalmente a demandas atmosféricas moderadas y desarrollos foliares aún reducidos. En condiciones semiáridas el régimen de precipitaciones y la evapotranspiración determinan que el contenido de humedad del suelo sea elevado en esta primera etapa del ciclo de la vid. Aunque las plantas consuman más agua de la que hayan recibido (riego mas precipitación), extraen el agua de la reserva útil del suelo, no siendo limitante el contenido volumétrico de agua en el suelo para el consumo en esta primera etapa. Por esto mismo hace que disminuya la humedad del suelo (Figura IV.12).

Entre floración y cierre de racimos aumentó la demanda atmosférica y las necesidades hídricas de la planta y con ello el consumo diario: 1,28 – 3,13 mm/día en 2010 y 0,98 – 3,11 mm/día en 2011 (tablas IV.1 y IV.2). Siendo mayor en los tratamientos regados (T y DM₁) y observándose diferencias significativas entre las distintas dosis de agua. Aunque aumentó el consumo en 2010 los tratamientos regados consumieron un volumen de agua menor al volumen de agua que se les aportó; como es el caso de T dónde se aplicó 119 mm de riego más 61 mm de precipitación y consumió 163 mm en esta etapa, o DM₁ que consumió 152 mm, 28 mm menos del volumen de agua total que recibió. Los tratamientos de secano (DM_c y DM₂) consumieron 6 mm más de lo que recibieron (61 mm de precipitación). Sin embargo, en el año 2011, DM_c consume 35 mm más de lo que recibe (17 mm de precipitación) en esta etapa y DM₂ consume 29 mm.

En el periodo comprendido entre cierre de racimos y pre-verano la evapotranspiración media diaria fue la más elevada de la campaña en los dos años de estudio (6,23 mm/día en 2010 y 7,25 mm/día en 2011). Además, esta etapa coincide con los mayores consumos de T y DM₁, que son los tratamientos que se riegan desde floración (tablas IV.1 y IV.2). En esta etapa es donde se inicia el riego en los tratamientos DM_c y DM₂, pero no queda reflejado en el consumo diario, todo lo contrario, en el caso del déficit moderado hasta pre-verano (DM₂) disminuye hasta un valor de 0,86 mm/día en 2010. Y en el 2011 los consumos diarios de DM_c y DM₂ llegan a valores próximos a 0, esto hace que la planta obtenga el agua de la reserva del

suelo disminuyendo en un 16% el contenido volumétrico de agua en el suelo (figura IV.12)

Durante el periodo de maduración se escalonaron los consumos según los coeficientes de cultivo correspondientes.

En el tratamiento de estrés ligero (T), después del envero en la etapa de maduración hasta vendimia, el volumen de agua aplicado fue el doble que en la etapa anterior en 2010, pero sin embargo el consumo diario disminuyó un 37%, esto fue debido al descenso en la demanda atmosférica en la fase de maduración (4,31 mm/día). Ocurrió lo mismo en 2011, donde el volumen de agua aplicado aumenta (237 mm) pero, sin embargo, el consumo diario disminuye hasta 3,62 mm/día. En este año la demanda atmosférica disminuye en el periodo de maduración de la baya un 39%.

En DM₂ déficit moderado hasta pre-envero, ocurre lo contrario, el consumo diario aumenta en maduración en comparación con la etapa anterior, debido al aumento del riego (158 mm en 2010 y 213 mm en 2011), consumiendo todo el volumen de agua aportado (riego mas precipitación) en 2010 y en 2011 consume 183 mm, de los 213 mm aplicados.

Las diferencias existentes en la superficie foliar total entre tratamientos acentuaron las diferencias estadísticas del consumo (ver capítulo VI. Resultados tabla VI.3). Apareciendo diferencias significativas en el consumo total y en el consumo medio diario tanto en 2010 como 2011. El consumo es mayor en T (3,2 y 3,6 mm/día en 2010 y 2011) que en DM₂ (2,9 y 2,6 mm/día) aunque reciben el mismo volumen de agua (158mm en 2010 y; 237 mm T y 213mm DM₂ en 2011), ocurre lo mismo con DM₁ y DM_c siendo el consumo en DM₁ un 12% en 2010 y un 6% en 2011 mayor que DM_c.

Los periodos de mayor consumo de agua fueron de cierre de racimos a envero en los tratamientos de déficit ligero (T) y déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁); y de envero a vendimia en los tratamientos de déficit moderado continuo (DM_c) y déficit moderado hasta pre-envero (DM₂).

El aumento de la demanda atmosférica y de la dosis de riego a lo largo del ciclo vegetativo aumentó el consumo de agua de la cepa.

Tabla IV.1: Precipitación efectiva (Pe; mm), cantidades de agua aportada por el riego (R; mm), consumos de agua expresados en mm y mm/día, la evapotranspiración de referencia (ET₀) expresada en mm y mm/día y el coeficiente teórico del cultivo (kth) entre los estados fenológicos de prefloración (PFI), cierre de racimos (CR), pre-verano (PE), vendimia (V) y final de riego (FR), durante el año 2010.

2010		PFI - CR	CR - PE	PE - V	V - FR				
Pe (mm)		61,10	0,00	19,20	25,60				
R (mm)		238,54	278,04	472,16	81,64				
R (mm)	T	119,27	92,68	158,19	24,86				
	DM _c	0	46,34	77,89	17,46				
	DM ₁	119,27	92,68	77,89	14,46				
	DM ₂	0	46,34	158,19	24,86				
Consumo (mm)	T	162,83	a	87,89	a	182,77	a	52,13	a
	DM _c	66,98	b	31,63	b	112,27	d	42,54	b
	DM ₁	151,68	a	93,50	a	125,16	c	42,53	b
	DM ₂	66,39	b	17,11	c	165,36	b	50,78	a
Sig.		***		***		***		**	
Consumo (mm/día)	T	3,13	a	4,39	a	3,21	a	2,00	a
	DM _c	1,29	b	1,58	b	1,97	d	1,64	b
	DM ₁	2,92	ab	4,67	a	2,20	c	1,64	b
	DM ₂	1,28	b	0,86	c	2,90	b	1,95	a
Sig.		**		***		***		**	
ET ₀ (mm)		248,91		124,64		245,77		55,53	
ET ₀ (mm/día)		4,67		6,23		4,31		2,13	
Kth	T	0,4		0,6		0,6		0,4	
	DM _c	0,0		0,3		0,3		0,3	
	DM ₁	0,4		0,6		0,3		0,3	
	DM ₂	0,0		0,3		0,6		0,4	

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0.05, 0.01, 0.001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (α=0.05).

Tabla IV.2: Precipitación efectiva (Pe; mm), cantidades de agua aportada por el riego (R; mm), consumos de agua expresado en mm y mm/día, la evapotranspiración de referencia (ET₀) expresada en mm y mm/día y el coeficiente teórico del cultivo (kth) entre los estados fenológicos de inicio de floración (FI), cierre de racimos (CR), pre-verano (PE) y vendimia (V), durante el año 2011.

2011		28 Ab - F	F - CR		CR - PE		PE - V		V - 14 Nv	
Pe (mm)		31,50	17,00		0,00		0,00		40,30	
R (mm)		26,94	254,62		117,05		692,83		68,12	
R (mm)	T	13,47	127,31		50,27		237,34		17,03	
	DM _c	0	0		16,51		133,21		17,03	
	DM ₁	13,47	127,31		50,27		109,34		17,03	
	DM ₂	0	0		0,00		212,94		17,03	
Consumo (mm)	T	54,13	141,01	a	54,40	a	253,17	a	45,83	a
	DM _c	45,40	51,69	b	0,55	b	146,11	d	39,95	ab
	DM ₁	47,97	146,00	a	54,46	a	154,46	c	35,07	b
	DM ₂	46,37	46,08	b	2,78	b	182,68	b	48,46	a
Sig.		ns	***		***		***		*	
Consumo (mm/día)	T	1,59	3,00	a	3,89	a	3,62	a	1,31	a
	DM _c	1,34	1,10	b	0,04	b	2,09	d	1,14	ab
	DM ₁	1,41	3,11	a	3,89	a	2,21	c	1,00	b
	DM ₂	1,36	0,98	b	0,20	b	2,61	b	1,38	a
Sig.		ns	***		***		***		*	
ET ₀ (mm)		187,80	321,12		101,46		365,18		77,71	
ET ₀ (mm/día)		5,52	6,83		7,25		5,22		2,22	
Kth	T	0,3	0,5		0,5		0,6		0,3	
	DM _c	0,0	0,0		0,3		0,3		0,3	
	DM ₁	0,3	0,5		0,5		0,2		0,3	
	DM ₂	0,0	0,0		0,0		0,6		0,3	

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0.05, 0.01, 0.001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (α=0.05).

En la tabla IV.3 se muestran las variaciones en los consumos medios diferenciando dos intervalos, antes del cambio de riego (desde floración hasta pre-verano) que se ha llamado etapa I: y después del cambio de riego (desde pre-verano hasta final del riego) que se ha llamado etapa II. Y en la tabla IV.4 se presenta un resumen de las condiciones meteorológicas y el volumen de agua aplicado en cada tratamiento en las dos etapas en 2010 y 2011.

Tabla IV.3: Consumos medios de agua expresados en mm, mm/día y mm por cada 10 grados-día acumulados durante las etapas anterior (desde floración a pre-enero: **Etapa I**) y posterior (desde pre-enero a fin del riego: **Etapa II**) al cambio de riego en 2010 y 2011.

	Consumo agua (mm)	Consumo (mm/día)	Consumo (mm/10 GDD)
2010 Etapa I			
T	162,83 a	3,13 a	3,04 a
DM_c	66,98 b	1,29 b	1,25 b
DM₁	151,68 a	2,92 a	2,83 a
DM₂	66,39 b	1,28 b	1,24 b
Sig. Trat	***	**	**
2011 Etapa I			
T	195,14 a	2,41 a	3,15 a
DM_c	97,09 b	1,20 b	1,82 b
DM₁	193,97 a	2,39 a	2,55 a
DM₂	92,45 b	1,14 b	2,28 b
Sig. Trat	***	***	***
MEDIA 2010 - 2011.			
T	178,98 a	3,41 a	2,70 a
DM_c	82,03 b	1,49 c	1,20 b
DM₁	172,83 a	2,70 b	2,56 a
DM₂	79,42 b	1,58 c	1,17 b
Sig. Trat	***	***	**
Sig. Año	***	***	***
Trat * Año	ns	ns	ns
2010 Etapa II			
T	322,79 a	3,13 a	2,25 a
DM_c	186,44 d	1,81 d	1,12 d
DM₁	261,19 b	2,54 b	2,24 b
DM₂	233,24 c	2,26 c	1,07 c
Sig. Trat	***	***	***
2011 Etapa II			
T	353,40 a	2,97 a	3,09 a
DM_c	186,61 c	1,57 c	1,63 c
DM₁	243,99 b	2,05 b	2,14 b
DM₂	233,93 b	1,97 b	2,05 b
Sig. Trat	***	***	***
MEDIA 2010 - 2011.			
T	338,10 a	3,05 a	3,12 a
DM_c	186,52 d	1,69 d	1,73 d
DM₁	252,59 b	2,29 b	2,35 b
DM₂	233,59 c	2,11 c	2,17 c
Sig. Trat	***	***	***
Sig. Año	ns	***	***
Trat * Año	***	**	***

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0.05, 0.01, 0.001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (=0.05).

Tabla IV.4: Precipitación efectiva (Pe; mm), evapotranspiración de referencia (ET₀; mm/día), acumulación de temperaturas eficaces (GDD₁₀; grados-día), volumen de agua de riego en cada tratamiento (mm) durante las etapas anterior (desde floración a pre-verano) y posterior (desde pre-verano a fin del riego) al cambio de riego en 2010 y 2011.

		Etapa I		Etapa II	
		2010	2011	2010	2011
Pe (mm)		61,1	48,5	44,8	40,3
ET ₀ (mm/día)		6,23	6,28	4,14	4,57
GDD ₁₀		535,16	865,80	1023,61	1142,40
Volumen de agua de riego (mm)	T	119,27	140,78	275,73	304,65
	DM_c	0	0	141,69	166,75
	DM₁	119,27	140,78	188,03	176,65
	DM₂	0	0	229,39	229,97

Durante el primer período antes del cambio de riego se observaron diferencias en el consumo de agua expresado por día y temperatura, con un consumo creciente a medida que aumenta el volumen de agua aplicado.

Durante el período de crecimiento de la baya (Etapa I), el consumo de agua expresado en mm por cada 10 GDD fue mayor cuanto mayor fue el agua aplicada. Sin embargo en el periodo de maduración de la baya (Etapa II), después del cambio de riego, el escalonamiento del consumo no se corresponde con el del agua aplicada en ninguno de los dos años de estudio. Esto puede ser debido al mayor desarrollo vegetativo alcanzado durante la primera etapa (de floración a pre-verano) en los tratamientos regados antes de pre-verano (T y DM₁). Originando un consumo medio diario mayor en la etapa de maduración aunque el volumen de riego fuese menor. Así ocurrió con DM₁ que alcanzó un consumo diario mayor que DM₂ en la etapa II (2,54 mm/día en 2010 y 2,05 mm/día en 2011), aunque recibió menos agua; 41 mm menos en 2010 y 53 mm menos en 2011.

Después de verano el consumo medio diario de DM₁ fue inferior que en la etapa previa (de floración a pre-verano), debido a la disminución de la evapotranspiración 34% en 2010 y 27% en 2011. En el tratamiento de déficit ligero (T), el consumo medio diario se mantuvo en las 2 etapas, disminuyendo ligeramente en 2011. Y los tratamientos de déficit moderado continuo (DM_c) y déficit moderado hasta pre-verano (DM₂) aumentaron el consumo diario en la etapa II (desde pre-verano hasta final del riego), en función del volumen de agua aplicado, a mayor agua mayor consumo. El consumo de agua diario aumentó 12 % en DM_c y 25 % en DM₂ al incrementarse el agua de riego 154 mm y 230 mm respectivamente.

IV.5 DISCUSIÓN:

Contenido volumétrico de agua en el suelo.

En zonas semiáridas con veranos cálidos y secos y con precipitación estacional, la aplicación de la lámina de riego se emplea, principalmente, para evitar el estrés hídrico severo de la planta en la fase vegetativa y reproductiva. Es fundamental un correcto manejo del riego y para ello se necesita conocer el estado hídrico del suelo y el nivel de hidratación de la planta.

Para conocer el estado hídrico del suelo es necesario monitorizar el agua de éste mediante métodos directos o indirectos que determinen el contenido volumétrico de agua en el suelo (sensor de capacitancia con la tecnología de FDR). Que establezcan la disminución de la humedad durante el ciclo, evitando llegar a valores críticos de déficit hídrico, y que indiquen la correcta aplicación del riego. La elevada variabilidad espacial de la humedad del suelo debido a sus características heterogéneas dificulta conocer con exactitud el contenido de agua. Además, los riegos localizados aumentan la variabilidad espacial del contenido de agua en el suelo, dado que originan zonas húmedas y zonas secas.

Davenport *et al.* (2008) sugieren que para monitorizar la humedad del suelo en cepas con riego por goteo cultivadas bajo déficit hídrico, se precise de 0-45 cm como la profundidad de muestreo, con radios de 20 a 40 cm en la diagonal o perpendicular del goteo emisor para reflejar la cantidad de agua disponible para la planta. El sensor de capacitancia permitió medir el porcentaje de agua en el suelo cada 10 cm de profundidad. Las medidas tomadas en las capas superficiales del suelo indicaron cuándo se debe regar; y las medidas tomadas en las capas más profundas indicaron la capacidad de penetración en profundidad del riego aplicado (Luke, 1990). Uno de los inconvenientes que presenta el sensor de capacitancia para la medida de la humedad del suelo es que el volumen de suelo muestreado es reducido (Fares and Polyakov 2006, Intrigliolo *et al.* 2007, IAEA 2008), por este motivo se instalaron tres tubos de acceso en cada tratamiento por repetición a distintas distancias de la línea de plantación. Otro inconveniente es la necesidad de realizar una calibración para conocer el contenido real de agua en el suelo. En la calibración realizada se obtuvieron relaciones entre la frecuencia escalada y el contenido volumétrico de agua en el suelo. Que se ajustaron a ecuaciones potenciales, frecuentemente utilizadas por otros autores (Fares and Polyakov 2006). Diversos trabajos han puesto de manifiesto que el tipo de suelo afecta a la constante dieléctrica del mismo y por tanto a las medidas del contenido de agua en el suelo basadas en ésta. La constante dieléctrica

depende no sólo de la proporción suelo-agua-aire, sino también de la proporción de agua ligada que es función de la textura, de la composición mineral y de la temperatura del suelo; y de la densidad aparente y salinidad del agua (Fares and Polyakov 2006).

Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo.

Estudios previos realizados sobre la evolución de la humedad del suelo muestran que el estrés hídrico disminuye el contenido hidráulico de la planta (Lovisolo and Schubert 1998) en proporción al incremento del déficit hídrico del suelo (Schultz, 2003). Centeno (2005) observó en *cv.* Tempranillo que la evolución del contenido de agua en el suelo disminuye a lo largo del ciclo, atenuándose esta disminución a medida que la disponibilidad hídrica es mayor.

Se observó en la evolución de la humedad del suelo a lo largo del ciclo que en desborre la humedad del perfil fue alta y las necesidades de la planta bajas. Debido a esto las cepas no sufrieron limitaciones de agua que comprometieran su crecimiento vegetativo.

Entre floración y envero el aumento de la demanda evaporativa, el consumo de la planta y la escasez de lluvias disminuyó las reservas de agua en el suelo, acentuándose con el déficit hídrico. Esto hizo que los tratamientos sometidos a estrés (DM_c y DM_2) obtuvieran menor área foliar. Dry *et al.* (2001b) observaron que bajo condiciones de estrés hídrico el crecimiento se reduce disminuyendo la migración de fotoasimilados hacia los órganos vegetativos. Esto hace que las plantas desarrolladas bajo déficit hídrico moderado (DM_c y DM_2) obtengan menor área foliar; y por consiguiente, su consumo también sea menor.

En la fase de maduración de la baya, entre envero y vendimia, la humedad del suelo dependió del riego aplicado y del consumo de la planta, el cual dependió a su vez del desarrollo foliar del *canopy*, de la necesidad hídrica de la vid y de la temperatura. En 2011 el tratamiento de déficit moderado hasta pre-envero (DM_2) al final de la maduración alcanzó valores superiores de humedad del suelo que el tratamiento de déficit ligero (T), esto se debió a que en este periodo (al final de maduración) disminuye la demanda evapotranspirativa y las necesidades de la planta; y a que, el desarrollo foliar de DM_2 (déficit moderado hasta pre-envero) fue menor ya que el crecimiento de las cepas estaba limitado, al contrario que en T (déficit ligero) dónde esa limitación no fue tan grande.

En las cepas sometidas a déficit moderado a partir de pre-envero ($DM_1 = 30\% ET_0$) el contenido hídrico del suelo disminuyó drásticamente en la fase de maduración, a partir del cambio del riego. Romero *et al.*, 2011, con la variedad Monastrell en Jumilla observaron que el estrés severo ($15\% ET_c$ de cuajado a vendimia) reduce el contenido volumétrico de agua en el suelo, la función de las raíces y el intercambio gaseoso. Por último, las plantas sometidas a déficit moderado continuo (DM_c) consiguieron adaptarse a las condiciones de déficit a las que fueron sometidas y fueron capaces de regular su consumo en función de la disponibilidad hídrica del suelo. Cuevas (2001), Centeno (2005), y Junquera (2011) también observaron la regulación del consumo de agua por la planta en la fase de maduración de la baya entre envero y vendimia.

Distintos autores como: Gómez del Campo (1998), Cuevas (2001), Yuste (1995), Rubio (2002), López-Miranda (2002), Sánchez-Llorente (2004), Centeno (2005), Sánchez de Miguel (2007), Junquera (2011), han realizado estudios en zonas semiáridas similares y han constatado la reducción de la humedad del perfil a lo largo del ciclo de la vid en tratamientos de secano.

Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en la zona de raíces.

El tamaño y distribución del sistema radicular es un factor fundamental que determina la utilización del agua del suelo por la planta (Richards 1983, Keller 2005). Estudios previos aseguran que el agotamiento del agua del suelo, tanto por parte de las raíces de la planta como por la atmósfera, se produce principalmente en los primeros 60 cm del suelo, que es donde se sitúan la mayoría de las raíces (Champagnol, 1984). Además Soar and Loveys (2007) demostraron que más de la mitad de la densidad de raíces, en viñedos con riego por goteo, se produce en la parte superior del suelo, en los primeros 50 cm (Soar and Loveys, 2007). Por otro lado, un estudio realizado en Sudáfrica demostró que el riego por goteo reduce la propagación lateral del sistema radicular (Van Zyl 1988). Por eso en este trabajo se analizó la evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en la línea de plantación en los primeros 50 cm de suelo.

El déficit hídrico suele reducir la capacidad de las raíces de tomar el agua del suelo (Steudle, 2000). Pero, por otro lado, hay estudios que aseguran que el déficit hídrico estimula el crecimiento radical Hsiao y Xu (2000). Además, el riego por goteo, tiene un efecto positivo y es que concentra las raíces en un volumen relativamente pequeño de suelo, lo que están menos afectadas por la heterogeneidad del mismo (Stevens and Douglas 1994).

En nuestro estudio, la zona de raíces se vio altamente influenciada por el aporte de agua de riego y por la demanda de la atmosfera y de la planta. Al inicio del riego se humedeció la zona de mayor presencia radicular, pero al aumentar la demanda hídrica de la planta y de la atmosfera el agua de riego no llegó a ser suficiente para evitar la disminución de la humedad de la zona de raíces, disminuyendo la humedad del suelo de forma diferente entre tratamientos. Fue más lento a medida que se aportó mayor dosis de riego.

Distribución temporal del consumo de agua:

El clima de la zona centro de la península, dónde se encuentra el ensayo, se caracteriza por tener veranos calurosos y precipitaciones estacionales, centradas en otoño y primavera. En este periodo el perfil se recarga de agua situándose a capacidad de campo hasta que la demanda hídrica comienza a aumentar y se van consumiendo las reservas de agua del suelo (Centeno, 2005).

Al inicio del periodo activo de la cepa se produce un escaso consumo de agua del suelo (Godoy Ávila *et al.*, 1990a), a pesar de que la disponibilidad hídrica del mismo en esta fase sea alta. Esto se debe principalmente a las pequeñas necesidades hídricas de la cepa, ya que su crecimiento se realiza a expensas de las reservas acumuladas en el ciclo anterior (Winkler, 1965) y a que la demanda atmosférica es baja.

Wample (2000) señala que la fracción de agua consumida en la fase comprendida entre desborre y floración, de forma general, no es mayor del 5% del total de agua consumida en el ciclo. Esto puede ser ligeramente superior en función de las condiciones climáticas que se den en la zona de cultivo. En esta fase el consumo del viñedo está marcado principalmente por la demanda atmosférica. En este trabajo, en 2011, el agua consumida desde un poco después de brotación hasta floración es del 10% (dato superior al obtenido por Wample en 2000) esto se debió a la alta demanda atmosférica en la zona donde se realizó el estudio (188 mm).

A partir de floración, al disminuir los contenidos de humedad del suelo y aumentar las resistencias a la absorción de agua, la vid ejerce un mayor control sobre la transpiración (Smart and Coombe, 1983). Algunos autores han encontrado que en floración-cuajado se produce una desaceleración de la tendencia ascendente de los consumos de agua (Evans *et al.*, 1993; Gómez del Campo, 1998). En nuestro trabajo fue en la etapa de floración a cierre de racimos donde se dieron los consumos más bajos del ciclo en aquellos tratamientos sometidos a estrés (1 mm/día), DM_c (déficit moderado continuo) y DM_2 (déficit moderado hasta pre-envero) Sin embargo, en los

tratamientos regados no se produjo ninguna desaceleración de la tendencia ascendente del consumo diario.

En la fase de pre-envero a vendimia, en la media de los dos años de estudio, los consumos medios diarios se escalonaron en función de la dosis de riego, a mayor agua mayor consumo: 3,4 mm/día en T con un $k_c = 0,6$; 2,8 mm/día en DM_2 con un $k_c = 0,6$; 2,2 mm/día en DM_1 con un $k_c = 0,3$ y 2 mm/día en DM_c con un $k_c = 0,3$;

Los periodos de mayor consumo de agua fueron de cierre de racimos a envero y de envero a vendimia.

Al realizar el análisis del consumo de las plantas en el periodo anterior y posterior al pre-envero, se observó que en la Etapa I, desde floración a pre-envero, el consumo de agua aumentó a medida que se incrementó la dosis de riego durante el crecimiento de la baya y también debido al aumento de la demanda atmosférica.

En la Etapa II, desde pre-envero hasta final de riego, se observó que la media de los consumos totales y diarios no correspondieron con el volumen de agua aplicado, esto pudo ser debido a las diferencias en el desarrollo de la superficie foliar total. Cumpliéndose un mayor consumo en aquellas cepas que habían desarrollado mayor masa vegetal (T y DM_1). Las diferencias de consumo (mm/día) observadas en esta etapa fueron debidas al aporte de agua mediante riego, al desarrollo vegetativo y a la temperatura.

Mediante la aplicación del riego se logró mitigar la escasez de lluvias del periodo estival, lo que demostró que la humedad del perfil del suelo está altamente relacionada con el riego.

IV.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Acevedo-Opazo C., H. Valdes-Gómez, J. A. Taylor, A. Avalo, N. Verdugo-Vásquez, M. Araya, F. Jaras-Rojas and B. Tysseyre. Assesment of an empirical spatial prediction model of vine water status for irrigation management in a grapevine field. *Agricultural Water Management* 124: 58 – 68.
- Buttrose, M. S. 1966. The effect of reducing leaf area on the growth of roots, stems and berries of Gordo grapevines. *Vitis* 5: 455-464.
- Centeno, A. 2005. Evaluación del comportamiento de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) en condiciones de déficit hídrico: efectos sobre el estado hídrico, crecimiento, rendimiento, biomasa y composición de la uva. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. Agrónomos. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia.: 193.
- Champagnol, F. 1984. Elements de physiologie de la vigne et de viticulture generale. F. Champagnol. Montpellier. France.
- Comas, L. H., L. J. Anderson, R. M. Dunst, A. N. Lakso and D. M. Eissenstat. 2005. Canopy and environmental control of root dynamics in a long-term study of Concord grape. *New Phytologist* 167: 829-840
- Coombe, B.G., P.R. Dry. 1992. Viticulture. Volume 2 Practices, Winetitles. Adelaide. Australia
- Cortell, J.M., M. Halbleib, AV. Gallagher, T. Righetti, and J.A Kennedy. 2005. Influence of vine vigor on grape (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) and wine proanthocyanidins. 1. *Agric. Food Chern.* 53:5798-5808.
- Cortell, J.M., M. Halbleib, A.V. Galagher, T.L. Righetti, and J.A. Kennedy. 2007. Influence of vine vigor on grape (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) anthocyanins. 1. Anthocyanin concentration and composition in fruit. *J. Agric. Food Chem.* 55:6575-6584.
- Creasy and Creasy, 2009. G.L. Creasy, L.L. Creasy. Grapes. CAB International, Oxfordshire. 295 pp.
- Cuevas, E. 2001. Estudio de mecanismos de adaptación ecofisiológica de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) al déficit hídrico. Evaluación del consumo de agua y de las respuestas agronómicas en diferentes regímenes hídricos. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. Madrid, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agronomos. Universidad Politécnica de Madrid.: 219.
- Da Silva F., R. Wallach, A. Polak and Y. Chen. 1998. Measuring Water Content of Soil Substitutes with Time-domain Reflectometry (TDR). *JASHS* vol. 123 nº 4. 734-737
- Davenport, J.R., R.G. Stevens, K.M. Whitley. 2008. Spatial and temporal distribution of soil moisture in drip-irrigated vineyards. *HortScience* 43: 229-235
- Dry, P. R., B. R. Loveys, M. G. McCarthy and M. Stoll. 2001b. Strategic irrigation management in Autralian vineyards. *Journal Internationale des Science de la Vigne et du Vin* 35: 129-139

- Eastham, J. y S. A. Gray 1998. A preliminary evaluation of the suitability of sap flow sensors for use in scheduling vineyard irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 49 (2): 171-176.
- Evans, R. G., S. E. Spayd, M. W. Kroeger and M. O. Mahan. 1993. Water use of *Vitis vinifera* grapes in Washington. *Agricultural Water Management* 23: 109-124.
- Fares, A., V. Polyakov. 2006. Advances in crop water management using capacitive water sensors. *Advances in Agron.* 90: 43-47.
- Freeman, B. M. y R. E. Smart. 1976. Research note: a root observation laboratory for studies with grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 27(1): 36-39.
- Gardner, W. R. 1983. Soil properties and efficient water use: an overview. Limitations to efficient water use in crop production. Chapter 2A: 45-63.
- Godoy Avila, C. and López, I. 1990a. Relación entre la producción y consumo de agua en combinaciones de 24 portainjertos y dos cultivares de vid (*Vitis vinifera* L.). *ITEA* 86(1): 25-35.
- Gómez del Campo, M. V. 1998. Mecanismos de adaptación a sequía en la vid. Evaluación del consumo de agua, crecimiento y desarrollo vegetativo, productividad y eficiencia en el uso del agua de cuatro genotipos de vid. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Producción Vegetal: Fitotecnia. Universidad Politécnica de Madrid: 383.
- Grimes, W. and L. E. Williams 1990. Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson seedless grapevines. *Crop Science* 30: 255-260.
- Hardie, W. J. and J. A. Considine 1976. Response of grapes to water deficit stress in particular stages of development. *American Journal of Enology and Viticulture* 27: 55-61
- Hsiao, T. C. and L. K. Xu 2000. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany* 51 N°350: 1595-1616
- International Atomic Energy Agency, IAEA. 2008. Field estimation of soil water content: a practical guide to methods, instrumentation and sensor technology. IAEA. Vienna, Austria.
- Intrigliolo, D., P.J. Ferrer, J.R. Castel. 2007. Monitorización del riego en vid. In: *Fundamentos, Aplicación y Consecuencias del Riego en la Vid*. P. Baeza, J.R. Lissarrague and P. Sánchez de Miguel (Eds.), pp. 83-114. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid.
- Intrigliolo, D., D. Pérez, D. Risco, A. Yeves and J.R. Castel (2012). Yield Components and grapes composition responses to seasonal water deficits in Tempranillo grapevines. *Irrigation science* 30, 339 – 349.
- Junquera, P. 2011. Influencia de la distancia entre filas y de la densidad de pámpanos en el aprovechamiento de los recursos ambientales y en la respuesta del cv. Tempranillo (*Vitis Vinifera* L.), conducido en espaldera con riego deficitario. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

- Keller, M. 2004. Deficit Irrigation and Vine Mineral Nutrition. Soil Environment and Vineminerál Nutritión Symposium, San Diego, California., American Society for Enology and Viticulture.
- Keller, M. 2005. Deficit irrigation and vine mineral nutrition. *Am. J. Enol. Vitic.* 56: 267-283.
- Keller, M. 2010. The science of grapevine: anatomy and physiology. Academic Press, New York. 377 pp.
- López-Miranda, S., J. Yuste, H. Martín y R. Yuste. 2004. Estimación del rendimiento para adecuar la aplicación del aclareo de racimos al nivel de producción perseguido. *Viticultura y Enología Profesional* 92: 37-44.
- Lovisolo, C. and A. Schubert. 1998. Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. *Journal of Experimental Botany* 49 N° 321: 693-700
- Luke, G. 1990. Interpreting tensiometer readings. *Farmnote* 24.
- Marsal J, M. Mata, J. del Campo, A. Arbones, X. Vallverdú, J. Girona, and N. Olivo. 2008. Evaluation of partial root-zone drying for potential Weld use as a deWcit irrigation technique in commercial vineyards according to two diVerent pipeline layouts. *Irrig Sci.* 26:347–356
- Matthews, M. and M. Anderson 1989. Fruit reproductive development in grape (*Vitis vinifera* L.) responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 40(1): 52-59
- McCarthy, M.G., B. Loveys, P. Dry, and M. Stoll. 2002. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. pp. 79-87. In: *Deficit irrigation practices*, FAO Water Reports No. 22 Rome, Italy.
- Mériaux, S., H. RoUin y P. Rutten. 1981. Effets de la sécheresse sur la vigne (*Vitis vinifera* L.) II. Études "Grenache". *Agronomie* 1: 375-382.
- Morlat, R. and A. Jacquet. 1993a. The soil effects on the grapevie root system in several vineyards of the Loire valley (France). *Vitis* 32: 35-42
- Mullins, M. G., A. Bouquet and L. E. Williams. 1992. Developmental physiology: the vegetative grapevine. *Biology of the grapevine*. M. G. B. Mullins, A. Williams. L.E. Cambridbe. U.K, Cambridge University Press: 80-111.
- Pellgrino A., E. Lebon, T. Simonneau, and J. Wery. 2005. Toward a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Aust. J. Grape Wine Res.*, 11, 306-315.
- Pelletier, G. and Tan, C. S. 1993. Determining irrigation wetting patterns using time domain reflectometry. *Hortscience* 28(4): 338-339.
- Prior, L. D. and Grieve, A. M. 1986. Water use and irrigation requirements of grapevine. *Proc. VI Australian wine industry Technical Conference*. Adelaide, South Australia.: 14-17.
- Prior, L. D. y A. M. Grieve 1987. Water use and irrigation requirements of grapevines, ed. T. H. Lee. Adelaide, S. A., Australian Industrial Publishers, pp. 165-168.
- Richards, D. 1983. The grape root system. *Hortic. Rev.* 5: 127-168.

- Romero, P., J.I. Fernández-Fernández, A. Martínez-Cutillas. 2010. Physiological thresholds for efficient regulated deficit-irrigation management in winegrapes grown under semiarid conditions. *Am. J. Enol. Vitic.* 61:3 (300-312).
- Romero, P., I. C. Dodd, A. Martínez-Cutillas. 2012. Contrasting physiological effects of partial root zone drying in field-grown grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Monastrell) according to total soil water availability. *Journal of Experimental Botany.* 63 (11): 4071 – 4083.
- Rubio, J. A. 2002. Riego y aclareo racimos: efectos en la actividad fisiológica, en el control del rendimiento y en la calidad de la uva del cv. Tempranillo (*Vitis vinifera* L.). Tesis Doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid: 254.
- Sánchez de Miguel, P. 2007. Producción y distribución de fotoasimilados en la vid (*Vitis vinifera* L.) durante el periodo de maduración. Cambios en la respuesta fotosintética a la luz de las hojas por factores biológicos, ambientales y culturales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez-Llorente, P. 2004. Respuesta de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) en relación a la evolución del contenido de agua en el suelo en regímenes hídricos deficitarios. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Producción Vegetal: Fitotecnia. Universidad Politécnica de Madrid: 228.
- Saxton K. E. and W.J. Rawls. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569 – 1578.
- Schultz, H. R. 2003. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment* 26: 1393-1405.
- Sebastián B., P. Baeza, L. G. Santesteban, P. Sánchez de Miguel, M. De La Fuente and J.R. Lissarrague. 2015. Response of grapevine cv. Syrah to irrigation frequency and water distribution pattern in a clay soil. *Agricultural Water Management.* 148: 269 – 279.
- Sentek 2001. Calibration of Sentek Pty Ltd Soil Moisture Sensores. Sentek Pty Ltd. Stepney, Australia.
- Smart, R. E. and B. G. Coombe 1983. Water relations of grapevines. Water deficits and plant growth. T. T. Kozlowski. New York, Academic Press. VII: 137-196.
- Soar, C.J., B.R. Loveys. 2007. The effect of changing patterns in soil-moisture availability on grapevine root distribution, and viticultural implications for converting full-cover irrigation into a point-source irrigation system. *Aust. J. Grape Wine Res.* 13: 2-13.
- Sottile, I. 2001. Bases ecophysiologicals et choix techniques dans la gestion de l'eau dans les vignobles de l'Italie: particularités du raisin de table (Première partie). *Progress Agricole et Viticole* 118(19): 407-415.
- Steudle, E. 2000. Water uptake by roots: effects of water deficit. *Journal of Experimental Botany* 51 N° 350: 1531-1542
- Stevens, R.M., T. Douglas. 1994. Distribution of grapevine roots and salt under drip and full-ground cover microjet irrigation systems. *Irr. Sci.* 15: 147-154.

- Trambouze, W. y M. Voltz. 1996. Caractérisation des relations hydriques sol/vigne dans un terroir languedocien. Angers-France, INRA.
- Tregoat, O., Van Leeuwen, C., Chone and Gaudillère. 2002. Étude du regime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. *J. Int. Sci. Vigne Vin.* 36(3): 133 - 142.
- Van Leeuwen C., P. Pieri and P. Vivin. 2010. Comparison of three operational tools for assessment of wine water status: stem water potential, carbon isotope discrimination measured on grape sugar and water balance. *Methodologies and Results in Grapevine Research.* pp: 87 – 106.
- Van Rooyen, F. C., H. W. Weber and I. Levin. 1980. The response of grapes to manipulation of the soil-plant-atmosphere continuum. I Growth, yield and quality response. *Agrichemo-physica* 12: 59-68
- Van Zyl, J. L. 1984. Response of Colombar grapevines as regards quality aspects and growth. *South African Journal of Enology and Viticulture* 5: 19-28
- Van Zyl, J.L. 1988. Response of grapevine roots to soil water regimes and irrigation systems. In: *The grapevine root and its environment.* J.L. van Zyl (Ed.), pp. 30-43 South African Department of Agriculture and Water Supply. Pretoria.
- Wample, R. L. 2000. Regulated deficit irrigation as a water management strategy in *Vitis vinifera* production. *Water reports* 22. www.fao.org/docrep/004/Y3655E/y3655e12.htm
- White, R. E. 2009. *Understanding vineyards soils.* Oxford University Press. 230 pp.
- Williams L. E, D.W. Grimes, C.J. Phene. 2010a. The effects of applied water at various fractions of measured evapotranspiration on water relations and vegetative growth of Thompson Seedless. *Irrig Sci* 43: 221 – 232
- Williams L. E, D.W. Grimes, C. J. Phene. 2010b, The effects of applied water at various fractions of measured evapotranspiration on reproductive growth and water productivity of Thompson Seedless. *Irrig Sci* 28: 233 – 243
- Williams L.E., P. Baeza and P. Vaughn. 2014. Midday measurements of leaf water potential and stomatal conductance are highly correlated with daily water use of Thompson Seedless grapevines. *Irrig Sci* 30: 201 – 212.
- Williams, L. E. and D. W. Grimes. 1987. Modelling vine growth- development of a data set for a water balance subroutine. *Proceedings of VI Australian wine industry Technical Conference, South Australia,* 169-174.
- Winkler, A. J. 1965. *Viticultura.* México, Ed. Continental. pp. 792.
- Yuste, J. 1995. Comportamiento fisiológico y agronómico de la vid (*Vitis vinifera* L.) en diferentes sistemas de conducción en secano y regadío. Tesis Doctoral. Madrid, E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid: 280.

CAPÍTULO V:

EFFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (*Vitis vinifera* L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO EN EL INTERCAMBIO DE GASES DE LA HOJA Y EN EL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.

V.1	RESUMEN.....	111
V.2	INTRODUCCIÓN.....	112
V.3	MATERIAL Y MÉTODOS.....	114
	V.3.1 MEDIDAS DE FISIOLOGÍA.....	114
	V.3.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.....	117
V.4	RESULTADOS.....	118
	V.4.1 INTERCAMBIO DE GASES Y POTENCIAL HÍDRICO.....	118
	V.4.2 INFLUENCIA DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA EN EL INTERCAMBIO GASEOSO EN EL PERIODO ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO.....	127
V.5	DISCUSIÓN.....	134
V.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140

V.1 RESUMEN.

Dada la importancia que tiene en climas cálidos la disponibilidad hídrica de la planta en el intercambio de gases, se evaluó, en Cabernet Sauvignon, el efecto del déficit hídrico en los periodos anterior y posterior al envero sobre el estado hídrico de la planta; y sobre el intercambio gaseoso en la hoja.

Con este propósito se estudiaron cuatro tratamientos experimentales que consistieron en diferentes riegos deficitarios: déficit ligero (T), déficit moderado continuo (DM_c), déficit moderado a partir de pre-envero (DM_1) y déficit moderado hasta pre-envero (DM_2).

Se midió en días despejados el potencial hídrico foliar, el déficit de presión de vapor entre la hoja y el aire (VPD), la conductancia estomática, la transpiración y la asimilación neta de CO_2 sobre hojas situadas a la altura de racimos completamente expandidas y bien iluminadas. Las medidas se realizaron entre cuajado y vendimia con una periodicidad quincenal. Se realizaron en diferentes momentos del día a media mañana, a mediodía solar y por la tarde. Además se hicieron seguimientos diarios en los estados fenológicos más importantes para este trabajo, como cuajado, pre-envero y mitad de maduración.

El aumento del déficit hídrico disminuyó el contenido de agua en el suelo, lo que provocó diferencias en el estado hídrico de la planta y por consiguiente, en el intercambio gaseoso. En condiciones de déficit moderado, la fotosíntesis se encontró altamente correlacionada con el potencial hídrico foliar medido a mediodía solar.

Por otro lado, en la situación de déficit hídrico moderado a la que fueron sometidas las plantas ($\psi_{md} > -1,4$ MPa); la disponibilidad hídrica, la demanda atmosférica y el nivel de hidratación de las hojas, interaccionaron de forma compleja en la regulación estomática de las hojas, condicionando el intercambio gaseoso y la eficiencia en el uso del agua.

V.2 INTRODUCCIÓN.

En las zonas semiáridas donde es típico la escasez de precipitaciones estivales y donde el agua es un factor limitante para el crecimiento y desarrollo de la cepa. La vid puede experimentar largos periodos de déficit hídrico, sobre todo en la etapa de maduración de la baya. Además la falta de agua puede limitar la asimilación de CO₂ quedando comprometida la productividad de la cepa (Medrano *et al.*, 2003).

Las plantas presentan mecanismos de resistencia a la sequía a través de procesos morfológicos y fisiológicos, como disminuir su desarrollo foliar, aumentar la resistencia estomática o reducir su potencial hídrico (Zamboni y Iacono 1988). Si el déficit hídrico persiste, dichas respuestas pueden provocar una reducción de la fotosíntesis, de la conductancia estomática y de la transpiración. (Matthews and Anderson 1989; Naor *et al.*, 1994; Ginestar *et al.*, 1998; Escalona *et al.* 1999; Zufferey 2000; Lawlor 2002). La primera reacción de la vid a la sequía del suelo es la desaceleración del crecimiento vegetativo, seguido por el control de la abertura de estomas para conservar los recursos hídricos a través de mecanismos hidráulicos u hormonales (Williams *et al.*, 1994; Düring *et al.*, 1996; Medrano *et al.*, 2003; Cuevas *et al.*, 2006) y por último disminuye la transpiración. La disponibilidad de agua a lo largo del ciclo influye, de modo decisivo, en la capacidad fotosintética de la planta y en su respuesta a la variación de las condiciones ambientales. Además, es un factor determinante para la fijación de CO₂ de la atmósfera, y esto, a su vez, tiene una gran importancia en el crecimiento y desarrollo del cultivo y en el rendimiento potencial.

Dadas las consecuencias negativas del déficit hídrico severo en el funcionamiento de la planta, es importante, en zonas áridas, optimizar la eficiencia en el uso del agua. Para ello es necesario conocer el impacto de la aplicación de déficit hídricos en el periodo anterior y posterior al envero sobre el crecimiento, el rendimiento y el comportamiento fisiológico de la planta.

Para obtener una programación eficaz del déficit hídrico (RDI) es necesario definir los umbrales de los indicadores de estrés de la planta, más allá de los cuales el riego se hace necesario para evitar efectos perjudiciales y también para lograr objetivos específicos en el manejo del cultivo. Sin embargo, las diferentes respuestas de las plantas al estrés hídrico, dependiendo del cultivar y de las condiciones climáticas, dificultan el uso de un único indicador del estado hídrico.

Dada la importancia que tiene en regiones semiáridas la disponibilidad hídrica en la productividad y en la eficiencia en el uso del agua, el principal objetivo de este

capítulo fue conocer cómo el déficit hídrico en los periodos anterior y posterior al envero afecta al comportamiento fisiológico de la planta a lo largo del ciclo.

Por otro lado se quiso estudiar qué indicador del estado hídrico de la planta es más sensible en condiciones de déficit hídrico moderado.

V.3 MATERIAL Y MÉTODOS.

V.3.1 MEDIDAS DE FISIOLÓGÍA.

Se hizo un seguimiento quincenal de la fotosíntesis, de la conductancia estomática, de la transpiración y del potencial hídrico foliar, comenzando en cuajado y terminando en vendimia. Las medidas fueron realizadas en diferentes momentos del día: a media mañana, a mediodía solar y por la tarde.

Además, se estudió la relación de dichos parámetros con las condiciones microclimáticas y el estado hídrico de la planta y el intercambio de gases de la hoja con la atmósfera.

En este trabajo se determinaron las siguientes horas de medida a lo largo del día:

- Hora de medida de media mañana entre las 10:00 y las 11:00 hora local.
- Hora de medida de mediodía solar entre la 13:00 y las 14:00 hora local, midiendo en las hojas que se sitúan en la cara este de la espaldera (cara expuesta al sol durante toda la mañana), justo antes de que cambie el sol de cara.
- Hora de medida de tarde entre las 16:30 y las 18:30 hora local, y se midió en las hojas situadas en la cara oeste.

Todas las medidas se realizaron sobre hojas bien iluminadas del pámpano principal y de la zona de racimos. Se seleccionaron 6 hojas adultas, totalmente desarrolladas y sanas por cada tratamiento. La duración de cada medida fue inferior a una hora refiriéndose los datos al momento central del intervalo.



Imagen V.1: Descripción de la zona de racimos donde se seleccionaron las hojas adultas, expandidas y bien iluminadas para realizar las medidas de fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración y potencial hídrico foliar.

Las diferentes variables se midieron con un sistema abierto de medida de intercambio de gases por infrarrojos (IRGA) (Li-6400, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA.).

El IRGA funciona como un sistema abierto donde la corriente de aire atraviesa la cubeta donde se encuentra la hoja metabólicamente activa y lo hace con flujo constante para que la concentración de aire en la cubeta también sea constante. Para mantener la concentración de CO₂ constante (400 µmol/mol) se instaló un inyector de CO₂ en el IRGA, evitándose las variaciones ocasionadas por el viento, respiración del personal científico... El funcionamiento del sistema se basa en la determinación de la concentración de CO₂ y H₂O en el aire que atraviesa la cubeta y en el aire de referencia. Para ello consta de dos detectores de infrarrojos (uno analiza el aire pasado a través de la muestra y otro el aire control), que detectan las variaciones de CO₂ y agua en el aire a partir de medidas de absorbancia en ciertas bandas de infrarrojo. Estos dos gases son diatómicos y absorben en el infrarrojo.



Imagen V.2: IRGA. Sistema abierto de medida de intercambio de gases por infrarrojos (Li-6400, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA.)

En la cubeta se posiciona una hoja que fotosintetiza y transpira, el aire que la atraviesa abandona la cubeta con menos CO_2 y con más vapor de agua que el aire de referencia. Conociendo esta variación, el flujo de aire y la superficie de la hoja analizada puede calcularse la tasa de **asimilación de CO_2** en $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; y la tasa de **transpiración (E)** expresada en $\text{mmol H}_2\text{O} / \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

La cámara de Li-6400 lleva incorporada un termopar que permite medir la **temperatura de la hoja** insertada en el interior de la cubeta y otro en el exterior para medir la **temperatura del aire**. A partir de estas medidas puede calcularse, siguiendo el modelo de von Caemmerer y Faquhar (1981), la **conductancia estomática (g_s)** expresado en $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Puesto que no existe un sensor específico que mida la humedad relativa, su cálculo se realiza a través de la fracción molar de agua, la presión y la temperatura. El IRGA Li-6400 mide la humedad relativa en la cubeta (muestra) y en el aire control (de referencia), y calcula la humedad relativa como el ratio entre la presión de vapor del aire y la presión de vapor a saturación. Con el valor de referencia se establece la

humedad relativa del ambiente donde se encuentra la hoja en el momento de medida (HR, %).

$$H_r = e_T / e(T_a)$$

Tampoco existe un sensor específico en el IRGA Li-6400 para medir el **déficit de presión de vapor** (VPD; kPa), por lo que se calcula a través de la fracción molar de agua, la presión y la temperatura.

$$VPD = e(T_f) - e_s$$

V.3.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA

El estado hídrico de la planta se evaluó a través del potencial hídrico foliar medido antes de amanecer (ψ_{pd}) y a lo largo del día (ψ_t). Se utilizó una cámara de presión tipo Scholander (Modelo 3000, Soil Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, CA, USA) de acuerdo a la metodología desarrollada por Linares *et al.* (2007).

El potencial hídrico desde el punto de vista energético, corresponde al trabajo que habría que suministrar a una unidad de masa de agua “ligada” a los tejidos de una planta; para llevarla de este estado de unión a un estado de referencia o de agua libre; que corresponde al del agua pura para la misma temperatura y presión atmosférica. Al adoptar el valor cero para este potencial de referencia, todos los ψ que caracterizan “el agua ligada” son negativos, puesto que es necesario realizar un trabajo para llevar esta agua a un $\psi = 0$ (Linares *et al.*, 2007).

Cuando coincidieron las medidas de intercambio de gases con las de potencial hídrico foliar, este se midió en las mismas hojas que las muestreadas para la medida de intercambio de gases, inmediatamente después de haberse realizado esta medida en cada hoja.

V.4 RESULTADOS.

V.4.1 INTERCAMBIO DE GASES Y POTENCIAL HÍDRICO.

Durante el ciclo se realizaron varias medidas para evaluar el nivel fisiológico e hídrico de los diferentes tratamientos del ensayo. En la figura V.1, se muestra la evolución de los parámetros fisiológicos medidos a media mañana en 2010; y se representa la evolución de las condiciones ambientales de los días en los que se realizó las medidas.

La evolución de la fotosíntesis medida a media mañana a lo largo del ciclo en **2010** se ve condicionada por el contenido volumétrico de agua en el suelo. Al inicio del desarrollo reproductivo (iniciación floral) no se observaron diferencias significativas en la humedad del suelo debido a la estrategia de riego, esto quedó reflejado en la tasa fotosintética, en la conductancia estomática y en la transpiración. A medida que se intensificó el riego antes de pre-verano, los tratamientos con mayor humedad del suelo correspondieron con los que presentaron mayores tasas fotosintéticas ($17-19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Y los tratamientos sometidos a déficit en este periodo (sin riego; DM_c y DM₂) fueron agotando el agua del suelo, que condicionó la asimilación de CO₂, obteniéndose menores tasas fotosintéticas ($14 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Al estudiar la evolución de la conductancia estomática se observó un comportamiento parecido al de la fotosíntesis. Siendo las conductancias más altas ($0,35 - 0,40 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) las que correspondieron a los tratamientos regados desde floración, frente a $0,18 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, de DM_c y DM₂.

Con el cambio de riego en pre-verano, DM₁ pasó de $k_c = 0,6$; a $k_c = 0,3$ y DM₂ pasó de $k_c = 0,3$; a $k_c = 0,6$, este cambio quedó reflejado en los parámetros fisiológicos aumentando la g_s y A_n en DM₂ (26% g_s y 7 % A_n); mientras que DM₁ no cerró estomas inmediatamente después de la reducción del riego; manteniendo la tasa fotosintética en $18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

A mitad de maduración la fotosíntesis de los tratamientos sin estrés descendió igualándose a la de los otros tratamientos deficitarios, debido principalmente a las condiciones desfavorables que se dieron en el medio: temperaturas elevadas ($T > 32^\circ\text{C}$) y aumento del VPD ($> 2 \text{ KPa}$). Afectó también a la abertura estomática, la cual disminuyó en T y DM₁ (tratamientos con mayor desarrollo vegetativo) y aumentó en DM₂ y DM_c (tratamientos con menor desarrollo vegetativo). La transpiración también se vio afectada por las condiciones del medio, incrementando su tasa en todos los tratamientos debido al aumento del déficit de presión de vapor y de la temperatura.

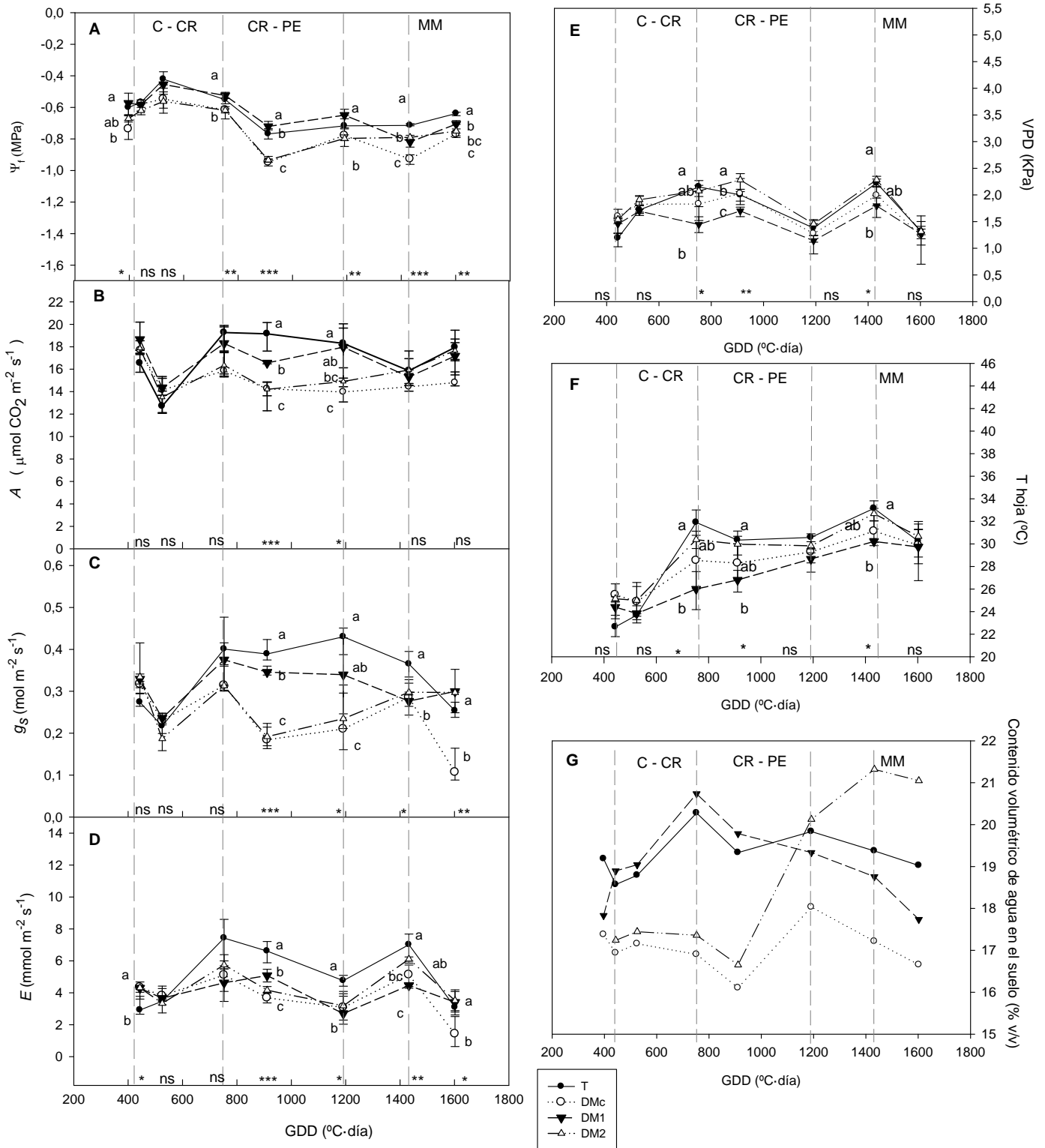


Figura V.1: Evolución estacional en 2010 a media mañana de (A) potencial hídrico foliar (Ψ_l); (B) fotosíntesis (A ; $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); (C) conductancia estomática (g_s ; $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); y (D) transpiración (E ; $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Condiciones ambientales medidas a media mañana de los días que se realizaron las medidas fisiológicas: (E) déficit de presión de vapor (VPD; KPa), (F) temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), (G) contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v). Las líneas verticales indican los estados fenológicos (C = Cuajado; CR = Cierre de Racimos; PE = Pre-Envero y MM = Mitad de Maduración). Barras verticales muestran el error estándar de la media.

En la figura V.2, se muestra la evolución de los parámetros fisiológicos medidos a media mañana en 2011 y se representa la evolución de las condiciones del medio de los días que se realizaron las medidas.

En 2011 en cuajado la tasa de fotosíntesis, la conductancia estomática y la transpiración, no presentaron diferencias significativas en plantas regadas vs. no regadas, al presentar valores similares en el contenido de humedad del suelo.

En la etapa de cuajado a pre-verano (antes del cambio de riego), la asimilación de CO_2 y la conductancia estomática se comportaron de manera similar acorde con el contenido hídrico del sistema suelo-planta (contenido volumétrico de agua en el suelo y potencial hídrico foliar). Disminuyó lentamente la humedad del suelo y el θ de todos los tratamientos pero con pendientes diferentes. Por un lado en T (déficit ligero) y DM_1 (déficit moderado a partir de pre-verano), el lento descenso del agua disponible en el suelo no afectó a los parámetros fisiológicos, es decir, el agua no fue un factor limitante; aumentando la abertura estomática y a su vez la asimilación de CO_2 ($A_n = 19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $g_s = 0,40 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en T). Por otro lado en DM_c y DM_2 , la pendiente negativa del contenido volumétrico de agua en el suelo fue muy pronunciada y afectó a la fisiología de la vid, disminuyendo la abertura estomática, y por consiguiente, la fotosíntesis ($A_n = 12 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $g_s = 0,09 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en DM_c).

Después del cambio de riego disminuyó ligeramente la tasa fotosintética en T y DM_1 , en parte, debido al cierre estomático generado por las altas temperaturas del aire y el elevado déficit de presión de vapor.

Ya en vendimia, al final del ciclo, la inhibición no estomática de la fotosíntesis se intensifica debido al aumento gradual del déficit hídrico en el suelo.

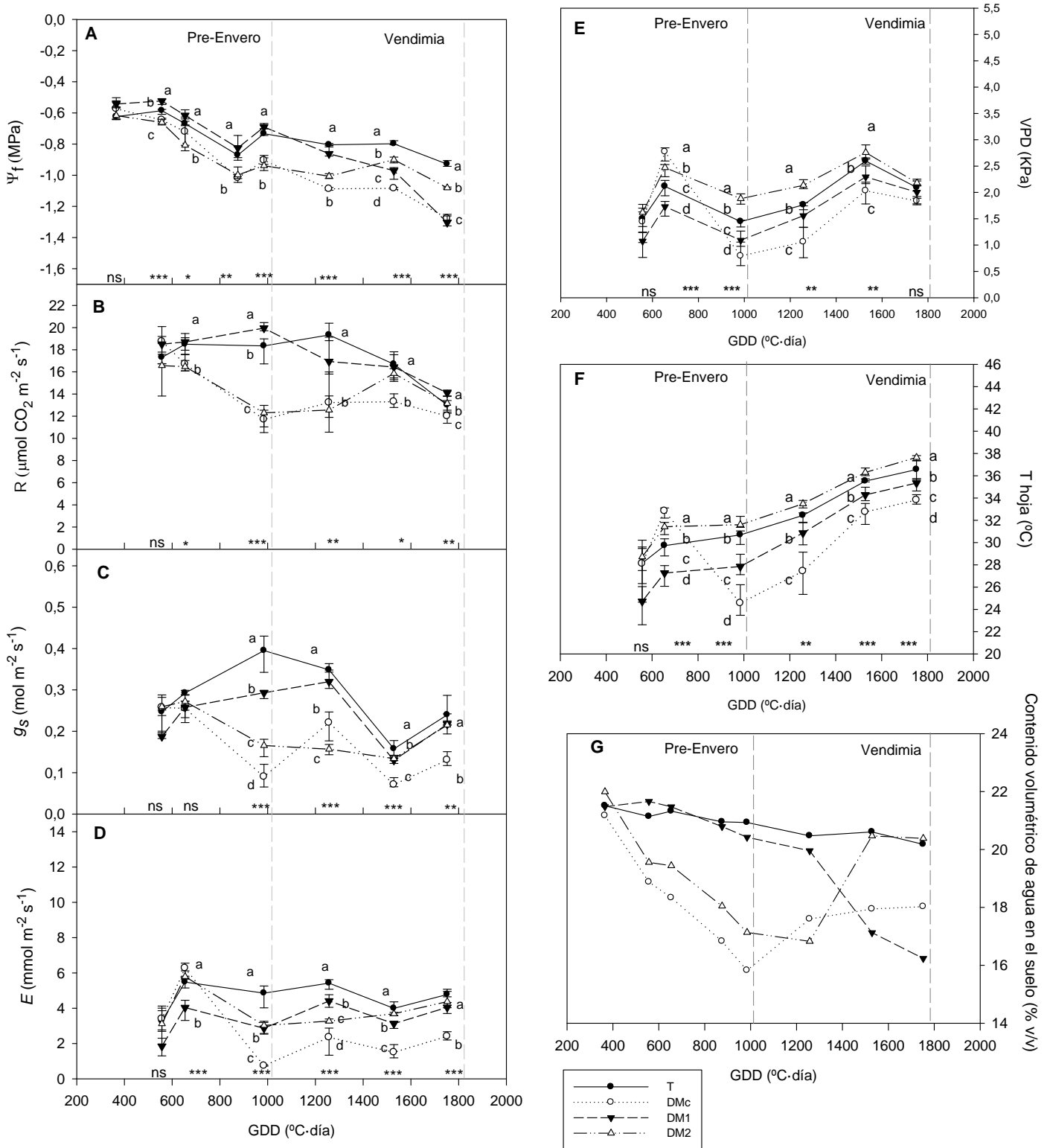


Figura V.2: Evolución estacional durante 2011 a media mañana de (A) potencial hídrico foliar (Ψ_f); (B) fotosíntesis (A ; $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); (C) conductancia estomática (g_s ; $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); y (D) transpiración (E ; $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Condiciones ambientales medidas a media mañana de los días que se realizaron las medidas fisiológicas: (E) déficit de presión de vapor (VPD; KPa), (F) temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), (G) contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v). Las líneas verticales indican los estados fenológicos (Pre-Envero y Vendimia). Barras verticales muestran el error estándar de la media.

En 2010 (ver figura V.3) la agrupación de tratamientos observada a media mañana se acentuó en las medidas realizadas a mediodía solar. La tasa de fotosíntesis antes del cierre de racimos fue similar en vides regadas y no regadas ($17 - 19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) al presentar valores similares de contenido hídrico del suelo en ambos tratamientos. A medida que el ciclo avanzó, los tratamientos regados mantuvieron el nivel de fotosíntesis, mostrando un leve descenso en la actividad fotosintética acorde con el descenso del potencial hídrico foliar y la conductancia estomática.

En los tratamientos sometidos a déficit moderado antes de pre-verno (DM_c y DM_2), se produce una bajada brusca en la conductancia estomática ($0,11 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) y en la fotosíntesis ($8,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Debido principalmente a las altas temperaturas del aire y al elevado déficit de presión de vapor ($\text{VPD} = 4,2 \text{ KPa}$). La transpiración en dichos tratamientos también se vio afectada por las condiciones del medio, alcanzando valores medios de $6 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Por otro lado, las vides regadas, al encontrarse correctamente hidratadas, no respondieron de la misma manera; la transpiración intervino en la regulación térmica de las hojas contribuyendo a disipar parte del exceso de energía debido a las altas temperaturas y a la radiación solar. Dichos tratamientos alcanzaron su máximo valor de E al medio día solar medido a lo largo de todo el ciclo ($13 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

Al producirse el cambio de riego, las vides que se empiezan a regar (DM_c y DM_2) respondieron inmediatamente en la asimilación de CO_2 , aumentando la tasa fotosintética en un 62% acorde con la conductancia estomática. En el tratamiento DM_2 al suministrarle un 70% de la ET_o se recuperó el contenido volumétrico de agua en el suelo ($\sim 20\%$), así como el estado hídrico de la planta $0,8 \text{ MPa}$ (plantas sin estrés según Deloire *et al.*, 2004). Sin embargo, no consiguió alcanzar los valores fotosintéticos obtenidos por las plantas que habían sido regadas hasta pre-verno, mostrando diferencias significativa (T y $\text{DM}_1 = 18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $\text{DM}_2 = 14 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). La limitación hídrica a la que fue sometido DM_2 ocasionó daños estructurales en el aparato fotosintético de la hoja.

Por otro lado, el cambio de riego en DM_1 , déficit moderado a partir de pre-verno, ocasionó una disminución en la humedad del suelo y en el estado hídrico de la planta ($-1,1 \text{ MPa}$ en enero, estrés ligero según Deloire *et al.*, 2004); pero esto no provocó cambios en la asimilación de CO_2 ni en la conductancia estomática. Esto quiere decir que dichas plantas se comportaron de forma anisohídrica, utilizando todo el agua disponible para su crecimiento y fisiología, a la espera de que el nivel de agua se

mantuviera a lo largo del ciclo, pudiendo llegar a comprometer su supervivencia frente al agotamiento de la humedad del suelo.

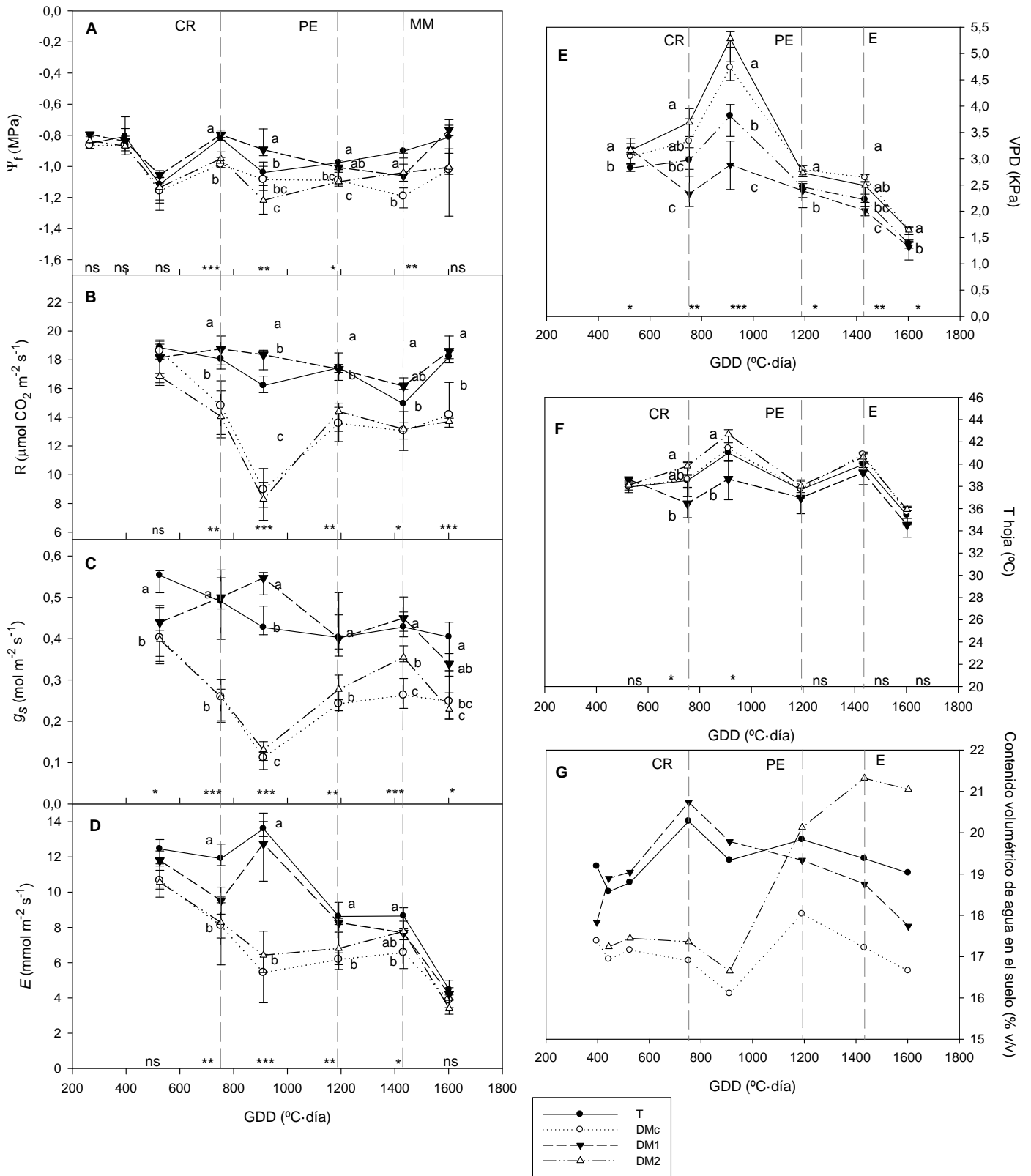


Figura V.3: Evolución estacional durante **2010 a mediodía solar** de (A) potencial hídrico foliar (ψ_f); (B) fotosíntesis (A; $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); (C) conductancia estomática (gs; $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); y (D) transpiración (E; $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Condiciones ambientales medidas a mediodía de los días que se realizaron las medidas fisiológicas: (E) déficit de presión de vapor (VPD; KPa), (F) temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), (G) contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v). Las líneas verticales indican los estados fenológicos (C = Cuajado; CR = Cierre de Racimos; PE = Pre-Envero y MM = Mitad de Maduración). Barras verticales muestran el error estándar de la media.

En **2011** desde cuajado se empezaron a diferenciar los contenidos volumétricos de agua en el suelo, plantas regadas frente a plantas no regadas. Esta diferencia quedó reflejada en el estado hídrico de la planta mediante el potencial hídrico foliar ψ_f medido al mediodía solar ($T = -0,86 \text{ MPa}$ vs $\text{DM}_c = -1,05 \text{ MPa}$), condicionando los parámetros fisiológicos de la planta.

El tratamiento de déficit ligero (T) alcanzó tasas fotosintéticas de $19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a mediodía solar en cuajado; y a partir de aquí comenzó a disminuir lentamente a lo largo del ciclo, hasta que alcanzó un valor de $11 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ próximo a vendimia. La tasa de transpiración de T evolucionó pareja a la fotosíntesis, en cuajado la transpiración es de $9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ descendiendo hasta $5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a final de maduración. Sin embargo, la conductancia estomática se vio altamente influenciada por las condiciones del medio; en la medida realizada en pre-envero existió un descenso de la temperatura del aire junto con la disminución del VPD. Esto hizo que los estomas se abrieran alcanzando la máxima conductancia estomática del ciclo, ($\sim 0,500 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), disminuyendo bruscamente antes de vendimia. Debido a las altas temperaturas ($T > 40^{\circ}\text{C}$) y elevado VPD ($4,2 \text{ KPa}$) la planta cerró estomas sin llegar a afectar a la asimilación de CO_2 , dado que la planta estaba hidratada ($\psi_f > -1,2 \text{ MPa}$).

Por otro lado el tratamiento DM_c (déficit moderado continuo) donde el agua es un factor limitante para la planta ($\psi_f < -1,2 \text{ MPa}$; desde el desarrollo de la baya) mantuvo tasas fotosintéticas menores ($13,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en cuajado; $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en vendimia) y menos oscilantes, acorde con el estado hídrico del suelo y de la planta a lo largo del ciclo. El cierre estomático y la transpiración siguieron la misma tendencia que la asimilación de CO_2 .

El tratamiento de déficit moderado a partir de pre-envero (DM_1), se comportó antes del cambio de riego igual que el tratamiento de déficit ligero (T). Y a partir del cambio la conductancia estomática y la transpiración disminuyeron bruscamente (84% en gs y 54% en E), sin embargo el nivel hídrico de la planta se mantuvo junto con la tasa fotosintética, hasta la aparición de condiciones medioambientales extremas, cuando ambos parámetros se desplomaron ($\psi_f = -1,58 \text{ MPa}$; $A_n = 10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Por último, el tratamiento DM₂, déficit moderado hasta pre-envero, al principio se desarrolló igual que DM_c hasta que empezó el riego. En ese momento la tasa fotosintética cambió bruscamente alcanzando valores de 13,5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; efecto que no quedó reflejado en el comportamiento estomático ni en la tasa de transpiración de las plantas. El nivel hídrico de la planta aumentó al recibir agua, aumentando el potencial hídrico hasta valores de -1,3 MPa.

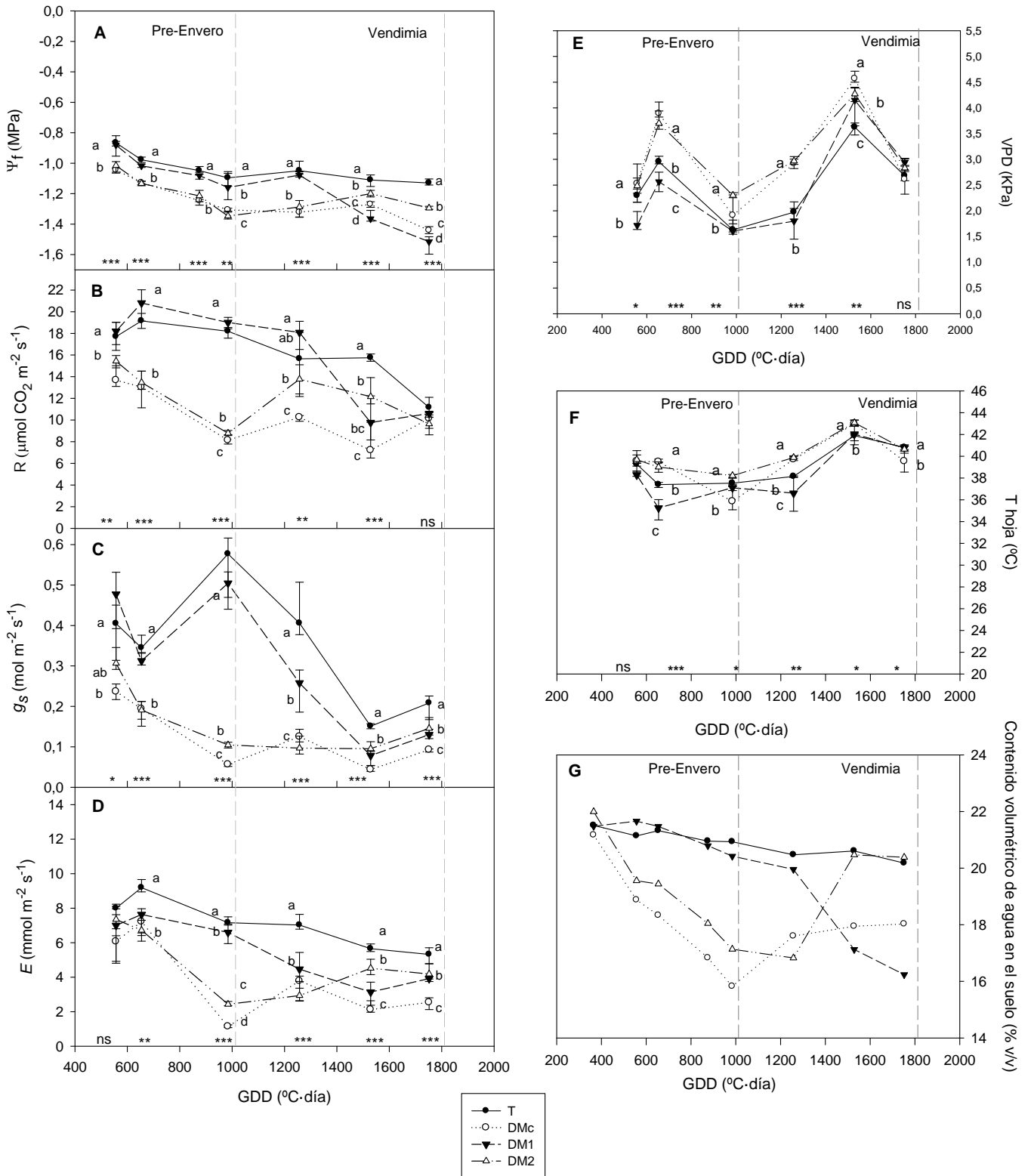


Figura V.4: Evolución estacional durante 2011 a mediodía solar de (A) potencial hídrico foliar (Ψ_f); (B) fotosíntesis (R ; $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); (C) conductancia estomática (g_s ; $\text{gs}\cdot\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); y (D) transpiración (E ; $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Condiciones ambientales medidas a mediodía de los días que se realizaron las medidas fisiológicas: (E) déficit de presión de vapor (DPV; KPa), (F) temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), (G) contenido volumétrico de agua en el suelo (% v/v). Las líneas verticales indican los estados fenológicos (Pre-Envero y Vendimia). Barras verticales muestran el error estándar de la media.

V.4.2 INFLUENCIA DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA EN EL INTERCAMBIO GASEOSO EN EL PERIODO ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO.

En los dos años de estudio se realizó un seguimiento quincenal de la fisiología de la cepa desde cuajado hasta vendimia, dónde se midió, como se ha explicado anteriormente, el comportamiento fisiológico de la cepa a media mañana, al mediodía solar y por la tarde (datos no mostrados). Para el desarrollo de este apartado se ha optado por estudiar la hora más desfavorable del día, al mediodía solar, por ser limitante en las condiciones medioambientales para la planta.

Las temperaturas medias diarias del ambiente en los días de medida estuvieron comprendidas entre 22,3 y 24,9 °C, con máximas entre 29,1 y 32 °C, y mínimas entre 12,7 y 17,2 °C. La humedad relativa media diaria estuvo comprendida entre 37,6 y 68,1 %. A esta variabilidad climática hay que sumarle la provocada por el paso del tiempo dentro del ciclo entre cuajado y maduración (GDD₁₀ entre 396 y 1602). Bajo déficit hídrico moderado se analizó la respuesta fisiológica de las hojas a diferentes demandas atmosféricas e hidratación de las plantas. La variabilidad comentada anteriormente provocó que el déficit de presión de vapor entre la hoja y el aire estuviese comprendido entre 1,0 y 4,5 KPa, el potencial hídrico foliar entre -0,7 y -1,6 MPa, la conductancia estomática entre 0,050 y 0,600 mol H₂O·cm⁻²·s⁻¹, y la asimilación neta de CO₂ entre 7 y 20 μmol CO₂·cm⁻²·s⁻¹.

En la figura V.5 se observa una correlación entre g_s y A_n , que se ajusta a una función curvilínea. En la figura se diferencian los valores de pre-envero frente a los valores de pos-envero.

En pre-envero la apertura estomática alcanzó su máximo en plantas sin déficit (T y DM₁), valores superiores a 0,400 mol H₂O·cm⁻²·s⁻¹. Se observó que a partir de una conductancia estomática de 0,300 mol H₂O·cm⁻²·s⁻¹ la hoja no aumentó su tasa fotosintética. En definitiva, la asimilación de CO₂ aumentó con la conductancia estomática hasta una asimilación máxima, a partir de la cual se mantuvo independientemente de la apertura estomática. Las asimilaciones de las hojas en pos envero fueron inferiores en los tratamientos sometidos a déficit.

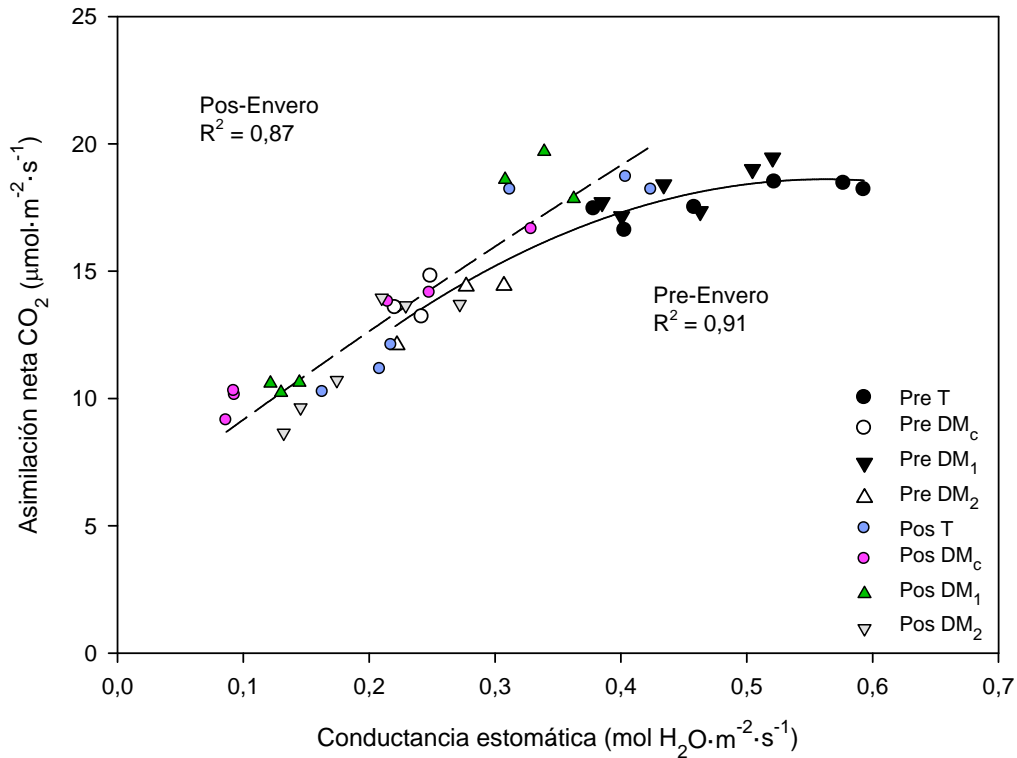


Figura V.5: Relación entre la conductancia estomática y la asimilación neta de CO₂ para los diferentes tratamientos; en pre-enero (línea continua; $p < 0,001$; $R^2 = 0,91$), en pos-enero (línea discontinua; $p < 0,001$; $R^2 = 0,87$).

El potencial hídrico foliar afectó de forma diferente a la asimilación neta de CO₂ antes y después del riego (pre-enero vs. pos-enero). En pre-enero la relación se ajustó a una función cuadrática con el máximo para $\psi_f = -1,0$ MPa.: la fotosíntesis aumentó al disminuir ψ_f hasta $-1,0$ MPa y disminuyó para $\psi_f < -1,0$ MPa. En pos-enero la relación entre la asimilación neta de CO₂ y ψ_f se ajustó también a una función cuadrática con el máximo para $\psi_f = -0,85$ MPa, y disminuyó para valores de ψ_f inferiores; además, se obtuvo un mejor coeficiente de correlación en pos-enero ($R^2 = 0,80$).

La relación entre el potencial hídrico foliar y la conductancia estomática se ajustó a una función lineal creciente tanto en pre como en pos-enero, pero con pendientes diferentes. Se obtuvo mejor coeficiente de correlación en pos-enero ($R^2 = 0,72$).

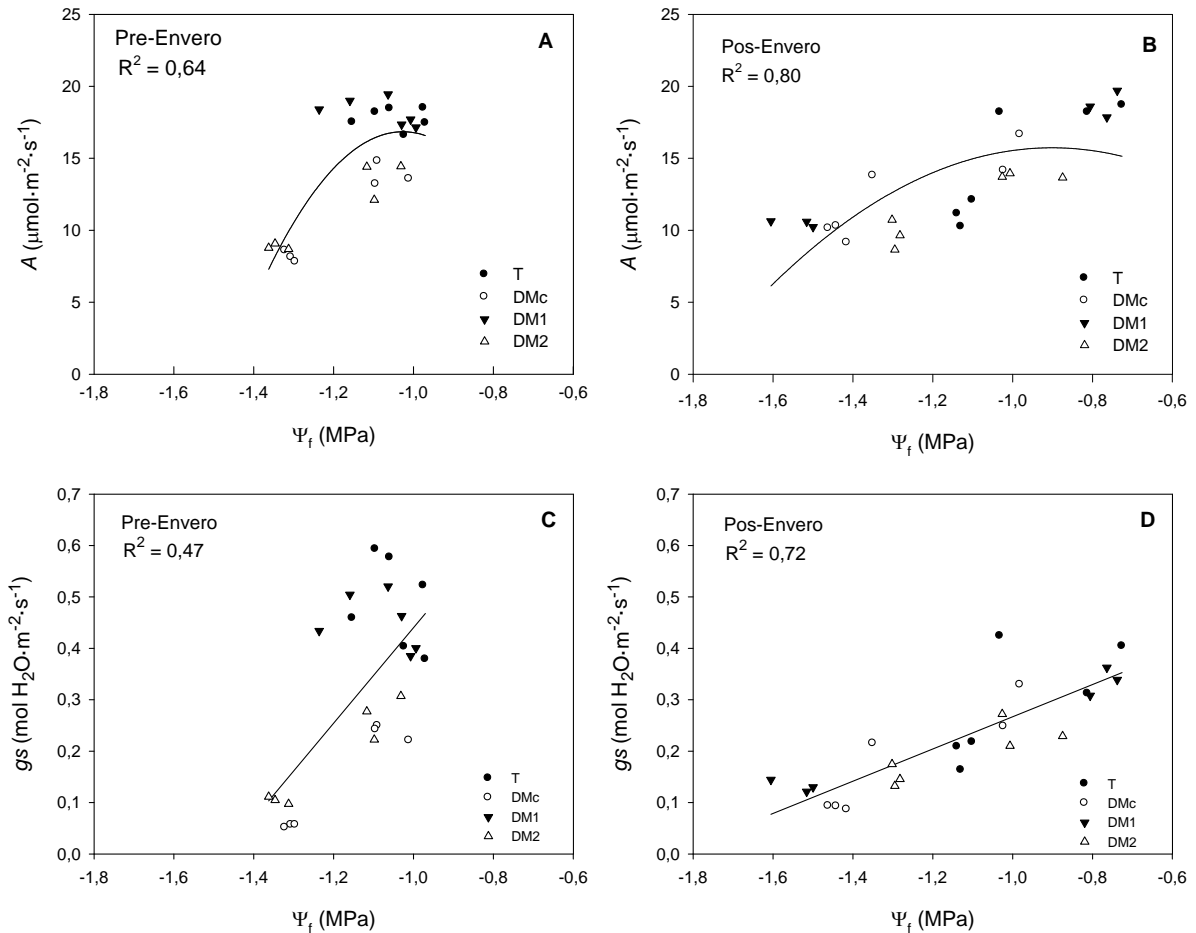


Figura V.6: Relación entre el potencial hídrico foliar medido al mediodía solar y la asimilación neta de CO₂ (gráficos A y B) y la conductancia estomática (gráficos C y D) en pre-enero (gráficos A y C) y pos-enero (gráficos B y D).

La eficiencia en el uso del agua es la relación entre la asimilación neta de CO₂ y la transpiración (An/E) o la conductancia estomática (An/g_s) (Medrano *et al.* 2006), denominadas eficiencia en el uso del agua intrínseca ($WUE_i = An/g_s$) y eficiencia instantánea en el uso del agua ($WUE = An/E$).

La eficiencia en el uso del agua intrínseca (WUE_i) fue menor a medida que g_s aumentó desde 0,030 hasta 0,100 mol H₂O·m⁻²·s⁻¹, en pre-enero y de 0,050 hasta 0,120 mol H₂O·m⁻²·s⁻¹, en pos-enero.

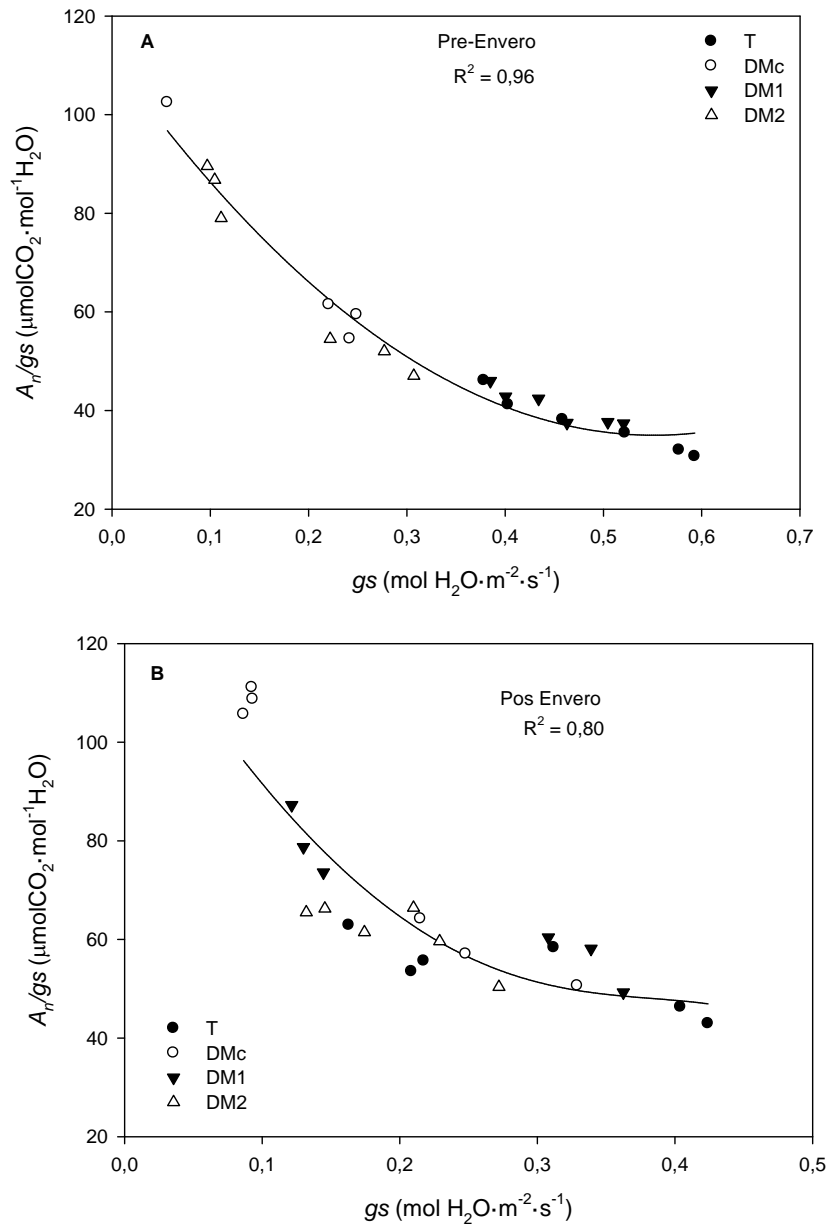


Figura V.7: Relación entre la conductancia estomática (g_s) y la eficiencia en el uso del agua (A_n/g_s) para pre-enero (A; $y = 25,433 x^{-0,545}$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,96$) y pos-enero (B; $y = 29,072 x^{-0,494}$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,80$), para los 4 tratamientos. Cada punto es el promedio de la medición de los parámetros fisiológicos en 6 hojas.

La conductancia estomática afectó de manera similar a la eficiencia en el uso del agua (WUE) en pre y pos-enero, la relación se ajustó a una función cuadrática con el mínimo para $g_s = 0,30 \text{ mol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en pre-enero y $g_s = 0,35 \text{ mol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en pos-enero. El coeficiente de correlación fue mayor en pre-enero ($R^2 = 0,60$) que en pos-enero ($R^2 = 0,23$).

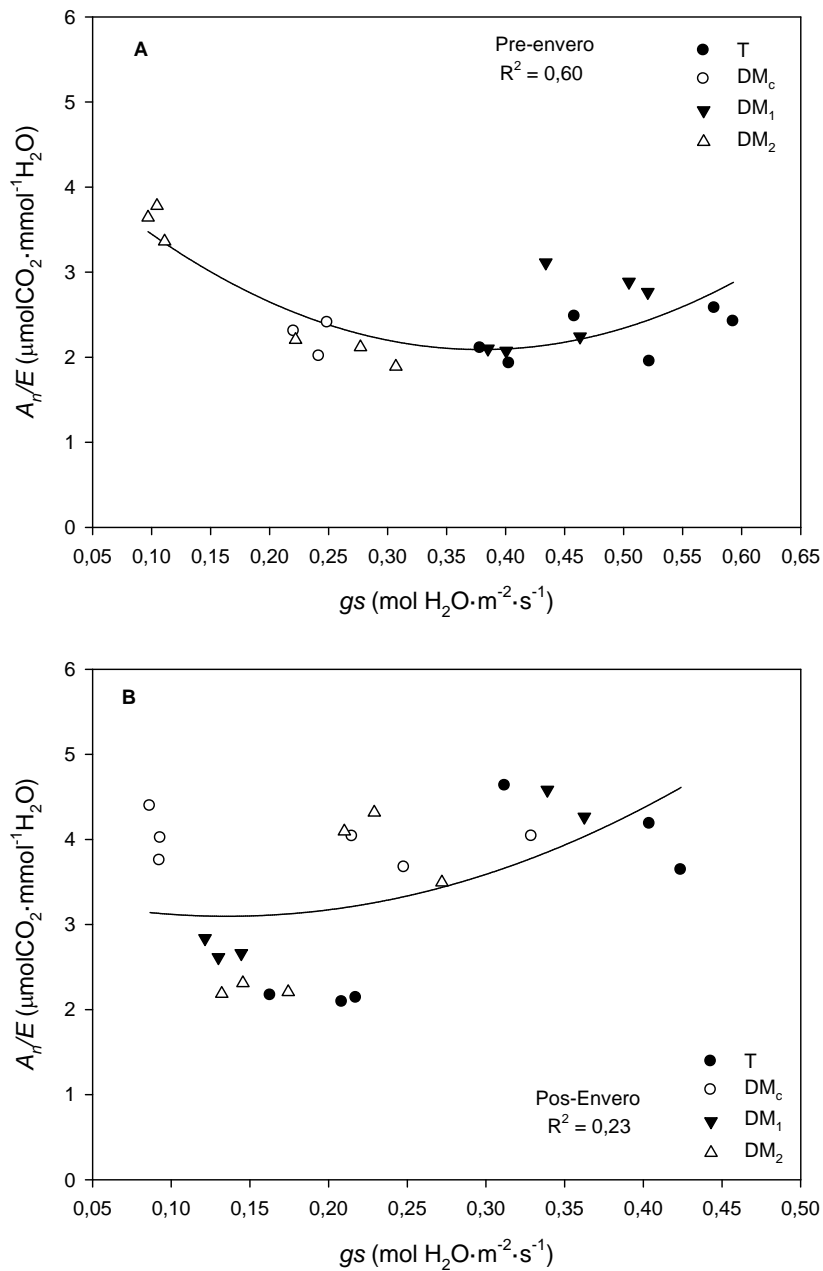


Figura V.8: Relación entre la conductancia estomática (g_s) y la eficiencia intrínseca en el uso del agua (A_n/E) para pre-envero (**A**; $y = 38,73 x^2 + 25,28 x$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,60$) y pos-envero (**B**; $R^2 = 0,23$), para los 4 tratamientos. Cada punto es el promedio de la medición de los parámetros fisiológicos en 6 hojas.

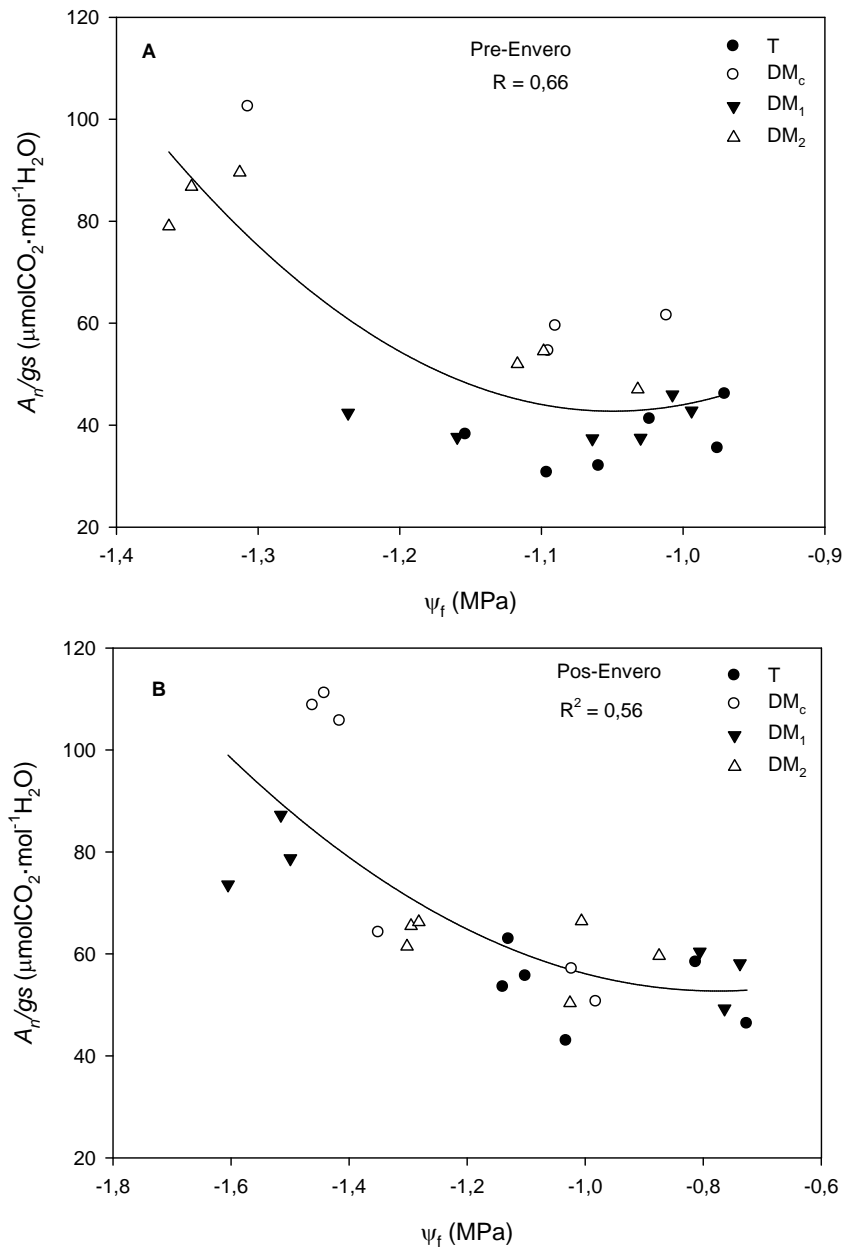


Figura V.9: Relación entre el potencial hídrico foliar (ψ_f) y la eficiencia en el uso del agua (A_n/g_s) para pre-enero (A; $y = 517,85 x^2 + 1087,1 x + 613$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,66$) y pos-enero (B; $y = 67,14 x^2 + 104,07 x + 93,06$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,56$), para los 4 tratamientos. Cada punto es el promedio de la medición de los parámetros fisiológicos en 6 hojas.

El potencial hídrico foliar afectó a la eficiencia intrínseca en el uso del agua (WUE_i) tanto en pre como en pos-enero, independientemente de la estrategia de riego utilizada. La relación se ajustó a una función cuadrática y el coeficiente de correlación fue mayor en pre-enero ($R^2 = 0,66$).

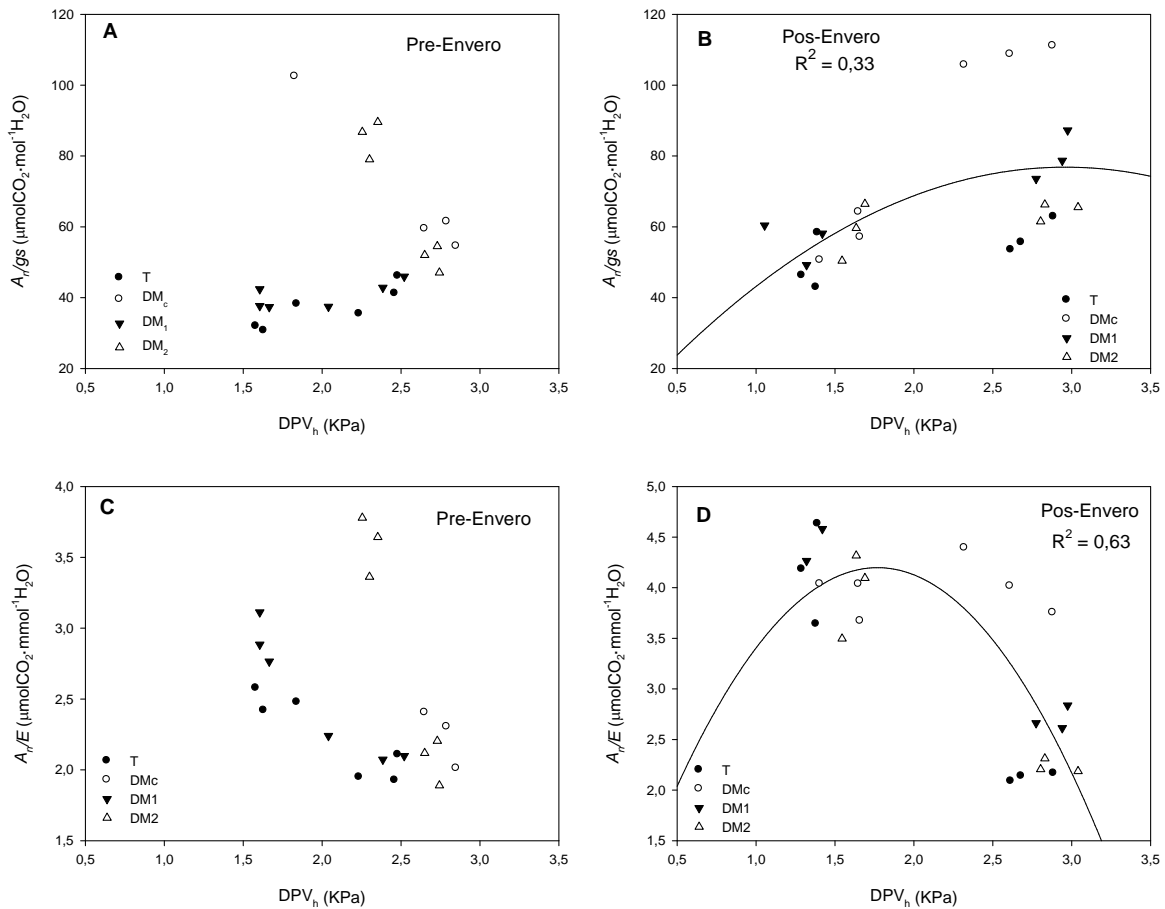


Figura V.10: Relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la eficiencia en el uso del agua (A y B; An/g_s) y la eficiencia intrínseca en el uso del agua (C y D; An/E) para pre-envero (A y C) y pos-envero (B; $y = -8,77 x^2 + 51,93 x$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,33$ y D; $y = -1,34 x^2 + 4,74$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,63$), para los 4 tratamientos. Cada punto es el promedio de la medición de los parámetros fisiológicos en 6 hojas.

Se estudio la variación de WUE_i y WUE en función de DPV, en pre-envero no existe relación alguna, sólo en pos-envero. WUE_i se ajusta a una función cuadrática con su máximo en 3,0 KPa y con un coeficiente de relación bajo $R^2 = 0,33$.

La eficiencia en el uso del agua (An/E) se ajustó a una relación cuadrática con el déficit de presión de vapor, la eficiencia aumenta al aumentar el DPV, hasta un valor de 1,7 KPa, a partir del cual la eficiencia intrínseca en el uso del agua disminuye a medida que aumenta el déficit de presión de vapor.

V.5 DISCUSIÓN.

Evolución de los parámetros fisiológicos

El comportamiento fisiológico de la planta depende de múltiples factores, entre ellos la disponibilidad de agua en el suelo, el microclima del canopy (luz, temperatura y humedad relativa), el efecto de los sumideros, la genética, la edad y el tipo de hojas (Sánchez de Miguel 2007).

Dada la importancia que tiene la disponibilidad hídrica de la planta en la productividad y en la eficiencia en el uso de agua en climas cálidos, es imprescindible estudiar el efecto del déficit hídrico en los procesos fisiológicos de la planta.

Diferentes autores han observado que la fotosíntesis se ve reducida con el estrés hídrico, estas reducciones en la capacidad fotosintética han sido ampliamente referenciadas. Schultz (2003), con medidas a lo largo del ciclo en Syrah y Garnacha, obtiene valores de $A_{máx}$ entorno a $12-16 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ cuando ψ a medio día solar fue mayor de $-1,0 \text{ MPa}$, con valores de $g_{s_{max}}$ entre $0,200 - 0,250 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Cuando ψ caía por debajo de $-1,1 \text{ MPa}$, se reducía $A_{máx}$ a $3-12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y $g_{s_{max}}$ a $0,50 - 0,200 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. En Sauvignon Blanc (Naor et al., 1997), A se situaba entre $10- 12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y g_s entre $0,200-0,300 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, cuando el potencial hídrico de tallo fue mayor que $-1,0 \text{ MPa}$. Por debajo de dicho potencial, la asimilación era de $7 - 8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y la g_s de $0,150 - 0,200 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

En nuestro estudio, se observó la evolución de los parámetros fisiológicos a media mañana, desde cuajado hasta vendimia. Al principio no aparecieron diferencias entre plantas regadas y no regadas, ya que existía suficiente agua en el suelo para soportar la demanda de la planta y de la atmósfera. Y a medida que se fue agotando la reserva de agua en el suelo, se fue diferenciando la asimilación de CO_2 en función del riego (plantas regadas vs plantas no regadas). Disminuyendo la tasa fotosintética un 22 % en 2010 y 37 % en 2011, así como la conductancia estomática (78 % 2011).

Después del cambio de riego, a media mañana, la tasa fotosintética aumentó un 7 % y un 26 % la abertura estomática, en DM_2 (total disponibilidad hídrica a partir de pre-verno). Pero no se llegó a igualar la actividad fotosintética con aquellas plantas que tuvieron total disponibilidad hídrica durante todo el ciclo (T).

A mitad de maduración disminuye la tasa fotosintética, en parte, debido al cierre estomático generado por las altas temperaturas del aire y el elevado déficit de presión de vapor, pero al final del ciclo la inhibición no estomática de la fotosíntesis se

intensifica por el aumento gradual del déficit hídrico en el suelo. Esto coincide con Chaves (1986) que dice que en las especies adaptadas a la sequía, la limitación estomática es la principal causa de la mayoría de las reducciones fotosintéticas observadas; y con Lopes et al. (1999) que opinan que, hasta en climas mediterráneos, la asimilación está afectada principalmente por efectos estomáticos en la etapa de maduración. Escalona et al. (1999), por su parte, afirman que el 80% de las variaciones de A se pueden explicar por variaciones en la conductancia estomática.

Diversos trabajos concluyeron que el cierre estomático se intensifica, afectando a la actividad fotosintética, para valores de potencial hídrico inferiores a $-1,0$ ó $-1,1$ MPa (Sánchez-de-Miguel 2007). De acuerdo con los valores de conductancia estomática medidos, en general, las plantas de los tratamientos DM_c (déficit moderado continuo) y DM_2 (déficit moderado hasta pre-enero) estuvieron, desde antes del cambio de riego hasta el final de la maduración, en situación de déficit hídrico al mediodía solar. En la mayor parte de las medidas, la conductancia estomática tuvo unos valores entre $0,050$ y $0,150 \text{ mol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, lo que según Medrano et al. (2002) corresponde para la vid a una situación de sequía moderada en la que predominan los efectos estomáticos en el control de la fotosíntesis.

El estrés hídrico afecta a la fotosíntesis vía estomática y no estomática, esto es, el estrés hídrico provoca cambios en la conductancia estomática, que determinan la resistencia a la difusión del CO_2 al interior de la planta, y en el aparato fotosintético del cloroplasto (Matthews, 2004), que determinan la utilización del CO_2 y de la energía luminosa.

Las regulaciones estomáticas son las responsables, en primer grado, del balance de CO_2 y transpiración de la hoja (Düring, 1987). Generalmente, el cierre estomático de la vid se asocia a valores de ψ_f entre $-1,1$ y $-1,6$ MPa (Zufferey, 2000), dependiendo de las condiciones atmosféricas y del modo de imposición del estrés hídrico. Por tanto, la viña responde a los déficit hídricos cerrando los estomas para reducir las pérdidas por transpiración durante los periodos de elevada demanda atmosférica (Escalona, 2003, Williams et al., 1994, Düring et al., 1996) para evitar deshidrataciones.

Sin embargo, y según Medrano et al. (2002), los valores de g_s que son inferiores a $0,050 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, indican que existen efectos no estomáticos en la reducción de A . En el mismo sentido, Cuevas et al. (2006) indican que cuando el estrés hídrico es muy intenso ($g_s < 0,050 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, y potencial mátrico del suelo de $-0,4$ MPa), A es muy baja.

Las respuestas fotosintéticas al estrés hídrico, que se encontró en maduración, fue a corto plazo y vía estomática, es decir, la hoja utilizó el cierre estomático como herramienta de defensa frente a la limitación hídrica para mantener el estatus hídrico de la planta (Schultz, 1996). Esto provocó reducciones en la asimilación de CO₂, de forma significativa para valores ψ inferiores a -1,1 MPa. En nuestro ensayo a mediodía solar el potencial hídrico de la planta fue inferior a -1,1 MPa justo antes del cambio de riego en los tratamientos con déficit moderado continuo (DM_c) y déficit hasta pre-envero (DM₂), disminuyó la conductancia estomática hasta valores de 0,050 – 0,070 mol·m⁻²·s⁻¹) viéndose afectada la fotosíntesis, que disminuyó un 43 %.

Por otro lado, al mediodía solar, las plantas regadas alcanzaron conductividades estomáticas altas ($g_s > 0,300 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) debido a la buena hidratación de la planta ($\psi > -1,1$). Siendo, la conductancia estomática, ampliamente influenciada por las condiciones del medio, es decir, cuando $g_s > 0,300 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ la regulación estomática dependió más de las condiciones del medio que del estado hídrico de la planta; por ejemplo, en la medida realizada en pre-envero existió un descenso de la temperatura del aire junto con la disminución del DPV, lo que hizo que los estomas se abrieran alcanzando la máxima conductancia estomática del ciclo, ($\sim 0,500 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), y disminuyendo antes de vendimia, debido a las altas temperaturas ($T > 40^\circ\text{C}$) y elevado DPV (4,2 KPa) cerrando estomas pero sin llegar a afectar a la asimilación de CO₂, ya que, la planta estaba hidratada ($\psi > -1,2 \text{ MPa}$).

Generalmente, la vid ha sido considerada una especie anisohídrica (Soar et al., 2006), de manera que con la imposición del estrés hídrico, que reduce ψ , se inician los mecanismos de control de la abertura estomática pero con un comportamiento “optimista” que hace que la reducción de g_s sea ligera y la caída de ψ sustancial al aumentar el déficit de agua en el suelo. Sin embargo, el grado de “optimismo” varía entre cultivares debido a diferencias en la conductividad hidráulica (Schultz et al., 2003), y del control ejercido por hormonas como el ABA (Soar et al., 2006). En este trabajo, los resultados hacen pensar que el Cabernet Sauvignon se comporta con un cierto carácter anisohídrico; utilizando todo el agua disponible para su crecimiento y fisiología, a la espera de que el nivel de agua se mantenga a lo largo del ciclo, pudiendo llegar a comprometer su supervivencia frente al agotamiento de la humedad del suelo. Es el caso del tratamiento de total disponibilidad hídrica ($k_c = 0,6$) hasta envero y a partir de aquí se le somete a déficit hídrico ($k_c = 0,3$), que actúa igual que el tratamiento de total disponibilidad hídrica (T), y al someterle a un déficit hídrico moderado, no cierra estomas, y el nivel hídrico de la planta se mantiene junto con la tasa fotosintética, hasta que aparecen condiciones medioambientales extremas, dónde

ambos parámetros disminuye ($\psi_f = -1,58$ MPa; $A_n = 10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Las plantas típicas anisohídricas exhiben pérdidas en el control estomático a través de la demanda evapotranspirativa y la humedad del suelo, permitiendo grandes fluctuaciones en el ψ_f (Franks *et al.*, 2007).

Ante una sequía progresiva, se produce un progresivo cierre estomático que, a su vez, provocará una reducción de la fotosíntesis. Sin embargo, la conductancia estomática no está únicamente controlada por la disponibilidad hídrica del suelo, ya que existe una compleja interacción entre los factores intrínsecos y extrínsecos de la hoja (Medrano *et al.*, 2002).

Influencia del estado hídrico de la planta en el intercambio gaseoso en el periodo anterior y posterior al envero.

La relación entre g_s y A_n fue similar a la encontrada en otros trabajos como Cuevas *et al.* 2006, con cv. Tempranillo; Gómez del Campo *et al.*, 2007 con cv. Airen y cv. Chardonnay; Romero *et al.*, 2011 con cv. Monastrel.

La estrategia de riego influyó en la relación entre A_n y g_s , para valores de $g_s > 0,300 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, la asimilación de CO_2 se mantuvo en un máximo ($A_n = 18 - 20 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Sin embargo para $g_s < 0,300 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, se encontró que para valores similares de g_s , A_n fue mayor en pre-envero que en pos-envero.

En circunstancias de déficit hídrico, los factores esenciales que intervienen en la regulación estomática son el contenido de agua en el suelo (Williams *et al.* 1994), la demanda atmosférica (Düring 1987), el ácido abscísico (Loveys 1984) y el potencial hídrico foliar (Naor y Bravdo 2000).

El potencial hídrico, de la hoja (ψ_f) o del tallo (ψ_s), son quizás los indicadores del estado hídrico más utilizados, aunque algunos autores cuestionan su validez (Cifre *et al.* 2005). Williams y Araujo (2002) pusieron de manifiesto la disparidad de opiniones presentes en la bibliografía sobre qué tipo de potencial (hoja o tallo) y qué momento del día reflejan mejor el estado de la planta. Estos autores concluyeron que cualquiera de los métodos estudiados (potencial hídrico foliar medido antes de amanecer, al mediodía, o potencial hídrico del tallo medido al mediodía) eran igualmente válidos. En nuestro estudio se eligió el potencial hídrico foliar al mediodía solar como parámetro representativo del estado hídrico de la vid porque se observó que al medio día solar el potencial hídrico foliar era el más bajo debido a las condiciones extremas.

Nuestros resultados muestran que tanto g_s como An respondieron de forma diferente al ψ en función de la estrategia de riego. En pre-verano y pos-verano g_s está altamente correlacionada con ψ de tal forma que la relación entre ambas variables se ajustó a una función lineal ascendente, con pendientes diferentes. En pre-verano la pendiente fue más pronunciada, obteniendo para valores de $\psi = -1,0$ MPa, conductancias mayores en plantas regadas $g_s > 0,300$ mol $H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, que plantas no regadas $g_s < 0,300$ mol $H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. En las condiciones de este estudio, con limitada disponibilidad hídrica, en situación de **baja demanda atmosférica** (pre-verano), valores más altos de ψ se correspondieron con g_s superiores, indicando una mayor disponibilidad hídrica y un mayor intercambio gaseoso, hasta valores de $\psi < -1,2$ MPa, a partir de los cuales el ψ fue el responsable del cierre estomático. Sin embargo, en situación déficit hídrico moderado y una **alta demanda atmosférica** (pos-verano), también los valores más altos de ψ se correspondieron con g_s superiores. Pero en esta situación, no se alcanzó un valor de ψ que regulase drásticamente la apertura estomática.

Además, g_s es más sensible al estrés hídrico de leve a moderado ($\psi > -1,4$ MPa) que la fotosíntesis y la transpiración, valores similares obtuvieron Romero *et al.*, 2011 con cv. Monastrel.

Por otro lado, la actividad fotosintética está altamente relacionada con el potencial hídrico foliar, describiendo una función cuadrática negativa en pre y pos-verano. Con su máximo en $-1,1$ MPa en pre-verano y $-0,9$ MPa en pos-verano, esto indica que en condiciones menos extremas (pre-verano) potenciales inferiores permiten seguir aumentando la tasa fotosintética. Y en condiciones más limitantes, con demandas atmosféricas superiores (en pos-verano), la tasa fotosintética comienza a disminuir a partir de potenciales mayores.

El análisis en el periodo de la vid del intercambio gaseoso y la relación entre g_s , An y ψ indica que el cierre estomático en respuesta al estrés hídrico ocurre antes de los cambios detectables en el ψ o en el contenido volumétrico de agua en el suelo. Esto sugiere que g_s es más precisa y sensible a los cambios en el estado hídrico de la planta que el potencial hídrico foliar o la humedad del suelo, cuando trabajamos bajo un déficit hídrico de leve a moderado, aplicado bajo RDI.

La respuesta de la asimilación neta de CO_2 al cambio en la abertura estomática y su relación (An/g_s o WUE_i) son objetivos fisiológicos potenciales para mejorar la productividad del agua. Ya que es un recurso limitado, sobretodo en la región mediterránea. Por lo que, es fundamental mejorar la eficiencia en el uso del agua por

el viñedo, al mismo tiempo que se regula el crecimiento vegetativo y el rendimiento para optimizar la calidad de la uva (Cifre *et al.* 2005).

Se estudiaron dos parámetros para evaluar la influencia de las condiciones ambientales y el estado hídrico de las plantas sobre la eficiencia en el uso del agua, la eficiencia intrínseca en el uso del agua (WUE_i , An/g_s) y la eficiencia en el uso del agua propiamente dicha (WUE , An/E).

En nuestro ensayo, WUE_i aumentó a medida que g_s fue menor en pre y pos-envero, de la misma forma que en otros trabajos (Cuevas *et al.* 2006, Medrano *et al.* 2006, Junquera 2011). En este sentido y con el objetivo de mejorar la eficiencia en el uso del agua, Cifre *et al.* (2005) propusieron que debe aplicarse riego cuando g_s baje de un umbral situado entre 0,100 y 0,050 mol $H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

La estrategia de riego influyó en la relación entre g_s y WUE_i . En pos-envero para valores de g_s similares, WUE_i fue menor cuando el agua de riego aplicado fue mayor. Como consecuencia, en pre y pos-envero existió un incremento considerable en An/g_s y An/E en cepas sometidas a déficit hídrico controlado para determinados valores de ψ_f y g_s . WUE_i aumentó cuando ψ_f estuvo entre -1,3 y -1,4 MPa en pre-envero y -1,4 y -1,6 en pos-envero. Cómo se ha demostrado anteriormente por (Costa *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2011). Y cuando g_s estuvo entre 0,100 y 0,150 mol $\cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, independientemente del momento fenológico.

DPV también tuvo una influencia importante en la respuesta de WUE_i y WUE a la estrategia de riego en la maduración de la baya. Mientras que WUE_i aumenta a medida que DPV aumenta hasta alcanzar un valor de 3 KPa, para luego disminuir, sin embargo WUE alcanza su máximo valor para un valor DPV = 1,5 KPa.

V.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Cifre, J., J. Bota, J.M. Escalona, H. Medrano, J. Flexas. 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.) An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106: 159-170.
- Costa JM., F. Ortuño, M. Chaves. 2007. Deficit irrigation as strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology*. 49:1421–1434.
- Cuevas, E., P. Baeza and J. R. Lissarrague 2006. Variation in stomatal behaviour and gas exchange between mid-morning and mid-afternoon of north-south oriented grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo) at different levels of soil water availability. *Scientia Horticulturae* 108: 173-180.
- Düring, H. 1987. Stomatal responses to alterations of soil and air humidity in grapevines. *Vitis* 26: 9-18.
- Düring, H. and B. R. Loveys 1996. Stomatal patchiness of field-grown sultana leaves: diurnal changes and light effects. *Vitis* 35(1): 7-10.
- Esteban, M.A., M.J. Villanueva, J.R. Lissarrague. 1999. Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugar, organic acids, and mineral elements. *Am. J. Enol. Vitic.* 50: 418-434.
- Escalona, J. M. 2003. Respuestas de la vid frente al déficit hídrico: efectos sobre la fotosíntesis y la transpiración en hoja y en planta entera y su repercusión en la calidad del fruto. Tesis Doctoral. Facultad de Ciències de la Universitat de les Illes Balears. Mallorca: 193.
- Franks, P.J., P.L. Drake, and R.H. Froend. 2007. Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. *Plant Cell Envir.* 30:19-30.
- Ginestar, C., J. Eastham, S. Gray and P. Iland 1998. Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of Shiraz grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* 49(4): 421-428.
- Gómez del Campo, M. V. 1998. Mecanismos de adaptación a sequía en la vid. Evaluación del consumo de agua, crecimiento y desarrollo vegetativo, productividad y eficiencia en el uso del agua de cuatro genotipos de vid. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Producción Vegetal: Fitotecnia. Universidad Politécnica de Madrid: 383.
- Junquera, P. 2011. Influencia de la distancia entre filas y de la densidad de pámpanos en el aprovechamiento de los recursos ambientales y en la respuesta del cv. Tempranillo (*Vitis Vinifera* L.), conducido en espaldera con riego deficitario. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Lawlor, D. 2002. Limitation to Photosynthesis in Water-stressed Leaves: Stomata vs. Metabolism and the Role of ATP. *Annals of Botany* 89: 871-885.

- Linares, R., P. Baeza, J.R. Lissarrague. 2007. El potencial hídrico foliar. En fundamentos, aplicación y consecuencias del riego en la vid. Baeza et al. (Eds.), pp. 35-45. Editorial Agrícola Española, Madrid, España.
- Lopes, C.M.A. 1999. Relationships between leaf water potential and photosynthetic activity of field-grown grapevines under a mediterranean environment. *Acta Horticulturae* 493: 287-292.
- Loveys, B. R. and H. Düring. 1984. Diurnal changes in water relations and abscisic acid in field-grown *Vitis vinifera* cultivars. II. Abscisic acid changes under semiarid conditions. *New Phytologist* 97: 37-47
- Matthews, M. A. 2004. Growth and physiology of the grapevine. *Viticulture & Enology* 110. University of California, Davis.: 67-79.
- Matthews, M. and M. Anderson. 1989. Fruit reproductive development in grape (*Vitis vinifera* L.) responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 40(1): 52-59
- Medrano, H., J. M. Escalona, J. Bota, J. Gulías and J. Flexas. 2002. Regulation of Photosynthesis of C3 Plants in Response to Progressive Drought: Stomatal Conductance as a Reference Parameter. *Annals of Botany* 89: 895-905.
- Medrano, H., J.M. Escalona, J.Cifre, J. Bota, J. Flexas. 2003. A ten-year study on the physiology of grapevines cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Funct. Plant Biol.* 30: 607-619.
- Medrano, H., J. Bota, J.M. Escalona, M. Ribas-Carbó, J. Flexas, J. Gulias. 2006. Variability of intrinsic water use efficiency in mediterranean grapevines. *Progès Agricole et Viticole* 123: 112-117.
- Naor, A., B. Bravo and J. Gelobter. 1994. Gas exchange and water relations in field-grown Sauvignon blanc grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 45(4): 423-428.
- Naor, A., Bravo, B. and Gal, Y. 1997. Crop load affects assimilation rate, stomatal conductance, stem water potential and water relations of field-grown Sauvignon blanc grapevines. *Journal of Experimental Botany* 48(314): 1675-1680.
- Naor A., B. Bravdo. 2000. Irrigation and water relations interactions in grapevines. *Acta Horticulturae* 526: 109-113.
- Plant, R.E., R.D. Horrocks, D.W. Grimes, and L.J. Zelinski. 1992. CALEXICotton: an integrated expert system application for irrigation scheduling. *Trans. Amer. Soc. Agricult. Engineers* 35:1833-1838.
- Romero, P., J.I. Fernández-Fernández, A. Martínez-Cutillas. 2010. Physiological thresholds for efficient regulated deficit-irrigation management in winegrapes grown under semiarid conditions. *Am. J. Enol. Vitic.* 61:3 (300-312).
- Sánchez-de-Miguel, P. 2007. Producción y distribución de fotoasimilados en la vid (*Vitis vinifera* L.) durante el periodo de maduración. Cambios en la respuesta fotosintética a la luz de las hojas por factores biológicos, ambientales y culturales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

- Schultz, H. R., W. Kiefer and W. Gruppe. 1996. Photosynthetic duration, carboxylation efficiency and stomatal limitation of sun and shade leaves of different ages in field-grown grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Vitis* 35(4): 169-176.
- Schultz, H. R. 2003. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment* 26: 1393-1405.
- Soar, C. J., J. Speirs, S. M. Maffei, A. B. Penrose, M. G. McCarthy and B. R. Loveys 2006. Grape vine varieties Shiraz and Grenache differ in their stomatal response to VPD: apparent links with ABA physiology and gene expression in leaf tissue. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 12(1): 2-12.
- von Caemmerer S, Farquhar GD. 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153: 376-387
- Williams, L.E., N.K. Dokoozlian, R. Wample. 1994. Grape. In *Handbook of environmental physiology of fruit crops. Vol I. Temperate crops.* B. Schaffer and P.C. Andersen (Eds.), pp. 85-133. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Williams, L.E., and P.J. Araujo. 2002. Correlations among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 127:448-454.
- Zamboni, M. ; Iacono, F. 1988 Etude des variations du potentiel osmotique et de l'élasticité cellulaire dans des vignes soumises à un stress hydrique . *Conn. Vigne Vin* 22, 241-249.
- Zufferey, V. 2000. Echanges gazeux des feuilles chez *Vitis vinifera* L. (cv. Chasselas) en fonction des paramètres climatiques et physiologiques et des modes de conduite de la vigne. Tesis Doctoral. Zurich, Ecole Polytechnique Fédérale: 335.

CAPÍTULO VI:

EFFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (*Vitis vinifera* L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO MODERADO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO EN EL CRECIMIENTO Y EN LA PRODUCTIVIDAD.

VI.1	RESUMEN.....	147
VI.2	INTRODUCCIÓN.....	148
VI.3	MATERIAL Y MÉTODOS.....	152
	VI.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ARQUITECTURA FOLIAR DE LA PLANTA.....	152
	VI.3.2 PESO DE COSECHA Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	155
	VI.3.3 PESO DE MADERA DE PODA E ÍNDICE DE RAVAZ.....	155
	VI.3.4 RELACIÓN VEGETATIVO/REPRODUCTIVO: HOJA/FRUTO.....	156
	VI.3.5 PRODUCTIVIDAD GLOBAL: MATERIA SECA.....	156
VI.4	RESULTADOS.....	158
	VI.4.1 CRECIMIENTO VEGETATIVO	158
	VI.4.2 EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ASIMILADOS EN EL PERIODO DE CRECIMIENTO Y MADURACIÓN DE LA BAYA.....	165
	VI.4.3 EFICIENCIA DE LA PLANTA EN FUNCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA.....	168
	VI.4.4 CRECIMIENTO VEGETATIVO, REPRODUCTIVO Y DISPONIBILIDAD HÍDRICA.....	170
VI.5	DISCUSIÓN.....	173
VI.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182

VI.1 RESUMEN.

Se estudió el efecto del déficit hídrico en los periodos anterior y posterior al envero sobre el desarrollo vegetativo y la productividad de la cepa en el cv. Cabernet Sauvignon cultivado en espaldera y con riego localizado.

Con este propósito se estudiaron cuatro tratamientos experimentales que consistieron en diferentes riegos deficitarios: déficit ligero (T), déficit moderado continuo (DM_c), déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁) y déficit moderado hasta pre-envero (DM₂), en los que se mantuvo el mismo número de pámpanos por metro de fila, en los dos años de estudio.

Se midió la superficie foliar total de los pámpanos principales y de los nietos, se calculó la superficie foliar expuesta. Se hizo el seguimiento del crecimiento del pámpano en el periodo activo de la vid. Se midió el peso fresco y seco de pámpanos, hojas, sarmientos, racimos y racimas, se contabilizó el número de pámpanos, racimos y bayas por racimos, sobre 10 plantas en cada repetición por tratamiento, con el fin de estudiar el crecimiento y la productividad de la planta.

El crecimiento y desarrollo foliar estuvo altamente influenciado por el estado hídrico de la planta. Existiendo diferencias estadísticas en la superficie foliar total desarrollada debidas al efecto de la disponibilidad hídrica sobre el desarrollo foliar de nietos. El crecimiento de los nietos estuvo condicionado principalmente por el volumen de agua aplicado.

Las diferencias encontradas en el rendimiento fueron debidas a las diferencias estadísticas existentes en el peso de la baya. Las cuales fueron debidas al momento de aplicación del déficit hídrico; ya que, en la etapa anterior al envero el déficit hídrico moderado aplicado fue más crítico para el rendimiento que el déficit impuesto en la madurez de la baya. Por otro lado, la fertilidad de las yemas, expresado como número de racimos por planta, no se vio afectada por el déficit hídrico impuesto en el periodo anterior y posterior al envero.

El peso de madera de poda por metro de fila fue superior a medida que aumentó el volumen de agua aplicado.

Y la productividad de materia seca se vio afectada por el déficit hídrico porque la biomasa dependió de la actividad fisiológica de la planta, la cual fue altamente dependiente de la disponibilidad hídrica.

VI.2 INTRODUCCIÓN

En zonas semiáridas los veranos se caracterizan por tener temperaturas altas, elevada demanda atmosférica y escasa o nula precipitación; ocasionando a la planta estreses hídricos, térmicos e higrométricos. Pudiendo llegar a afectar a la productividad de la planta y comprometer así su continuidad.

Estudios anteriores han demostrado que tanto el crecimiento vegetativo como el reproductivo se ven reducidos como consecuencia del estrés hídrico (Smart, *et al.*, 1983; Rülh, *et al.*, 1985; Grimes, *et al.*, 1990; Dry, *et al.*, 2001; Tregcoat, *et al.*, 2002; Escalona, *et al.*, 2003), aunque la sensibilidad del crecimiento reproductivo es menor a la del vegetativo (Williams y Matthews, 1990; Williams *et al.*, 1994).

- Desarrollo vegetativo.

La superficie foliar desarrollada por la cepa, es un factor determinante de su capacidad productiva por ser sede de la actividad fotosintética. La forma de la cubierta vegetal, su geometría, y su densidad van a determinar la interceptación de la radiación por la planta (Mabrouk *et al.*, 1997b; Zufferey y Murisier, 1996 y 1998; Schultz 1995), que condicionará la fotosíntesis y la transpiración, y como consecuencia la productividad, el rendimiento y junto con el microclima de racimos, la calidad de la cosecha (Smart, 1974; Carbonneau, 1996; citados por Schultz, 1995).

Para una maduración adecuada de las bayas es necesario asegurar un valor mínimo de área foliar para un determinado valor de vendimia. Para ello la cubierta vegetal deberá desarrollar su superficie foliar rápidamente hasta los valores óptimos y equilibrados y evitar competencias entre crecimiento vegetativo y maduración de las bayas (Sánchez de Miguel, 2007).

La sensibilidad del crecimiento vegetativo al déficit hídrico depende del estado de crecimiento de la planta y de la intensidad y duración del déficit. Si el déficit se da al principio del ciclo, en la etapa de crecimiento y desarrollo de la superficie foliar, puede llegar a ocasionar el acortamiento de la longitud del entrenudo, y dependiendo de la intensidad del déficit, puede incluso limitar el periodo de crecimiento del tallo (Matthews *et al.*, 1987). Si, por el contrario, el déficit tiene lugar a partir de floración, dependiendo de la intensidad del déficit, puede llegar a afectar a la elongación del pámpano principal y al desarrollo de nietos, lo cual quedaría reflejado en el área foliar total desarrollada. Siendo mayor la reducción del área foliar en tallos de nietos, debido al déficit hídrico que la disminución del área foliar del principal (Williams y Matthews,

1990). Después de cuajado el estrés hídrico puede acelerar la senescencia foliar, haciendo que las hojas no contribuyan en la maduración de la baya (Williams, 1996), y si la senescencia foliar es muy acusada, se puede llegar a aumentar notablemente la sobreexposición de los racimos afectando a la composición final de la baya.

- Rendimiento y sus componentes.

Matthews, *et al.* (1988) señalan que la reducción del rendimiento por el estrés hídrico se debe fundamentalmente al menor número de bayas desarrollado en cada racimo. Por otro lado el aumento del rendimiento en cepas regadas se debe principalmente al aumento en el peso de la baya (Williams and Mathews 1990; García-Escudero *et al.*, 1997; Esteban *et al.*, 1999, Tandonnet *et al.*, 2001; Rubio *et al.*, 2001).

El peso de cosecha desciende conforme lo hace la disponibilidad de agua, aunque la respuesta varía en función de la dosis de riego, las condiciones climáticas y el periodo de aplicación (Risco, 2012). El manejo del riego es determinante en el control de la producción de la uva y la calidad del vino (Ferreeres and Evans 2006).

Hay diferentes estudios sobre déficits hídricos estacionales con diferentes intensidades (Mc Carthy *et al.*, 2002; Kriedeman and Goodwin 2003, Keller 2005, Chaves *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2011, entre otros), dónde se ha visto que déficit hídricos tempranos, desde cuajado a envero (pre-envero), controlan el tamaño de la baya y reducen el vigor de la planta (Mc Carthy *et al.*, 2002, Keller 2005). Y qué déficit hídrico tardíos, después de envero, durante la maduración de la baya, aumenta la biosíntesis de antocianos y otros componentes polifenólicos (Keller *et al.*, 2002). Ambas prácticas pueden reducir el rendimiento y el desarrollo vegetativo, en comparación con plantas regadas (Kriedeman and Goodwin 2003) y pueden beneficiar a la calidad de la baya y el vino de diferentes formas (Mc Carthy *et al.*, 2002; Cortell *et al.*, 2005, 2007).

- Relación hoja:fruto.

Para una maduración adecuada de las bayas es necesario asegurar un valor mínimo de área foliar para un determinado valor de vendimia. Es decir, que la relación vegetativo-reproductivo (hoja:fruto) desempeña un papel importante en el rendimiento cualitativo y cuantitativo, pudiéndose evaluar esta relación de diferentes formas.

El primero en evaluarlo fue Ravaz (1906), quien propuso un ratio entre los pesos de vendimia y la madera de poda para estimar el balance entre el crecimiento

vegetativo y la productividad de la cepa. Utilizó el peso de poda por estar estrechamente relacionado con el área foliar.

Otros autores han establecido ratios diferentes, como es el caso de Smart y Robinson, 1991; Hunter, 2000; Baeza y Lissarrague, 2001; Bertamini *et al.*, 1994; Jackson y Lombard, 1993, entre otros, que relacionaron la superficie foliar desarrollada con los kg de uva producidos para establecer unos rangos óptimos de equilibrio vegetativo-reproductivo de la cepa. O como Smart y Robinson, 1991 que utilizaron la superficie foliar expuesta por ser la que contribuye principalmente a las tasas fotosintéticas globales de la cepa.

Todas estas relaciones son índices para evaluar el equilibrio vegetativo-reproductivo de la cepa, cuando dicha relación se encuentra fuera del intervalo, se traduce en un desequilibrio de la planta que puede afectar al rendimiento, a la productividad de la planta y a la composición final del mosto.

- Acumulación de materia seca y su distribución.

La cantidad neta de CO₂ asimilado por un vegetal durante un periodo de tiempo puede cuantificarse a través de la materia seca acumulada durante ese periodo (Gómez del Campo, 1998). Pudiendo ser la materia seca producida y acumulada por la planta una medida global de su actividad fotosintética, que además integraría todos aquellos factores físicos y biológicos que durante el ciclo hayan afectado a la producción global o a la asimilación neta.

La cuantificación de toda la materia seca producida por la planta es complicada, por la dificultad que presenta la obtención de la medida de la biomasa de los elementos permanentes. De ahí que en la práctica, la cuantificación de la medida de la biomasa producida por la planta se limite a los elementos renovables. Que según Williams (1996) suponen entre el 88 - 93 % de la materia seca total producida.

Entonces mediante el análisis de la biomasa de los órganos renovables de la planta, expresado en materia seca, se puede evaluar objetivamente el crecimiento, el desarrollo y cuantificar, en unas determinadas condiciones, el potencial productivo de la vid (Yuste, 1995).

- **Eficiencia de la planta en el uso del agua en condiciones semiáridas.**

No sólo importa el uso de agua para paliar los efectos del estrés hídrico en la planta, sino el uso eficiente del agua de riego, sobre todo en condiciones semiáridas, dónde el agua es un factor limitante.

Se ha definido a la eficiencia de la planta en el uso del agua como la capacidad de producción de la planta por volumen de agua aplicado.

El objetivo principal del presente capítulo fue conocer cómo déficit hídricos estacionales con diferentes intensidades afectaron al desarrollo vegetativo y a la productividad de la cepa con el fin de poder definir estrategias de riego que logren mejoras en el equilibrio de la planta. Para ello se ha estudiado:

- La evaluación de los efectos de la disponibilidad hídrica en el desarrollo y crecimiento vegetativo y en su disposición.
- La determinación de los efectos de la disponibilidad hídrica en la producción de uva y sus componentes.
- La influencia de la disponibilidad hídrica en el equilibrio entre la parte vegetativa y productiva de la planta.
- Y se ha cuantificado la influencia del grado de déficit hídrico en la acumulación de materia seca y su distribución.

Por otro lado se compararon los efectos de las diferentes estrategias de riego en la eficiencia de la planta en el uso del agua en condiciones semiáridas.

Y finalmente se evaluó la relación entre el volumen de agua recibido por el viñedo (riego mas lluvia) desde brotación por un lado, y desde floración por otro lado, con el rendimiento y sus componentes.

VI.3 MATERIAL Y MÉTODOS:

VI.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ARQUITECTURA FOLIAR DE LA PLANTA.

Crecimiento vegetativo. Morfología y longitud del pámpano.

Se seleccionaron en cada tratamiento y repetición pámpanos de tipo medio, que se marcaron y se guiaron facilitando su crecimiento y evitando su despunte.

Se midió la longitud de 18 pámpanos por tratamiento, es decir, 6 pámpanos de diferentes cepas control por repetición con una frecuencia semanal, desde que los pámpanos tenían 15 cm, hasta que se observó la parada de crecimiento vegetativo.

Además se evaluó sobre los pámpanos seleccionados para medir la longitud con una periodicidad semanal las características morfológicas del pámpano. Para ello se contabilizó el número de nudos, el número de hojas principales, el número de anticipados y el número de hojas de nietos. Con estos datos se halló la longitud media del entrenudo y el porcentaje de yemas de anticipados que dieron lugar a nietos.

Superficie foliar total (SFT).

La superficie foliar total determina el nivel de intercambio gaseoso entre la viña y el ambiente; además, de la intensidad con la que se den estos intercambios resultará la producción de hidratos de carbono y la maduración de la cosecha (Fregoni, 1984; Petrie *et al.*, 2000).

La determinación de la superficie foliar total se ha calculado siguiendo el método propuesto por Sánchez de Miguel *et al.* (2011), en el que relaciona dos métodos indirectos:

- el propuesto por Carbonneau (1976) que relaciona la longitud del nervio central y el área del limbo,
- el propuesto por Lopes y Pinto (2000) que relaciona el área foliar con la longitud y el número de hojas del pámpano principal y las áreas foliares de las hojas mayores y menores.

obteniéndose la siguiente ecuación, dónde se relaciona la longitud del nervio de la hoja mayor con la longitud del nervio de la hoja menor y el número de hojas.

$$\text{Área}_{pp} = \left[0,38 + 1,21 \left(\frac{L+I}{2} \right)^2 \cdot N \right]$$

Dónde: Área_{pp} = área foliar del pámpano principal; L = longitud del nervio principal de la hoja mayor del pámpano; I = longitud del nervio principal de la hoja menor del pámpano, con un nervio principal mayor a 3,5 mm; N = número de hojas del pámpano principal.

$$\text{Área}_{nietos} = \left[0,38 + 1,21 \left(\frac{L'+I'}{2} \right)^2 \cdot N' \right]$$

Dónde: Área_{nietos} = área foliar de los nietos del pámpano principal; L' = longitud del nervio de la hoja mayor de los nietos; I' = longitud del nervio principal de la hoja menor de los nietos, con un nervio principal mayor a 3,5 mm; N' = número de hojas de nietos.

La superficie foliar total media del pámpano ($SFT_{pámpano}$) se calculó como la suma de la superficie foliar del pámpano principal (Área_{pp}) mas la superficie foliar de los nietos del pámpano principal (Área_{nietos})

$$SFT_{pámpano} = \text{Área}_{pp} + \text{Área}_{nietos}$$

La superficie foliar total media por cepa (SFT_{cepa}) se calculó como el producto del área foliar media del pámpano multiplicada por el número medio de pámpanos por cepa, que era de 10 pámpanos.

$$SFT_{cepa} = SFT_{pámpano} \cdot 10$$

Para calcular la superficie foliar total SFT se midió en campo 4 pámpanos de tipo medio por cepa, y en 10 cepas control en cada tratamiento y repetición en el periodo de maduración. Un total de 120 pámpanos por tratamiento.

Superficie foliar externa (SFE).

La superficie foliar externa (SFE) de la cepa representa el área foliar que puede recibir la radiación solar de forma directa (Carbonneau, 1980). Se considera que está constituida por las caras laterales y la parte superior del *canopy*, pues aunque la radiación reflejada por el suelo puede ser absorbida por la cara inferior, esta contribución es muy pequeña y puede despreciarse (Smart, 1985). Dicho término se expresa como m^2 de superficie foliar externa por cepa.

Mediante operaciones en verde se colocó y despuntó la vegetación para adaptar la geometría de las cepas al modelo medio de una espaldera de conducción vertical, a un paralelepípedo.

El tamaño de muestra fue de 5 cepas control por tratamiento y repetición en 2010 y 2011 en el periodo de maduración.

En cada cepa control se midió, en cinco puntos equidistantes del cordón, la altura y espesor de la vegetación. El espesor se midió en tres alturas diferentes: zona inferior, zona media y zona superior de la espaldera; para calcular el espesor medio del paralelepípedo. Haciendo las medias correspondientes, se obtuvo la altura y el espesor medio de cada cepa control.

Finalmente se calculó la superficie foliar externa como la superficie delimitada por los planos laterales y superior del canopy (Smart *et al.* 1982).

$$SFE_{\text{cepa}} = [2(l \cdot h) + (l \cdot a)]$$

donde: l = longitud media del cordón de la cepa; h = altura media de la pared vegetal de la cepa; a = anchura media de la cepa.

Disposición y densidad de la vegetación.

Se determinó las relaciones que explican la disposición y densidad de la vegetación mediante los siguientes índices:

- *SFE/SFT*: Superficie foliar expuesta entre superficie foliar total, esta relación es un indicador de la disposición de las hojas, si están expuestas recibiendo luz o no. Los valores de este índice oscilan entre 0 y 1. Si se aproxima a 1 es porque casi toda la superficie foliar está expuesta. Y cuanto más se aproxime a 0, significa que más sombreada se encuentran las hojas.
- *SFT/Vol*: Superficie foliar total entre el volumen que ocupa la cepa (Schultz, 1995), esta relación es un indicador de la densidad de vegetación, de forma que, a mayor relación, mayor amontonamiento del follaje.

VI.3.2 PESO DE COSECHA Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.

Para la determinación del **peso de vendimia** se seleccionaron y se etiquetaron veinte plantas en cada tratamiento y repetición (plantas sin marras a los lados, sin enfermedades aparentes y con una carga similar en todos los tratamientos), de modo que en cada tratamiento se obtuvo el peso de cosecha a partir de la vendimia de 60 plantas. En cada una de estas plantas se contó el **número de sarmientos**, y el **número de racimos** y se pesó los racimos de 5 plantas por separado, un total de 4 pesadas de 5 plantas en cada repetición. En una balanza electrónica (Modelo PM-30, Calitrol, Control Gram, Barcelona, España), de 60 kg de pesada máxima, y con una precisión de 10 g. Antes de realizar la pesada se tararon las cajas de vendimia. A partir de estos datos se obtuvo el **peso de vendimia por planta**, el **número medio de racimos por sarmiento** y el **peso medio de cada racimo**.

A partir de estos datos y del peso medio de la baya, obtenido de los muestreos realizados en vendimia para el análisis de la composición de la baya, se obtuvo el **número de bayas por racimo**.

VI.3.3 PESO DE MADERA DE PODA E ÍNDICE DE RAVAZ.

La evaluación del peso de madera de poda se realizó midiendo las 20 plantas seleccionadas y etiquetadas en vendimia en cada tratamiento por repetición. Para ello, se contaron el número de sarmientos desarrollados en cada cepa y tras su poda se pesaron mediante una balanza electrónica (Modelo PM-30, Calitrol, Control Gram, Barcelona, España) de 60 kg de pesada máxima y con una precisión de 10 g de la misma forma que se detalla en la vendimia. De esta forma se obtuvo el **peso de madera de poda** de cada planta.

Para cada cepa también se obtuvo el **peso medio del sarmiento** dividiendo el peso de madera de poda de la cepa entre el número de sarmientos de la misma.

Se evaluó la relación fuente a sumidero mediante el Índice de Ravaz, que es un índice adimensional que expresa la relación entre el rendimiento de la cosecha ($\text{kg}\cdot\text{cepa}^{-1}$) y el peso de la madera de poda ($\text{kg}\cdot\text{cepa}^{-1}$) (ver apartado VI.3.4).

VI.3.4 RELACIÓN VEGETATIVO / REPRODUCTIVO: HOJA/FRUTO

La relación entre el crecimiento vegetativo y el rendimiento (relación hoja/fruto) se estudió mediante la relación “fuente a sumidero” evaluando así el ratio Vegetativo/Productivo, que se calculó a partir de los datos de superficie foliar total (SFT) y superficie foliar expuesta (SFE) frente a los kg de uva producidos.:

- $SFE/Rdto$: se obtuvo dividiendo la superficie foliar expuesta ($m^2 \cdot cepa^{-1}$) entre el peso de vendimia expresado como kg de uva por cepa.
- $SFT/Rdto$: se obtuvo dividiendo la superficie foliar total ($m^2 \cdot cepa^{-1}$) entre el peso de vendimia expresado como kg de uva por cepa.
- El **índice de Ravaz** se obtuvo dividiendo el peso de vendimia expresado como kg de uva por planta entre el peso de madera de poda (PMP) en kg por planta.

$$\text{Índice Ravaz} = \frac{\text{Rendimiento (kg} \cdot \text{cepa}^{-1})}{\text{PMP (kg} \cdot \text{cepa}^{-1})}$$

VI.3.5 PRODUCTIVIDAD GLOBAL: MATERIA SECA.

Para evaluar la productividad global se utilizó la cantidad y el reparto de materia seca de las partes renovables: hojas, tallos, racimos y racimas. Para ello se tomaron 5 pámpanos por tratamiento y repetición. Se descompusieron los pámpanos en hojas (tanto del principal como de nietos), en racimos y en racimas. Se pesaron cada una de las partes diferenciadas por separado en una balanza COBOS S.A. modelo C-600-SX de 0,01 g de sensibilidad, obteniendo su peso fresco. Posteriormente, se separó el 25 % de la muestra pesada en fresco, se volvió a pesar anotando dicho dato y se introdujo en una estufa a 80°C, donde se realizó un seguimiento diario del peso de la muestra hasta alcanzar un peso constante (Esta operación se realizó por separado con cada una de las partes diferenciadas del pámpano, hojas, racimos y racimas).

Para calcular la materia seca por cepa se multiplica la materia seca total de las partes renovables del pámpano medio por el número de sarmientos desarrollados por la cepa. Se determinan así mismo la distribución de materia seca total en hojas, tallos (ambas de principal y de nieto), racimos y racimas, y el porcentaje de materia seca localizada en cada una de las partes renovables respecto la materia seca total del pámpano. Los resultados se expresan por sarmiento medio ($g \cdot sarmiento^{-1}$), por cepa ($g \cdot cepa^{-1}$) o por superficie ($g \cdot m^{-2}$, $kg \cdot m^{-2}$).

En el período de reposo, se determinó el peso de madera de poda de 10 cepas por parcela elemental (ver apartado VI.3.3). Considerando el número de sarmientos de esas cepas, se determinó el peso medio del sarmiento. El peso de madera de poda se expresa en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$; y el peso medio del sarmiento se expresó en $\text{g}\cdot\text{sarmiento}^{-1}$.

En el 2011 se evaluó la materia seca a lo largo del ciclo, a partir de cuajado, a continuación se detallan el tamaño de muestra y las fechas de medida a través de: el día del año (DOY), la integral térmica (GDD_{10} , grados día) y los estados fenológicos modificados de Eichhorn y Lorenz (Coombe, 1995):

Tabla VI.1: Fechas, días del año (DOY), GDD_{10} ($\text{grados}\cdot\text{día}^{-1}$) y estado fenológico de cada muestreo realizado en 2011.

Fecha	DOY	GDD_{10}	Estado fenológico¹	
10/06/2011	161	497	Cuajado	27
18/07/2011	199	1026	Cierre de racimos	33
11/08/2011	223	1379	Maduración	36
15/09/2011	258	1846	Vendimia	38

¹ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

VI.4 RESULTADOS:

VI.4.1 CRECIMIENTO VEGETATIVO:

Crecimiento del pámpano:

En la tabla VI.2 se muestran los datos medios finales de la longitud del pámpano principal (Lpp) expresado en cm, el número de nudos del pámpano principal (Nº nudos), la longitud media del entrenudo del pámpano principal (L entrenudo) expresado en cm, y número de hojas de nietos.

Al analizar los datos medios de longitud del pámpano principal, longitud del entrenudo, número de nudos y número de nietos de los cuatro tratamientos, se observaron diferencias significativas en todas las variables estudiadas, debidas el régimen hídrico, menos en la longitud del entrenudo, que no aparecieron diferencias.

Tabla VI.2: Longitud final del pámpano principal (Lpp) en centímetros, número de nudos del pámpano principal (Nº nudos), longitud del entrenudo (L entrenudo) en centímetros y número de hojas de nietos (Nº nietos), para los cuatro tratamientos en 2010 y 2011.

		Lpp (cm)	Nº nudos	L entrenudo	Nº nietos
2010	T	170,0 ab	35 a	4,9	50 a
	DM _c	129,3 b	26 b	5,0	28 b
	DM ₁	209,9 a	39 a	5,4	54 a
	DM ₂	141,4 b	28 b	5,1	35 ab
	Sig.	***	**	ns	*
2011	T	193,9 a	34 a	8,0 a	57 a
	DM _c	124,2 b	24 b	6,7 b	34 c
	DM ₁	182,5 a	34 a	7,5 ab	47 b
	DM ₂	141,3 b	27 b	7,4 b	38 c
	Sig.	***	***	*	**
Media 2010 - 2011					
	T	181,9 a	34 a	6,4	53 a
	DM _c	126,7 b	25 b	5,9	30 b
	DM ₁	196,2 a	36 a	6,4	50 a
	DM ₂	141,4 b	27 b	6,3	36 b
	Sig. Trat	***	***	ns	***
	Sig. Año	ns	ns	*	ns
	Trat * Año	ns	ns	ns	ns

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0,05; 0,01; 0,001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (=0.05).

Se desarrollan dos grupos diferenciados, por un lado, los tratamientos T (déficit ligero) y DM₁ (déficit moderado a partir de pre-envero), los cuales obtienen una

longitud de pámpano principal mayor; y por otro lado los tratamientos DM_c (déficit moderado continuo) y DM_2 (déficit moderado hasta pre-verano), con un crecimiento del pámpano principal menor.

En 2010 el tratamiento DM_1 alcanza una longitud de pámpano principal superior al resto, acompañado por un número de nudos y una longitud del entrenudo también mayor. En 2011, sin embargo, se atenúa un poco ese crecimiento desmesurado de DM_1 , igualándose a T. Los tratamientos que alcanzan longitudes de pámpano mayores se corresponden con aquellos que han recibido más agua en las primeras fases del crecimiento y desarrollo de la cubierta vegetal, que se corresponde con T y DM_1 , acompañado también de un mayor número de hojas de nietos.

El tratamiento de déficit moderado continuo (DM_c) es el que menor longitud del pámpano principal alcanza y el que menos hojas de nietos desarrolla en los dos años. Pero en 2011 aumenta la longitud del entrenudo en un 33 %. Esto puede ser debido a las lluvias que se dieron en abril y mayo de ese año (116 mm).

Caracterización de la superficie foliar:

En la tabla VI.3 se presenta el desarrollo vegetativo de las cepas, a través de la superficie foliar media desarrollada por el pámpano principal, la superficie foliar media desarrollada por los nietos y la superficie foliar media total (principal más nietos), también se muestra la superficie media foliar expuesta y el volumen medio que ocupa la cepa para los cuatro tratamientos en cada uno de los años de estudio.

En la superficie foliar total desarrollada por la cepa existen diferencias significativas en los dos años de estudio, éstas son debidas a las diferencias estadísticas que se dan en la superficie foliar desarrollada por los nietos. Siendo mayor en aquellos tratamientos que han recibido más aporte de agua de floración a verano (T y DM_1). Siendo un 90 % mayor la superficie foliar desarrollada por los nietos en T, que es el tratamiento que más agua recibe en los dos años de estudio, frente a DM_c , que es el tratamiento que menos agua recibe. Este aumento queda reflejado en un 50 % más de superficie foliar total desarrollada en T que en DM_c . En los tratamientos DM_1 (déficit moderado a partir de pre-verano) y DM_2 (déficit moderado hasta pre-verano) las diferencias en el desarrollo de la masa vegetal se acortan, también porque las diferencias de agua total aplicada son menores. DM_1 obtiene un 58 % más de superficie foliar de nietos que DM_2 , y un 35 % más de superficie media foliar total desarrollada.

Al estudiar la superficie foliar expuesta se observan diferencias estadísticas diferenciándose dos grupos, por un lado T y DM₁ con un 15 % más de SFE y, por otro lado, DM_c y DM₂. Además la superficie foliar expuesta difiere significativamente entre los dos años de estudio y existe interacción año * riego. En el conjunto de años de estudio existió una SFE de 2,58 m²·cepa⁻¹ (0,86 m² de hojas/m² de suelo) en T y 2,56 m²·cepa⁻¹ en DM₁ (0,85 m² de hojas/m² de suelo) que fue significativamente superior a la alcanzada por las cepas de DM_c y DM₂ (2,23 y 2,28 m²·cepa⁻¹ ó 0,74 y 0,76 m² hojas/m² suelo).

En general se escalona la superficie foliar desarrollada por los nietos, y por consiguiente la superficie foliar total, así como la superficie foliar expuesta y el volumen que ocupa la cepa en función del agua aplicada, a mayor agua mayor desarrollo vegetativo.

Tabla VI.3: Valores medios de la superficie foliar del pámpano principal (SFTppal, m²/cepa), de la superficie foliar de nietos (SFTnietos; m²/cepa), de la superficie foliar total de la cepa (SFT; m²/cepa), de la superficie foliar expuesta de la cepa (SFE; m²/cepa) y el volumen de vegetación de la cepa (Vol; m³/cepa) en 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon, en los 4 tratamientos.

		SFTppal (m ² /cepa)	SFTnietos (m ² /cepa)	SFT (m ² /cepa)	SFE (m ² /cepa)	Vol (m ³ /cepa)
2010	T	1,84	2,59 ab	4,43 a	2,71 a	0,50 a
	DM _c	1,51	1,19 c	2,70 b	2,25 b	0,36 b
	DM ₁	1,71	2,99 a	4,70 a	2,78 a	0,61 a
	DM ₂	1,53	1,51 bc	3,04 b	2,34 b	0,35 b
	Sig.	ns	*	*	**	**
2011	T	1,15	2,83 a	3,97 a	2,45 a	0,35 a
	DM _c	1,25	1,65 c	2,90 c	2,20 b	0,26 c
	DM ₁	1,25	2,39 ab	3,65 ab	2,33 ab	0,30 b
	DM ₂	1,23	1,89 bc	3,12 bc	2,23 b	0,28 bc
	Sig.	ns	**	*	*	**
Media 2010-2011						
	T	1,49	2,71 a	4,20 a	2,58 a	0,43 a
	DM _c	1,38	1,42 c	2,80 c	2,23 b	0,31 b
	DM ₁	1,48	2,69 a	4,17 a	2,56 a	0,46 a
	DM ₂	1,38	1,70 bc	3,08 b	2,28 b	0,32 b
	Sig. Trat	ns	**	***	***	***
	Sig. Año	***	ns	***	***	**
	Trat * Año	ns	ns	*	*	**

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0,05; 0,01; 0,001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (α=0.05).

En la tabla VI.4 se presentan las relaciones que explican la disposición de la vegetación, la relación entre la superficie foliar expuesta y la superficie foliar total (SFE/SFT) y la relación entre la superficie foliar total y el volumen que ocupa.

La disposición de la vegetación (SFE/SFT) es diferente para las dosis de riego aplicadas, y no difiere significativamente entre años ni existe interacción año*riego. En el conjunto de años de estudio existió una relación de SFE/SFT de 0,84 y 0,76 m²/m² en los tratamientos de déficit moderado continuo (DM_c) y déficit moderado hasta pre-verano (DM₂) que fue significativamente superior a la relación alcanzada por las cepas de los tratamientos de déficit ligero (T) y déficit moderado a partir de pre-verano (DM₁) SFE/SFT = 0,63 m²/m².

Tabla VI.4: Características vegetativas; relación entre la superficie foliar expuesta y la superficie foliar total (SFE/SFT; m²/m²) y relación entre la superficie foliar total y el volumen de vegetación (SFT/Vol; m²/m³) en 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon bajo los 4 regímenes hídricos.

		SFE/SFT (m ² /m ²)	SFT/Vol (m ² /m ³)
2010	T	0,65 b	8,56
	DM_c	0,92 a	7,33
	DM₁	0,61 b	7,80
	DM₂	0,79 ab	8,49
Sig.		*	ns
2011	T	0,62	11,38
	DM_c	0,76	11,25
	DM₁	0,64	12,08
	DM₂	0,72	11,13
Sig.		ns	ns
Media 2010-2011			
	T	0,63 b	9,97
	DM_c	0,84 a	9,29
	DM₁	0,63 b	9,94
	DM₂	0,76 a	9,81
	Sig. Trat	**	ns
	Sig. Año	ns	***
	Trat * Año	ns	ns

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0,05; 0,01; 0,001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (α=0.05).

La densidad de vegetación (SFT/Vol) no presenta diferencias estadísticas debidas a las dosis de riego aplicadas, ni a la interacción tratamiento*año. Pero si que presenta

diferencias entre los años de estudio, siendo el 2011 el año en el que se obtiene mayor densidad de vegetación en todos sus tratamientos.

En general el tratamiento de déficit moderado continuo (DM_c) es el que consigue una relación mejor, seguido del tratamiento de déficit moderado hasta pre-verano (DM₂). Y son los tratamientos más regados desde floración (T y DM₁) los que tienen la peor disposición de la vegetación, y mayor amontonamiento de la misma.

Componentes del rendimiento.

En la tabla VI.5 se presentan para cada tratamiento y año del estudio los datos medios de rendimiento en cosecha, así como los componentes del rendimiento: peso del racimo (g), peso de baya (g), número de bayas por racimo y número de racimos por sarmiento.

Tabla VI.5: Componentes del Rendimiento: Peso de cosecha (rendimiento, t·ha⁻¹), peso del racimo (g), peso de la baya (g), número de bayas por racimo y fertilidad de la cepa (rac/planta); en el 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon bajo los 4 regímenes hídricos.

		Rendimiento (t·ha ⁻¹)	Peso Racimo (g)	Peso Baya (g)	Bayas/ Racimo	Rac/Planta
2010	T	7,73	132 a	1,09 a	121	17
	DM _c	6,71	108 b	0,96 b	113	18
	DM ₁	7,58	131 a	0,99 ab	133	17
	DM ₂	6,84	116 ab	0,89 b	131	17
	Sig.	ns	**	**	ns	ns
2011	T	9,62 a	129 a	1,02 a	129	22 a
	DM _c	6,72 b	98 b	0,82 b	118	20 b
	DM ₁	8,25 ab	117 ab	0,89 b	132	21 ab
	DM ₂	7,05 b	101 b	0,81 b	125	21 b
	Sig.	***	***	***	ns	*
Media 2010-2011						
	T	8,67 a	131 a	1,06 a	125 a	20
	DM _c	6,71 c	103 b	0,89 bc	115 b	20
	DM ₁	7,91 ab	124 a	0,94 b	132 a	19
	DM ₂	6,94 bc	109 b	0,85 c	128 a	19
	Sig. Trat	**	***	***	**	ns
	Sig. Año	*	***	***	ns	***
	Trat * Año	ns	ns	ns	ns	ns

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0,05; 0,01; 0,001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (α=0.05).

En cuanto a las toneladas de uva producidos por hectárea, no hubo diferencias significativas entre tratamientos en 2010, año en el que se inició el estudio. Pero si que aparecen diferencias significativas en el peso de la baya y en el peso del racimo.

En 2011 el rendimiento se escalona en función del volumen de agua total aportado, siendo mayor en los tratamientos con mayor aporte hídrico, los riegos T y DM₁ (24 y 10% respectivamente). Y esto se corresponde a su vez con las diferencias estadísticas encontradas en la fertilidad de la planta, en el peso de la baya y por consiguiente en el peso del racimo. El peso de la baya sólo alcanza el gramo en el tratamiento de déficit ligero (T) 1,09 g en 2010 y 1,02 g en 2011.

En la media de los dos años de estudio, se observa que el rendimiento y sus componentes están altamente influenciados por el déficit hídrico y su momento de aplicación, excepto en la fertilidad de la planta (número de bayas por racimo), que no aparecen diferencias significativas.

Relaciones entre el crecimiento vegetativo y reproductivo.

En la tabla VI.6 se presenta el número de sarmientos por planta, que es igual para todos los tratamientos (una media de 10 sarmientos por planta), también se presenta el peso de la madera de poda por cepa y el peso unitario del sarmiento. Y por último, se muestra la relación entre el desarrollo vegetativo y el peso de cosecha final mediante el índice de Ravaz, para los cuatro tratamientos en los dos años de estudio.

Existen diferencias significativas debidas al régimen hídrico en el peso de la madera de poda y en el peso del sarmiento. Siendo un 64 % mayor el peso del sarmiento en T (déficit ligero) que en DM_c (déficit moderado continuo) y un 29 % mayor el peso del sarmiento de DM₁ (déficit moderado a partir de pre-envero) frente a DM₂ (déficit moderado hasta pre-envero). El déficit hídrico influye altamente en el peso final del sarmiento, así como su momento de aplicación, siendo menor el peso del sarmiento en las cepas que han sufrido un déficit moderado en el periodo anterior al envero.

Para estimar el balance entre el crecimiento vegetativo y la productividad de la cepa se ha utilizado el índice de Ravaz, siendo el intervalo óptimo para dicho índice de 4 a 7 (Smart et al., 1991; Murisier 1996 en Rubio 2002). El primer año, 2010, los tratamientos más regados no entran dentro del baremo propuesto por Smart y Murisier (3,26 en T y 3,30 en DM₁). Es el tratamiento de déficit moderado continuo (DM_c) el que consigue valores mayores del Índice de Ravaz, (4,57 en 2010 y 5,17 en 2011).

Tabla VI.6: Valores medios del número de sarmientos por planta, del peso de madera de poda por cepa ($\text{kg}\cdot\text{cepa}^{-1}$), del peso unitario de cada sarmiento (g) y del Índice de Ravaz; en 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon bajo los 4 regímenes hídricos.

		N. sarm./ planta	PMP ($\text{kg}\cdot\text{cepa}^{-1}$)	Peso (g) sarmiento	I.Ravaz			
2010	T	10,52	0,71	a	68,36	a	3,26	b
	DM_c	10,24	0,45	b	44,30	b	4,57	a
	DM₁	10,00	0,69	a	67,61	a	3,30	b
	DM₂	9,85	0,52	b	51,12	b	4,02	ab
Sig.		-	**		**		**	
2011	T	10,10	0,67	a	67,80	a	4,40	
	DM_c	10,17	0,39	d	40,89	d	5,17	
	DM₁	10,10	0,57	b	58,92	b	4,40	
	DM₂	9,97	0,47	c	47,96	c	4,51	
Sig.		-	***		***		ns	
Media 2010-2011								
	T		0,69	a	68,08	a	3,83	b
	DM_c		0,42	b	42,59	c	4,87	a
	DM₁		0,63	a	63,27	a	3,85	b
	DM₂		0,49	b	49,54	b	4,27	ab
	Sig. Trat	-	***		***		*	
	Sig. Año	-	*		*		**	
	Trat * Año	-	ns		ns		*	

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para $p < 0,05$; $0,01$; $0,001$ o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan ($\alpha = 0,05$).

En la tabla VI.7 se muestran las relaciones entre el crecimiento vegetativo y el rendimiento para los cuatro tratamientos en los dos años de estudio, 2010 y 2011.

La aplicación de diferentes regímenes hídricos en distintos momentos del ciclo no supuso diferencias significativas en la superficie foliar total por kg de fruta, debido al régimen hídrico, ni debidas al año y ni a la interacción tratamiento*año.

La relación de la superficie foliar expuesta frente a la producción de uva presenta diferencias significativas debidas al año, siendo mayor la relación obtenida en 2010 para los cuatro tratamientos. En el conjunto de los dos años los valores oscilan entre $1,01$ y $1,12 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Tabla VI.7: Relación vegetativo – reproductivo en 2010 y 2011 de Cabernet Sauvignon para los 4 regímenes hídricos. SFT, SFE y Rdto: superficie foliar total, superficie foliar expuesta y rendimiento respectivamente.

		SFT/Rdto (m ² /kg)	SFE/Rdto (m ² /kg)
2010	T	1,91	1,18
	DM_c	1,28	1,15
	DM₁	2,11	1,24
	DM₂	1,47	1,15
Sig.		ns	ns
2011	T	1,37	0,84 b
	DM_c	1,44	1,10 a
	DM₁	1,47	0,94 ab
	DM₂	1,47	1,05 a
Sig.		ns	*
Media 2010-2011			
	T	1,64	1,01
	DM_c	1,36	1,12
	DM₁	1,79	1,09
	DM₂	1,47	1,10
	Sig. Trat	ns	ns
	Sig. Año	ns	***
	Trat * Año	ns	ns

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0,05; 0,01; 0,001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (=0.05).

VI.4.2 EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ASIMILADOS EN EL PERIODO DE CRECIMIENTO Y MADURACIÓN DE LA BAYA.

En el ensayo se evaluó la acumulación de materia seca desde cuajado hasta vendimia. Se vio en este periodo de tiempo que los principales sumideros fueron los racimos, y con menor fuerza, las partes vegetativas (ápice principal hasta despunte y los nietos).

En la figura VI.1 se representa la evolución de la acumulación de materia seca total y diferenciada en materia seca vegetativa, y materia seca reproductiva, desde cuajado a vendimia en 2011, para los 4 diferentes tratamientos, expresado en gramos de materia seca por sarmiento (g·sarmiento⁻¹).

Entre cuajado y vendimia la materia seca total acumulada en partes renovables fue de 606 g·m⁻² en el tratamiento de déficit ligero (T), 435 g·m⁻² en el tratamiento de

déficit moderado continuo (DM_c), 579 g·m⁻² en el tratamiento de déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁) y 436 g·m⁻² en el tratamiento de déficit moderado hasta pre-envero (DM₂) en 2011.

La evolución de la acumulación de materia seca en el periodo de crecimiento y maduración de la baya en los órganos renovables está altamente influenciada por la disponibilidad hídrica de la planta. Siendo mayor en aquellos tratamientos que han recibido agua en las fases de crecimiento vegetativo, 28% (T) y 25% (DM₁) más que DM_c y DM₂. Las diferencias existentes en la acumulación de materia seca total en la planta son debidas a las diferencias significativas en la acumulación de materia seca vegetativa. Sin embargo, la materia seca reproductiva es la que incrementa la materia seca total del sarmiento durante el periodo de crecimiento de la baya hasta vendimia, debido principalmente al aumento de la materia seca de los racimos. Pero el aumento de la materia seca de racimos se ve menos influenciada por la disponibilidad hídrica de la planta.

En vendimia, con 1846 grados·día⁻¹, T y DM₁ acumularon mayor materia seca que DM_c y DM₂, tanto en las partes vegetativas como en las reproductivas, con diferencias significativas (ver figura VI.1). Las cepas sometidas a un déficit ligero (T) desarrollaron un pámpano medio final con un 28 % más de materia seca total, un 31 % más de vegetativa y un 25 % más en los racimos que las cepas sometidas a déficit moderado continuo (DM_c).

Y por otro lado DM₁ (déficit moderado a partir de pre-envero) acumuló mayor materia seca que DM₂ (déficit moderado hasta pre-envero), desarrollando DM₁ un pámpano medio final con 25 % más de materia seca total, un 15 % más de vegetativa y un 30 % más en los racimos que DM₂.

En general se observa una importante acumulación de materia seca en los racimos durante todo el periodo de crecimiento de la baya, con incrementos parejos en T y DM₁ por un lado, y DM_c y DM₂ por otro lado. Los racimos representaron un 15 % en cuajado, no existiendo diferencias significativas debido al agua aplicada. En el estado fenológico de cierre de racimos, la materia seca acumulada en los racimos representó alrededor del 40±3 % de la biomasa total almacenada, y entre el 50-57 % de la biomasa total almacenada por el sarmiento en el periodo de maduración, existiendo diferencias significativas entre tratamientos.

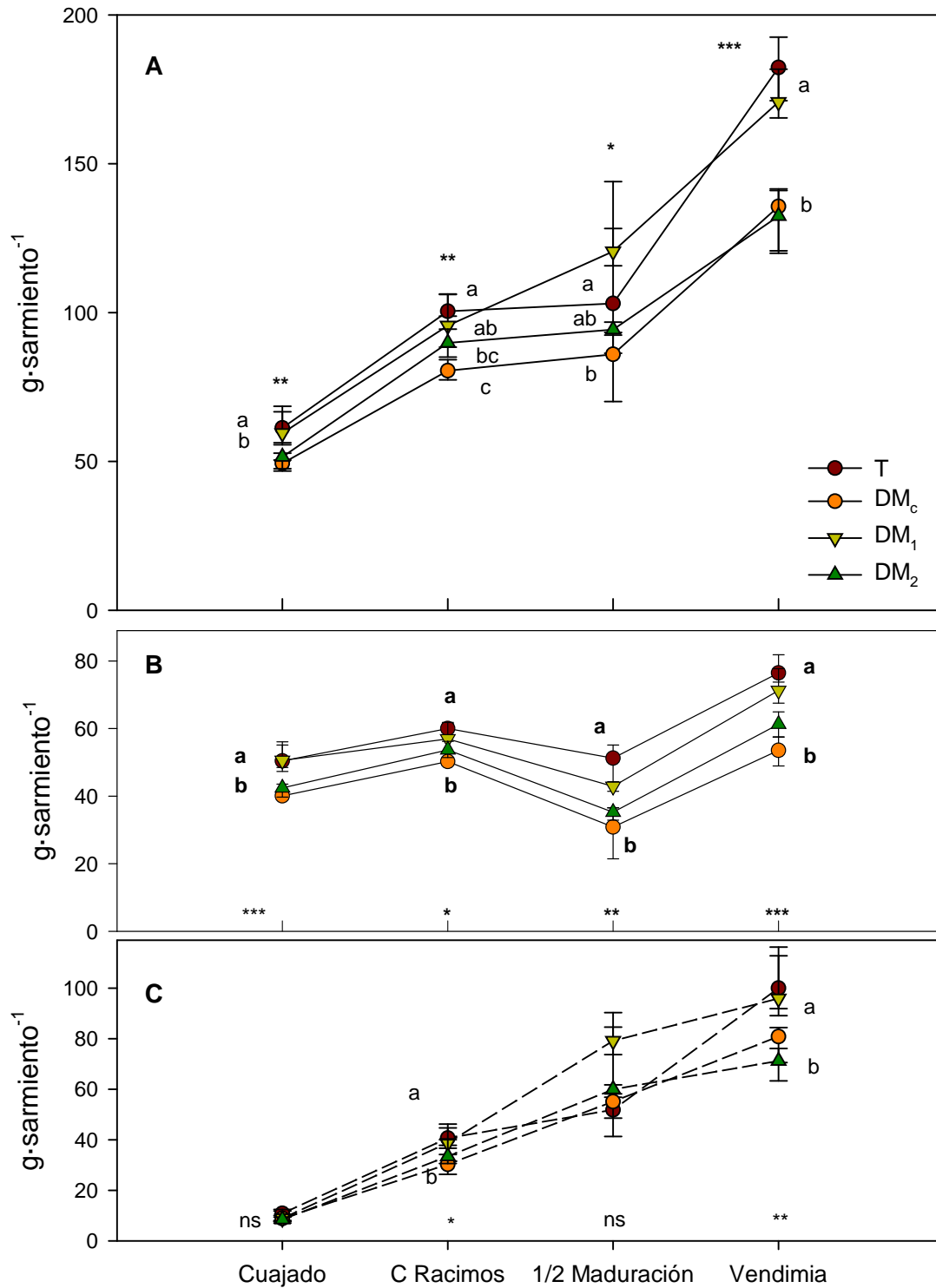


Figura VI.1: Evolución de la acumulación de materia seca en las partes renovables durante las diferentes etapas del crecimiento de la baya en 2011: materia seca total (A), de los órganos vegetativos (B) y reproductivos (C) para los 4 tratamientos, expresado como g·sarmiento⁻¹. Análisis de la varianza para la dosis de riego: *: significativo al p 0,05.

Gómez del Campo (1998) observó en maduración, en 4 variedades, que los racimos representaban el 45% de la materia seca total de los órganos renovables, tanto en no estrés como en estrés hídrico. Por otro lado Sánchez de Miguel (2007) observó en Cabernet Sauvignon que los racimos representaban el 50 % de la biomasa total almacenada por el sarmiento en prácticamente toda la maduración.

Por otro lado, se observa en la evolución de la producción de materia seca de la parte vegetativa diferencias significativas desde cuajado hasta vendimia, diferenciándose los tratamientos dos a dos; T y DM₁, por un lado; y DM_c y DM₂ por otro lado. Además aparece un aumento de la producción de biomasa por sarmiento en vendimia, que es común, dicho aumento, a los 4 tratamientos y que es debido al agostamiento de los pámpanos.

Y por último, se ha observado que la materia seca durante el periodo de crecimiento de la baya ha manifestado más cambios en las partes reproductivas que en las vegetativas. Además, también ha habido más cambios en las dosis de riegos más altas respecto a los tratamientos de déficit más severo. La disponibilidad hídrica generalmente aumenta la productividad de materia seca ya que la falta de agua es uno de los factores limitantes de la actividad fisiológica de la planta (Albuquerque, 1993).

VI.4.3 EFICIENCIA DE LA PLANTA EN FUNCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA.

En la tabla VI.8 se presenta los gramos de biomasa producidos por litro de agua aplicado ($\text{g MS total} \cdot \text{L}^{-1}$) y su reparto tanto a materia seca vegetativa ($\text{g MS vg} \cdot \text{L}^{-1}$), como materia seca reproductiva ($\text{g MS rp} \cdot \text{L}^{-1}$), así como la relación entre ellas (MS vg/MS rp), para las diferentes dosis de riego aplicadas en los 2 años de estudio.

Las plantas que más volumen de agua reciben son las que menos biomasa total generan por litro de agua consumido (43 % menos en las cepas con déficit ligero). Así como, la biomasa de racimos y racimas producida (un 37 % menos) y la de hojas (un 40 % menos). Por otro lado la diferencia de agua aplicada entre los tratamientos DM₁ y DM₂ (85 – 88 mm en 2010 y 2011 respectivamente), no afecta a la eficiencia de la planta, obteniendo producciones de biomasa total similares.

Las cepas sometidas a déficit moderado continuo (DM_c) son las más eficientes en cuanto a producción de biomasa, tanto vegetativa como reproductiva, en función del agua aplicada.

Durante la maduración los racimos son los principales sumideros incrementándose la materia seca de estos respecto a la materia seca presente en los órganos vegetativos. En 2010 el ratio g MS rp / g MS vg es inferior a 1, estando favorecida las traslocaciones que se dirigen hacia las partes vegetativas, mientras que en 2011 parece minimizarse la fuerza de los sumideros del sarmiento, favoreciendo las traslocaciones que se dirigen hacia los racimos.

Tabla VI.8: Valores medios desde **Floración a Vendimia** de la precipitación efectiva (Pe; mm); del riego (mm); de la evapotranspiración de referencia del periodo (ET_0 FI - V; mm-periodo⁻¹); los grados día acumulados desde floración a vendimia (GDD_{10} ; °C/día); gramos de materia seca total por cada litro de agua consumido (g MS·L⁻¹), y reparto de la producción de materia seca por litro consumido entre las partes renovables: producción de materia seca vegetativa (g MS Vg·L⁻¹) y reproductiva (g MS Rp·L⁻¹), el ratio vegetativo a productivo (MS vg /MS rp); en 2010 y 2011.

		2010	2011	Media
Pe (mm)		80,3	17	48,65
Riego (mm)		988,7	1091,4	1040,1
Riego (mm)	T	370,1	428,4	399,3
	DM_c	124,2	149,7	137,0
	DM₁	289,8	300,4	295,1
	DM₂	204,5	212,9	208,7
ET_0 FI -V (mm)		619,32	975,56	797,44
GDD_{10} (°C/día)		1626,0	1543,6	1584,8
g MS total·l ⁻¹	T	3,29 c	3,84 c	3,57 c
	DM_c	5,70 a	6,72 a	6,21 a
	DM₁	4,17 b	5,03 b	4,60 b
	DM₂	4,17 b	5,08 b	4,62 b
Sig.		**	***	***
g MS Vg·l ⁻¹	T	2,11 b	1,64 c	1,88 c
	DM_c	3,37 a	2,74 a	3,05 a
	DM₁	2,65 b	2,10 b	2,38 b
	DM₂	2,46 b	2,37 b	2,42 b
Sig.		**	***	**
g MS Rp·l ⁻¹	T	1,18 c	2,20 c	1,69 c
	DM_c	2,33 a	3,98 a	3,16 a
	DM₁	1,52 bc	2,92 b	2,22 b
	DM₂	1,71 b	2,70 bc	2,20 b
Sig.		**	**	**
MS vg /MS rp	T	0,55	1,32	1,07
	DM_c	0,69	1,45	0,93
	DM₁	0,56	1,37	1,04
	DM₂	0,69	1,14	1,09
Sig.		ns	ns	ns

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns:diferencias significativas para p 0,05; 0,01; 0,001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (=0.05).

VI.4.4 CRECIMIENTO VEGETATIVO, REPRODUCTIVO Y DISPONIBILIDAD HÍDRICA.

La respuesta del viñedo a la disponibilidad de agua en el suelo (precipitación más riego) durante los diferentes periodos han sido analizados por regresiones lineales.

En las figuras VI.2 y VI.3 se presenta las regresiones lineales obtenidas entre el agua total aplicada, dónde se engloba al agua de riego y al agua de lluvia desde brotación o desde floración, expresado en mm; y los componentes del rendimiento: peso del racimo, peso de la baya y rendimiento; y los componentes vegetativos: desarrollo foliar y peso de madera de poda.

Se ha estudiado el nivel de correlación existente entre el volumen de agua desde el principio del ciclo, desde brotación (4¹), donde el agua aplicada está comprendida únicamente por las precipitaciones; y desde floración (23¹), que es cuando se inicia el riego en los tratamientos correspondientes.

Las diferencias en el rendimiento están asociadas con el agua disponible entre brotación y vendimia obteniéndose un coeficiente de correlación elevado ($R^2 = 0,83$). Para un volumen de agua inferior a 300 litros, los rendimientos que se han obtenido en Cabernet Sauvignon son entre 6,5 y 7 toneladas por hectárea, para un volumen comprendido entre 350 y 500 litros, los rendimientos ascienden a 8 toneladas por hectárea y para volúmenes superiores a 500 litros, la cosecha supera las 9 toneladas por hectárea.

Por otro lado el peso del racimo está altamente correlacionado con la aplicación de agua (riego más lluvia) desde floración a vendimia, ya que las dos componentes principales que determinan el peso del racimo, número de bayas por racimo y peso de la baya, dependen de la disponibilidad hídrica de la planta, sobretudo, de floración a envero.

Las componentes vegetativas, desarrollo foliar y peso de madera de poda, están significativamente relacionadas con la disponibilidad de agua de floración a vendimia, más que la de todo el ciclo (de brotación a vendimia).

¹ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

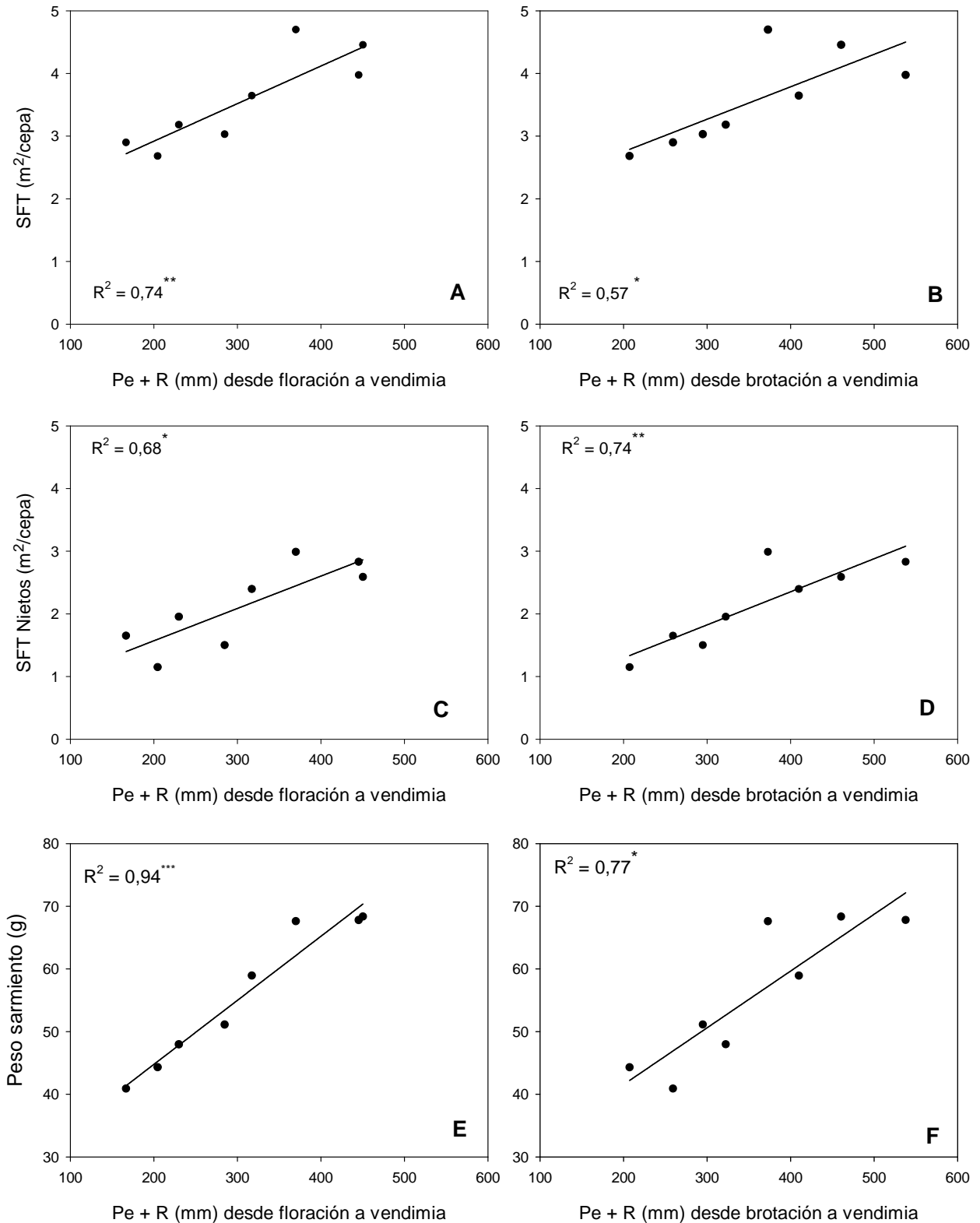


Figura VI.2: Relación entre el agua aplicada (Pe + R; precipitación efectiva + riego en mm) desde floración a vendimia (gráficas de la izquierda) y desde brotación a vendimia (gráficas de la derecha); y la superficie foliar total desarrollada (SFT; m²/cepa) (gráficas A y B); la superficie foliar desarrollada por los nietos (SFT nietos m²/cepa) (gráficas C y D); y el peso del sarmiento (g) (gráficas E y F). Coeficiente de determinación (R²) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y p < 0,05).

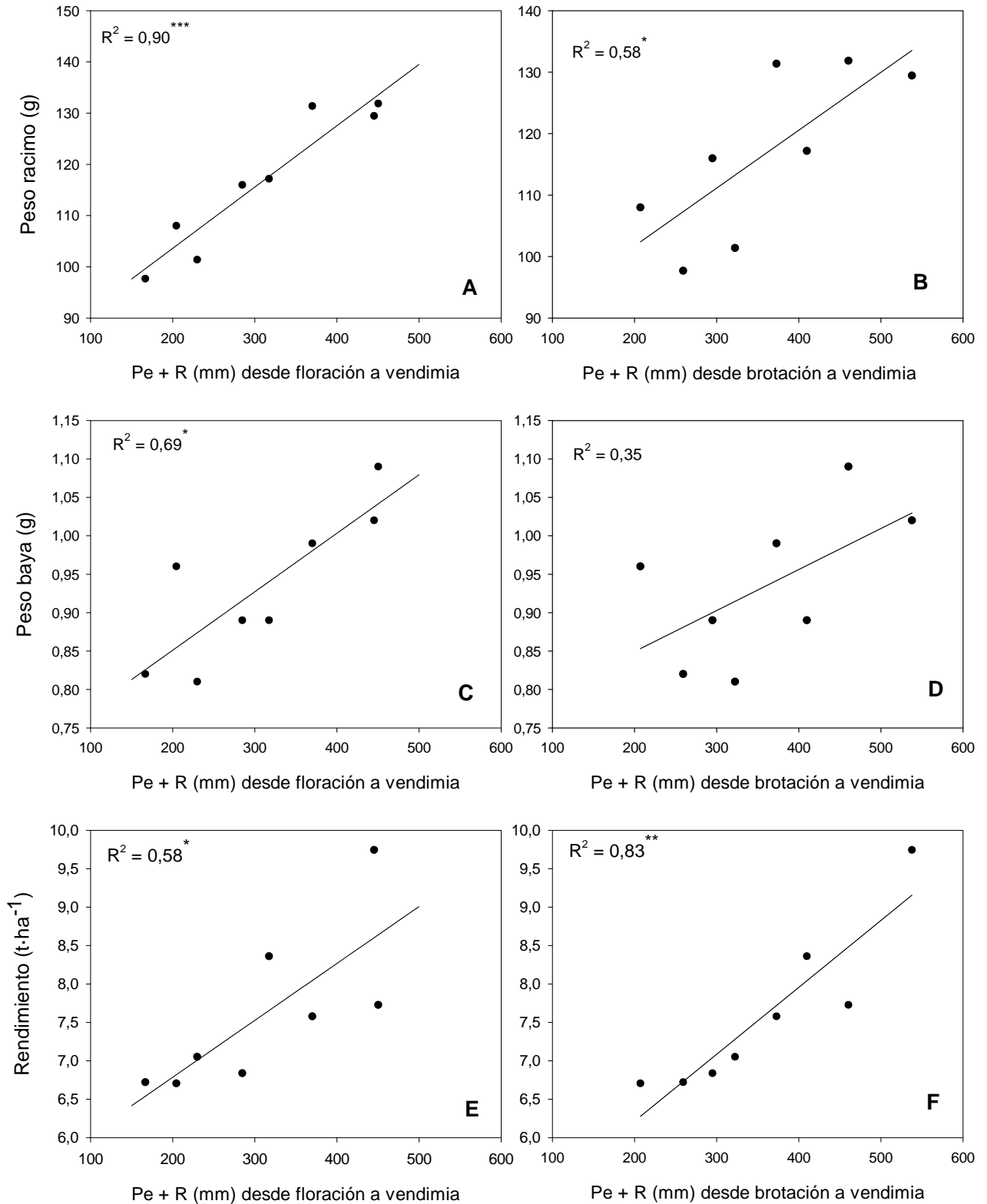


Figura VI.3: Relación entre el agua aplicada (Pe + R; precipitación efectiva + riego) desde floración a vendimia (gráficas de la izquierda) y desde brotación a vendimia (gráficas de la derecha); y el peso del racimo (g) (gráficas A y B); el peso de baya (g) (gráficas C y D); y el rendimiento ($t \cdot ha^{-1}$) (gráficas E y F). Coeficiente de determinación (R^2) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y $p < 0,05$).

VI.5 DISCUSIÓN:

Influencias particulares del volumen de agua y la estrategia de riego.

- Rendimiento

Hasta el segundo año de estudio (2011) no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento de uva debido al tratamiento impuesto. Esto se puede explicar mediante la movilización de carbohidratos de reserva que tiene lugar en la planta. Bajo condiciones de necesidad la planta moviliza sus carbohidratos, enmascarando así el efecto de las condiciones impuestas, déficit hídrico, en ese año. Certainly, en 2002, empleó el primer año del experimento, para determinar el número potencial de racimos por pámpano, antes de iniciar el ensayo. García-Escudero (1991) no encontró diferencias en el rendimiento entre tratamientos regados, y Reynolds *et al.* (2005) obtiene sólo el 10% más de cosecha en cepas de Concord, y 29 % en cepas de Niagara, al estudiar el efecto del riego frente al secano. En el presente estudio en 2010 se consigue aumentar la producción un 13% (DM_c vs T) y en 2011 un 30% más de cosecha en el tratamiento de déficit ligero (T) frente al tratamiento de déficit moderado continuo (DM_c).

En relación con la restricción de agua y la estrategia de riego, la diferencia existente en 2011 entre tratamientos (DM₁ y DM₂) indica que la disponibilidad de agua óptima antes de envero es más crítica para el rendimiento que la cantidad de agua aplicada durante la madurez. Acevedo *et al.* (2004) también dice que los diferentes regímenes hídricos aplicados después de envero no tienen efecto en el rendimiento final, además este autor encontró diferencias cuando los tratamientos se establecieron después de cuajado. Shellie (2006) dice que no hay diferencias en el rendimiento cuando compara restricción de agua antes de envero (35-70 % ET_c) con no restricción durante la fase de crecimiento (70-70% ET_c). En este trabajo se observan pérdidas de rendimiento del 20 % en los tratamientos sometidos a estrés a principio de temporada, frente a pérdidas del 8 % en las cepas sometidas a estrés durante la maduración. El riego no es tan influyente en el rendimiento durante la fase de maduración, si no, que es más influyente cuando se aplica a principio de temporada, de floración a pre-envero. Matthews *et al.* (1987) observaron pérdidas de rendimiento al someter a las plantas a déficit antes de envero, debido a un menor tamaño de las bayas, sin embargo cuando el déficit se aplicó después de envero no se observaron pérdida de rendimiento significativa. Reynolds *et al.* (1994) obtuvieron una relación inversa entre el crecimiento de la uva y la duración del estrés hídrico.

- **Componentes del rendimiento**

El **peso de la baya** es el componente del rendimiento más sensible a la restricción hídrica. Acevedo *et al.* (2004), Salon *et al.* (2005), and Reynolds *et al.* (2007) dicen que las diferencias encontradas en el rendimiento debido a la disponibilidad hídrica son debidas primeramente al peso de la baya. Intrigliolo y Castell (2009) obtienen diferencias en el peso de baya en los años de elevada cosecha, pero no encuentran estas diferencias con rendimientos bajos. En el presente ensayo, se obtienen diferencias estadísticas entre los tratamientos DM₁ (déficit a partir de pre-enero), DM₂ (déficit hasta pre-enero), lo que indica que tanto la multiplicación celular (fase I) como la expansión celular (fase II y III) se ven afectadas por la restricción hídrica.

El tratamiento de déficit moderado hasta pre-enero (DM₂) obtiene un 24 % de peso de baya menor que el tratamiento de déficit ligero (T). Y por otro lado, el tratamiento de déficit moderado a partir de pre-enero (DM₁) obtiene un peso de baya un 12 % menor que T. La reducción en el peso de la baya debido al déficit moderado es mayor cuando se aplica la restricción hídrica en la fase I. Esto mismo encontraron otros autores como Ojeda *et al.* (2002), Acevedo *et al.* (2004), Junquera *et al.* (2012), lo cual quiere decir que el déficit hídrico post cuajado es más crítico que el déficit hídrico post enero.

Por otro lado, el tratamiento de total disponibilidad hídrica (T) desde floración es el que alcanza el tamaño de baya mayor (1,09 g en 2010 y 1,02 g en 2011), seguido por DM₁ (0,99 g en 2010 y 0,89 g en 2011) y terminando con los tratamientos de déficit moderado continuo (DM_c) y déficit moderado hasta pre-enero (DM₂). Ezzahouani and Williams (2007) obtienen mayores pesos de baya en los tratamientos que han sido regados en todo el periodo, seguido por los tratamientos con riego hasta enero y finalmente los tratamientos con riego hasta cuajado.

Estos resultados sostienen la importancia del manejo del agua y su uso eficiente (rendimiento por mm de agua aplicados) en consideración con las estrategias y planificación del riego en el viñedo.

La **fertilidad** expresada como racimos por sarmiento o bayas por racimo, es el componente del rendimiento que menos le afecta el déficit hídrico. Salon *et al.* (2005) y Intrigliolo y Castell (2009, 2010) obtienen respuestas similares encontrando diferencias entre seco y regadío, pero no entre diferentes dosis de riego.

- **Crecimiento vegetativo**

La importancia de la superficie foliar radica en la síntesis de los fotoasimilados y azúcares que aseguran la correcta maduración de la uva. El movimiento de fotoasimilados a lo largo del pámpano depende del desarrollo vegetativo y reproductivo existiendo competencia entre estos.

Smart y Robinson (1991) recomiendan de 10 a 15 hojas para una maduración correcta. En el ensayo los pámpanos de los 4 tratamientos desarrollaron entrenudos cortos (5 – 8 cm de media), que para la altura de vegetación definida, 90 cm de media (valor no mostrado en los resultados), permitió el desarrollo de un número de hojas principales adecuado para una correcta maduración (entre 11 y 18 hojas por pámpano). Estos valores corresponden a los valores medios de la espaldera, una vez despuntada.

Los pámpanos de las cepas que recibieron agua al principio, a partir de floración, cuentan con mayor número de anticipados y con mayor área foliar de nietos (72 cm T y 84 cm DM₁). El mayor número de nudos que tuvieron puede ser una de las causas (34 nudos T y 36 nudos DM₁).

- **Caracterización de la superficie foliar. Efecto del riego sobre la densidad y la disposición de la vegetación.**

El desarrollo del área foliar está altamente influenciada por el estado hídrico de la planta. Varios autores como Bartolomé (1993), Cuevas (2001), Rubio (2002) y Deloire, *et al.*, (2004), han observado el aumento del área foliar debido al riego. Por otro lado, Kliewer, *et al.* (1983), Matthews, *et al.* (1987) y Williams, *et al.* (1987) han comprobado que se produce un mayor crecimiento de los pámpanos en plantas con mayor disponibilidad hídrica, lo que motiva que el desarrollo foliar de los pámpanos de plantas regadas sea mayor que el de plantas no regadas. Paranychianakis, *et al.* (2004) y Hardie, *et al.* (2000) obtuvieron una correlación positiva entre el crecimiento del pámpano y el contenido de agua en el suelo.

En este trabajo los tratamientos que se empezaron a regar desde floración (T y DM₁) son los que desarrollan un *canopy* mayor (T= 4,20 y DM₁= 4,17 m² de área foliar por cepa), que se corresponden también con los tratamientos que más agua recibieron.

Cuando las cepas están conducidas en espaldera, y se realizan despuntes con más o menos regularidad y severidad, no puede haber mucha variación en el área

foliar total, salvo por el desarrollo de nietos que no estén despuntados. Las diferencias en el desarrollo de la superficie foliar total de nuestro trabajo son debidas a las diferencias existentes en la superficie foliar de nietos.

Por otro lado, el riego estimula el desarrollo del área foliar de los anticipados en mayor grado que el área foliar del principal (Barbagallo *et al.*, 1996; Williams y Matthews, 1990). La influencia del régimen hídrico se da, principalmente, sobre el número de hojas de anticipados por pámpano, influencia mayor que la que ejerce sobre el número de hojas principales por pámpano (Barbagallo *et al.*, 1996). En este trabajo se observa un efecto claro de la disponibilidad hídrica sobre el desarrollo foliar de nietos, existiendo un escalonamiento de superficie foliar de nietos desarrollada en función del volumen de agua aplicado. A mayor agua, mayor superficie de nietos.

En esta variedad es muy interesante el control del desarrollo foliar, porque la variedad Cabernet es conocida por la producción de piracinas que dan sabores a pimiento en el vino, este fenómeno se potencia con el aumento del desarrollo vegetativo, sobre todo con los nietos.

El área foliar expuesta (SFE) es la que contribuye principalmente a las tasas fotosintéticas globales de la cepa, no sirve de nada desarrollar muchas hojas si no están bien expuestas. Se calculó la relación entre la superficie foliar expuesta y la superficie foliar total (SFE/SFT). Smart, *et al.* (1991) proponen que la relación entre la superficie foliar total y superficie foliar expuesta deberá ser inferior a 1,5 ($SFT/SFE < 1,5$) o lo que es lo mismo que $SFE/SFT > 0,67$. En este trabajo los tratamientos que reciben menos agua están por encima de 0,67; $DM_c = 0,84$ y $DM_2 = 0,76$, y por otro lado T y DM_1 , los que más agua reciben, están alrededor de 0,63, próximos al límite marcado por Smart *et al.*, (1991). Existiendo diferencias estadísticas entre tratamientos debido al régimen hídrico.

En cuanto a la disposición de la vegetación los cuatro tratamientos obtuvieron una buena exposición de hojas, pero, sin embargo, la densidad de vegetación (SFT/Vol) no fue exactamente igual. Teniendo en cuenta que la poda en pulgares permitió al pámpano medio de cada tratamiento un espacio medio de 10 cm. Las diferencias en la longitud del entrenudo, en el número de nudos, y por lo tanto, el número de órganos insertos en ellos (hojas, tallos de nietos y racimos) y el tamaño de los mismos, condicionó su distribución espacial, la densidad y la porosidad del *canopy*.

- **Relación vegetativo – reproductivo.**

Según Murisier (1996) el **peso de madera de poda** está muy bien correlacionado con la superficie foliar total y puede ser un criterio interesante para apreciar la acumulación potencial de azúcares en la baya; el valor óptimo de peso de madera con el peso de uva se sitúa en torno a los 200-250 g de sarmiento por kg de uva producido para obtener 18,2°Brix.

La relación entre el crecimiento vegetativo y el rendimiento es uno de los factores que más afectan a la evolución de la maduración. En el presente trabajo existen diferencias significativas en el Índice de Ravaz en la media de los 2 años, donde los tratamientos sometidos a estrés desde floración hasta pre-verano obtienen mejor relación vegetativo/reproductivo y están dentro del intervalo óptimo (de 4 a 7) propuesto por Smart *et al.*, 1991 y Murisier 1996 en Rubio 2002, (4,9; 4,3 en DM_c y DM₂ respectivamente). Mientras que los tratamientos que más agua reciben T y DM₁ se quedan por debajo del intervalo (3,8). La aplicación de diferentes dosis y la estrategia de riego utilizada alteran el equilibrio vegetativo-reproductivo.

La superficie foliar desarrollada y su disposición tienen un papel importante en el rendimiento y en la calidad final. El área foliar y el número de hojas son los principales determinantes de la productividad de la planta. Por eso, algunos autores han descrito situaciones óptimas a través de ratios como superficie foliar total o externa por kg de uva y peso de cosecha por peso de madera de poda (Bravdo *et al.* 1985, Smart and Robinson 1991, Howell 2001, Kliewer and Dokoozlian 2005).

Generalmente el rango de valores considerados como óptimos es bastante amplio y depende del material vegetal, de la región o de la proporción de superficie foliar expuesta. Smart y Robinson (1991) y Hunter (2000) proponen 12 cm²·g⁻¹, Bertamini *et al.*, (1995) 1 m² de superficie foliar por cada kg de uva, Dokoozlian y Hirschfeld (1995a), Kliewer (1970) y Kliewer y Weaver (1971), utilizan un margen más amplio diciendo, que el desarrollo y composición de los racimos, son óptimos cuando la relación entre la superficie foliar y el rendimiento se sitúa entre 7 y 14 cm²·g⁻¹, y que valores por debajo de este intervalo disminuyen el peso de la baya, el color y el TSS. Para las condiciones semiáridas donde se desarrolla el ensayo Baeza y Lissarrague (2001) proponen entre 0,8 – 1,5 m²·kg⁻¹ para garantizar un óptimo equilibrio vegetativo – reproductivo. En la media de los dos años de estudio los tratamientos de déficit moderado continuo (DM_c) y déficit moderado hasta pre-verano (DM₂) se encuentran dentro de este intervalo DM_c = 1,36 y DM₂ = 1,47 m² de superficie foliar por cada kg de uva, pero los tratamientos de déficit ligero (T) y de déficit moderado a partir de pre-

envero (DM_1) están fuera de rango, $T = 1,64$ y $DM_1 = 1,79 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Además esta relación refleja la menor eficiencia de los tratamientos que reciben más agua, ya que necesitaron un 21 % T y un 32 % DM_1 más de superficie foliar que las plantas sometidas a déficit moderado continuo para producir 1 kg de cosecha.

Muchos autores sostienen que el índice entre la superficie foliar expuesta y el rendimiento es más adecuado (Schneider, 1992; Murisier, 1993; Murisier y Zufferey, 1997). Murisier y Zufferey (1997) sitúan entre 1,0 y $1,2 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ los valores óptimos para el equilibrio vegetativo-reproductivo, e indican que las relaciones muy bajas son negativas, no solo para la cosecha, sino también para la planta, pues agotan las reservas de almidón, y las muy altas originan un excesivo desarrollo vegetativo. En este trabajo todos los tratamientos, en la media de los dos años, se encuentran dentro del intervalo con valores entre 1,01 y $1,12 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, disponiendo de una adecuada superficie foliar externa para la obtención de una cosecha cuantitativa y cualitativa.

Acumulación de biomasa y su reparto.

Miller *et al.* (1996) describen un comportamiento doble sigmoideal en la acumulación de materia seca en la planta entera, donde se distinguen dos periodos de crecimiento: uno entre desborre y floración, y otro entre cuajado y maduración; y dos periodos donde el crecimiento es más lento: uno durante la floración y otro al final del periodo vegetativo.

Miller, *et al.* (1996) y Yuste (1995) obtuvieron relaciones lineales entre el área foliar desarrollada y la materia seca acumulada. Por otro lado, Bravdo, *et al.* (1972), Gómez del Campo (1998) y Cuevas (2001) también observaron que las plantas con mayor producción de biomasa fueron las que consumieron mayor cantidad de agua, debido a que la actividad fotosintética de la planta está favorecida por el agua consumida, llegándose así a una mayor acumulación total de materia seca en plantas colocadas en lisímetros, obteniendo un incremento de 100 gramos de materia seca por cada $0,18 \text{ m}^2$ de superficie foliar.

La disponibilidad hídrica generalmente aumenta la productividad de materia seca ya que la falta de agua es uno de los factores limitantes de la actividad fisiológica de la planta (Albuquerque, 1993). En el presente estudio, la productividad de materia seca se ve afectada por la disponibilidad hídrica de la planta, $0,61$ y $0,58 \text{ kg/m}^2$ en T y DM_1 respectivamente frente a $0,44 \text{ kg/m}^2$ de DM_c y DM_2 . Y no por la estrategia de riego.

Sipiora (2005) concluye que el comportamiento de la acumulación de materia seca del *canopy* fue más parecido al de la acumulación en racimos, demostrando la importancia del número de racimos o sumideros sobre la productividad de las cepas en su ensayo. Esta relación entre la cantidad de materia seca producida por la cepa y el rendimiento en uva ya ha sido puesta de manifiesto por otros autores (Fregoni 1977; Gómez del Campo 1998; Sánchez-Llorente 2004; Centeno 2005) donde se observa que pequeños incrementos en la acumulación de materia seca total se corresponden con incrementos superiores en el rendimiento final.

El peso seco medio de los racimos por pámpano principal no presenta un incremento importante hasta cuajado (Sipiora 2005). En el periodo de maduración se han definido dos fases según la tasa de acumulación de materia seca de los racimos, de forma que el ritmo de acumulación cambia a partir de los 750-1000 grados.día (Gutiérrez *et al.* 1985; Williams 1987; Sipiora 2005) en las variedades Cabernet Sauvignon, Tempranillo, Chenin Blanc, Zinfandel, Pinot Noir y Thompson Sedles, pasando entonces a ser el racimo el principal sumidero y frenándose así la acumulación de materia seca vegetativa. En el presente trabajo se ha observado que la materia seca durante el periodo de crecimiento de la baya manifiesta cambios mayores en las partes reproductivas que en las vegetativas. Además, también ha habido más cambios en las dosis de riegos más altas respecto a los tratamientos de déficit más severo.

En general se observa una importante acumulación de materia seca en los racimos durante todo el periodo de crecimiento de la baya, con incrementos parejos en T y DM₁ por un lado, y DM_c y DM₂ por otro lado. Los racimos representaron un 15 % en cuajado, no existiendo diferencias significativas debido al agua aplicada, entorno a 40±3 % en cierre de racimos, y entre el 50-57 % de la biomasa total almacenada por el sarmiento en vendimia, existiendo diferencias significativas entre tratamientos. Gómez del Campo (1998) observó en maduración, en 4 variedades, que los racimos representaban el 45% de la materia seca total de los órganos renovables, tanto en no estrés como en estrés hídrico. Por otro lado Sánchez de Miguel (2007) observó en Cabernet Sauvignon que los racimos representaban el 50 % de la biomasa total almacenada por el sarmiento en prácticamente toda la maduración.

Williams and Biscay (1991) cuantificaron en Cabernet Sauvignon una acumulación media de materia seca en el tronco de 250 g. cepa⁻¹·año⁻¹ durante 18 años; Mullins *et al.* (1992) en Chenin Blanc y durante un periodo de 12 años obtuvieron una media en

tronco y cordones de 300 g. cepa⁻¹·año⁻¹, y en 10 años la media fue de 638 g. cepa⁻¹·año⁻¹.

Relación entre el volumen de agua aplicado (riego + lluvia) en el rendimiento y sus componentes.

Cuando la lluvia es considerada parte del agua disponible para la planta, se observa una relación lineal significativa entre el volumen de agua recibido (riego más lluvia) y la respuesta del rendimiento. Esto muestra que, en condiciones deficitarias el volumen de agua es más determinante para la producción de uva que la estrategia de riego empleada. Marsal *et al.* (2008) obtuvo relación lineal entre el agua de riego y el rendimiento, mientras que otros autores, como Myburg (2011) observó la misma relación cuando consideró tanto el agua de riego como el de la lluvia. La tendencia fue similar en todos estos experimentos, pero los rendimientos finales varían según las condiciones del ensayo (cultivar, carga en yemas, marco de plantación, etc). Finalmente, hay estudios donde comparan la técnica (PRD) con el riego deficitario convencional, y no se ha encontrado ninguna diferencia significativa entre el rendimiento y otros componentes del mismo, para volúmenes de agua iguales (Gu *et al.*, 2004; Marsal *et al.*, 2008; Intrigliolo y Castell 2009). Además las diferencias significativas que se encontraron al utilizar diferentes dosis de riego, fueron debidas principalmente al volumen de agua y no a la estrategia empleada.

Se ha estudiado la relación entre el agua aplicada al viñedo (riego más lluvia) y el rendimiento y sus componentes, observando que existe correlación lineal con todos los datos de las dos campañas estudiadas. Esto indica que independientemente de los resultados de cada año, la disponibilidad hídrica tiene significativo efecto a largo plazo en el rendimiento.

La disponibilidad hídrica desde brotación hasta vendimia explica el 83 % de las diferencias en el rendimiento, obteniéndose una explicación mayor que si contabilizamos sólo el agua aplicada de floración a vendimia ($R^2 = 0,58$), indicando que el rendimiento final está altamente influenciado por el volumen de agua disponible durante el proceso activo de la cepa.

García-Escudero *et al.* (2000) obtuvieron incrementos en el rendimiento con el riego, debido al aumento del peso del racimo y de la baya y a un mayor número de racimos por cepa, lo que se puede asociar con el efecto constatado del riego sobre el proceso de inducción floral y la fertilidad de las yemas (Bravdo, *et al.*, 1984a; Matthews, *et al.*, 1989). Estudios anteriores describen la primera fase de desarrollo de

la baya como la etapa más sensible a la disponibilidad hídrica Dry *et al.*, 2001; McCarthy 1997; Ojeda *et al.*, 2001. Hardie *et al.* (1976) obtuvieron grandes pérdidas de rendimiento en uva causado principalmente por un reducido cuajado, mediante condiciones de déficit hídrico durante 3 semanas después de floración. En el presente trabajo el peso del racimo obtiene una relación lineal significativa con el agua aplicada (riego mas lluvia) desde floración a vendimia, ($R^2 = 0,90$), este depende del número de bayas por racimo y del peso de baya. Ambas componentes se determinan a partir de floración y están altamente relacionadas con la disponibilidad hídrica de la planta.

VI.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Acevedo, C. and S. Ortega-Farías. 2004. Effect of three levels of water application during post-setting and post-veraison over vegetative development, productivity and grape quality on cv. Cabernet Sauvignon. *Acta Hortic.* 646: 143-146
- Albuquerque-Regina, M. 1993. Responses des cepages de *Vitis vinifera* L. aux variations de l'environnement: effets de la contrainte hydrique sur la photosynthese, la photorespiration et la teneur en acide abscissique des feuilles. *Francia., Universite de Bordeaux II*: 213.
- Baeza, P. and J.R. Lissarrague. 2001. Definición y evaluación de los sistemas de conducción del viñedo. *La conducción de la vid. Gobierno de la Rioja*: 11-21.
- Bartolomé, M. C. 1993. Respuestas de la vid (*V. vinifera* L.) a condiciones de estrés hídrico: efectos sobre las relaciones agua-planta, el crecimiento, la producción y la calidad (cv. Tempranillo). *Producción Vegetal: Fitotecnia. E.T.S.I. Agrónomos. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid*: 445.
- Barbagallo, M.G., RD. Lorenzo, A. Motisi and I. Sottile. 1996. Estimation of leaf area by a model of leaf area changes along the primary shoot in grapevine. *Actas de GESCO*. 240-250.
- Bertamini, M., K. Muthuchelian, M. Falcetti and M. Stefanini (1995). Risposta di alcuni genotipi alla diversa intensità della potatura invernale. Nota 1: Effetti sull'attività vegeto-produttiva a sulla composizione dei mosti. *Rivista di Viticoltura e di Enologia* 48 (1) 3-20.
- Bravdo, B., S. Lavee, and R.M. Samish. 1972. Analysis of water consumption of various grapevine cultivars. *Vitis* 10: 279-291.
- Bravdo, B., Y. Hepner, C. Loinger, S. Cohen, and H. Tabacman. 1984. Effect of crop level on growth, yield, and wine quality of a high yielding Carignane vineyard. *Am. J. enol. vitic* 35(4): 247-252.
- Bravdo, B., Y. Hepner, C. Loinger, S. Cohen, H. Tabacman. 1985. Effect of crop level and crop load on growth, yield, must and wine composition, and quality of Cabernet Sauvignon. *Am. J. Enol. Vitic.* 36: 125-131.
- Carbonneau, A. 1976. Principes et méthodes de mesure de la surface foliaire. Essai de caractérisation des types de feuilles dans la genre *Vitis*. *Ann. Amélior. Plantes* 26: 327-343.
- Carbonneau, A. 1996. General relationship within the whole-plant: examples of the influence of vigour status, crop load and canopy exposure on the sink "berry maturation" for the grapevine. *Acta Horticulturae* 427: 99-118.
- Centeno, A. 2005. Evaluación del comportamiento de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) en condiciones de déficit hídrico: efectos sobre el estado hídrico, crecimiento, rendimiento, biomasa y composición de la uva. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. Agrónomos. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia.: 193.
- Chaves, M.C., C.R. Souza, T.P. Santos, M.F. Ortuno, M.L. Rodrigues, C.M. Lopes, J.P. Maroco, and J.S. Pereira. 2007. Deficit irrigation in grapevine improves water-

- use efficiency while controlling vigour and production quality. *Ann. Appl. Biol.* 150:237-252.
- Coombe, B.G. 1995. Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. *Aust. J. Grape Wine Res.* 1(2): 104-110.
- Cortell, J.M., M. Halbleib, AV. Gallagher, T. Righetti, and J.A Kennedy. 2005. Influence of vine vigor on grape (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) and wine proanthocyanidins. 1. *Agric. Food Chem.* 53:5798-5808.
- Cortell, J.M., M. Halbleib, A.V. Galagher, T.L. Righetti, and J.A. Kennedy. 2007. Influence of vine vigor on grape (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) anthocyanins. 1. Anthocyanin concentration and composition in fruit. *J. Agric. Food Chem.* 55:6575-6584.
- Cuevas, E. 2001. Estudio de mecanismos de adaptación ecofisiológica de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) al déficit hídrico. Evaluación del consumo de agua y de las respuestas agronómicas en diferentes regímenes hídricos. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.: 219.
- Deloire, A., A. Carbonneau, Z. Wang, H. Ojeda. 2004, Vine and water, a short review. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 38: 1-13.
- Dokoozlian, N. and D. J. Hirschfeld. 1995a. The influence of cluster thinning at various stages of fruit development on Flame seedless table grapes. *Am.J.Enol. Vitic.* 46(4): 429-436.
- Dry, P.R., B.R. Loveys, M.G. McCarthy and M. Stoll. 2001. "Gestion des stratégies d'irrigation dans les vignobles australiens." *Progrès Agricole et Viticole* 118(21): 457- 470.
- Escalona, J.M. 2003. Respuestas de la vid frente al déficit hídrico: efectos sobre la fotosíntesis y la transpiración en hoja y en planta entera y su repercusión en la calidad del fruto. Tesis Doctoral. Facultad de Ciències de la Universitat de les Illes Balears. Mallorca: 193.
- Esteban, M.A., M.J. Villanueva, J.R. Lissarrague. 1999. Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugar, organic acids, and mineral elements. *Am. J. Enol. Vitic.* 50: 418-434.
- Ezzahouani, A. and L. Williams. 2007. Effect of Irrigation Amount and Preharvest Irrigation Cutoff Date on Vine Water Status and Productivity of Danlas Grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* Vol. 58 n°. 3, 333-340.
- Fereres, E. and Evans R.G. 2006. Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. *Irrig Sci* 24:55–57
- Fregoni, M. 1977. Irrigation des vignobles. Problemes de physiologie, de biochemie, de génétique d'agronomie, de technologie et d'économie. *Bulletin O.I.V.* 551: 3-19.
- Fregoni, M. 1984. Nutrient needs in vine production. 18 th Coll. Int. Post. Ins. Bern, pp. 319-332.

- García-Escudero, E., P. Aquilué, R. López, and I. Palacios. 1991. Aplicación de dosis moderadas de agua en el proceso de maduración de cv. Tempranillo en Rioja. *Vitivinicultura* 1: 30-34.
- García-Escudero, E., R. López, P. Santamaría, and O. Zaballa. 1997. Ensayos de riego localizado en viñedos productivos de cv. Tempranillo. *Viticultura y Enología Profesional* 50: 37- 47,
- García-Escudero, E., R. López, P. Santamaría and O. Zaballa 2000. Control de rendimiento en viñedos conducidos en régimen de riego localizado. *Viticultura y Enología Profesional* 69: 12-24.
- Gómez del Campo, M. V. 1998. Mecanismos de adaptación a sequía en la vid. Evaluación del consumo de agua, crecimiento y desarrollo vegetativo, productividad y eficiencia en el uso del agua de cuatro genotipos de vid. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Producción Vegetal: Fitotecnia. Universidad Politécnica de Madrid: 383.
- Grimes, W. and L. E. Williams. 1990. Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson seedless grapevines. *Crop Science* 30: 255-260.
- Gu, S., G. Du, D. Zoldoske, A Hakim, R. Cochran, K. Fugelsang, and I. Gorgensen. 2004. Effects of irrigation amount on water relations, vegetative growth, yield and fruit composition of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc grapevines under partial root-zone drying and conventional irrigation in the San Joaquin Valley of California, USA *J. Hort. Sci. Biotech.* 79:26-33.
- Gutiérrez, A. P., D. W. Williams and H. Kido. 1985. A model of grape growth and development: the mathematical structure and biological consideration. *Crop Science* 25(5): 721-728.
- Hardie, W. J. and J. A. Considine. 1976. Response of grapes to water deficit stress in particular stages of development. *American Journal of Enology and Viticulture* 27: 55-61
- Hardie W.J., and S.R. Martin. 2000. Shoot growth on de-fruited grapevines: a physiological indicator for irrigation scheduling. *Australian Journal of Grapes and Wine Research* 6: 52–58.
- Howell, G.S. 2001. Sustainable grape productivity and the growth-yield relationship: A review. *Am. J. Enol. Vitic.* 52: 165-174.
- Hunter, J.J. 2000. Implications of seasonal canopy management and growth compensation in grapevine. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 21(2): 81-91.
- Intrigliolo D.S., Castel J.R., 2009a. Response of *Vitis vinifera* cv. 'Tempranillo' to partial rootzone drying in the field: water relations, growth, yield and fruit and wine quality. *Agric Water Manage* 96, 282-292
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2010. Response of grapevine cv. Tempranillo to timing and amount of irrigation: water relations, vine growth, yield and berry and wine composition. *Irrig. Sci.* 28, 113–125.
- Junquera, P., J.R. Lissarrague, L. Jiménez, R. Linares and P. Baeza. 2012. Long-term effects of different irrigation strategies on yield components, vine vigor, and

- grape composition in cv. Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera* L.). *Irrig Sci.* 30: 351-361.
- Keller, M. 2005. Deficit irrigation and vine mineral nutrition. *Am. J. Enol. Vitic.* 56: 267-283.
- Kliewer, W.M. 1970. Influence of defoliation, leaf darkening and cluster shading on the growth and composition of Sultana grapes.
- Kliewer, W.M. and R.J. Weaver. 1971. Effect of crop level and leaf area on growth, composition and coloration of Tokay grapes. Annual meeting of the American Society of Enologist.
- Kliewer, W.M., B.M. Freeman, and C. Hosson. 1983. Effect of irrigation, crop level and potassium fertilization on Carignane vines. I. Degree of water stress and effect on growth and yield. *Am. J. Enol. Vitic.* 34:186-196.
- Kliewer, W.M., N.K. Dokoozlian. 2005. Leaf area / crop weight ratios of grapevines: Influence on fruit composition and wine quality. *Am. J. Enol. Vitic.* 56: 170-181.
- Kriedemann, P.E., and I. Goodwin. 2003. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying: an overview of principles and applications. *Irrigation insights* no. 4. (Land and Water Australia: Canberra).
- Lopes, C. M., and Pinto, P. A. 2000. Estimation de la surface foliaire principale et secondaire d'un sarment de vigne. *Prog. Agric. Vitic.* 117, 160-166.
- Mabrouk, H., H. Sinoquet and A. Carbonneau. 1997. Canopy structure and radiation regime in grapevine II: Modelling radiation interception and distribution inside the canopy. *Vitis* 36(3): 125-132.
- Marsal J, M. Mata, J. del Campo, A. Arbones, X. Vallverdú, J. Girona, and N. Olivo. 2008. Evaluation of partial root-zone drying for potential use as a deficit irrigation technique in commercial vineyards according to two different pipeline layouts. *Irrig Sci.* 26:347–356
- Matthews, M., M. Anderson and H. Schultz. 1987. Phenologic and growth response and late season water deficits in Cabernet franc. *Vitis* 26: 147-160.
- Matthews, M. and M. Anderson. 1988. Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 39(4): 313-320.
- Matthews, M. and M. Anderson. 1989. Fruit reproductive development in grape (*Vitis vinifera* L.) responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 40(1): 52-59
- McCarthy, M.G. 1997. The effect of transient water deficit on berry development of cv. Shiraz (*Vitis vinifera* L.). *Aust. J. Grape Wine Res.* 3: 102-108.
- McCarthy, M.G., B. Loveys, P. Dry, and M. Stoll. 2002. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. pp. 79-87. In: *Deficit irrigation practices*, FAO Water Reports No. 22 Rome, Italy.

- Miller, D. P., G. S. Howell and J. A. Flore 1996. Effect of shoot number on potted grapevines. II. Dry matter accumulation and partitioning. *American Journal of Enology and Viticulture* 47(3)(3): 251-256
- Mullins, M. G., A. Bouquet and L. E. Williams 1992. Developmental physiology: the vegetative grapevine. *Biology of the grapevine*. M. G. B. Mullins, A. Williams. L.E. Cambridge. U.K, Cambridge University Press: 80-111.
- Murisier, F., M. Ferretti. 1996. Densité de plantation sur le rang: effets sur le rendement et la qualité du raisin. Essai sur Merlot au Tessin. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 28: 293-300.
- Myburgh, P.A. 2011. Response of *Vitis vinifera* L. cv. Merlot to Low Frequency Irrigation and Partial Root Zone Drying in the Western Cape Coastal Region. Part II. Vegetative Growth, Yield and Quality. *S. Afr. J. Enol. Vitic.*, Vol. 32, N^o. 1. 104-116.
- Ojeda, H., A. Deloire and A. Carbonneau. 2001. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* 40(3): 141-145.
- Ojeda, H., C. Andary, E. Kraeva, A. Carbonneau and A. Deloire. 2002. Influence of Pre- and Postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture* 53(4): 261-267
- Paranychianakis, N.V., K.S. Chartzoulakis and A.N. Angelakis. 2004. Influence of rootstock, irrigation level and recycled water on water relations and leaf gas exchange of Soultanina grapevines. *Agricultural Water Management* 69(1): 13-27
- Petrie R.P., MCT. Trought and GS. Howell. 2000. Fruit composition and ripening of Pinot Noir (*Vitis vinifera* L.) in relation to leaf area . *Australian Journal of Grape and Wine Research* 6, 40-5.
- Reynolds, A.G., D.A. Wardle. 1994. Impact of training system and vine spacing on vine performance and berry composition of Seybal blanc. *Am. J. Enol. Vitic.* 45: 444-451.
- Reynolds, A.G., T. Molek, C. De Savigny. 2005. Timing of shoot thinning in *Vitis vinifera*: Impacts on yield and fruit composition variables. *Am. J. Enol. Vitic.* 56: 343-356.
- Reynolds, A. G., I. V. Senchuk, C. van der Reest, and C. de Savigny. 2007. Use of GPS and GIS for elucidation of the basis for terroir: Spatial variation in an Ontario Riesling vineyard. *Am. J. Enol. Vitic.* 58: 145-162.
- Romero, P., J.I. Fernández-Fernández, A. Martínez-Cutillas. 2010. Physiological thresholds for efficient regulated deficit-irrigation management in winegrapes grown under semiarid conditions. *Am. J. Enol. Vitic.* 61:3 (300-312).
- Rubio, J. A. 2002. Riego y aclareo racimos: efectos en la actividad fisiológica, en el control del rendimiento y en la calidad de la uva del cv. Tempranillo (*Vitis vinifera* L.). Tesis Doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid: 254.

- Rühl, E. and Alleweldt, G. 1985. Investigations into the influence of time of irrigation on yield and quality of grape-vines. Water relations in Fruit Crops. Acta Horticulturae 171: 457-462.
- Salón, J.L., C. Chirivella, JR. Castel JR. 2005. Response of *Vitis Vinifera* cv. Bobal to deWcit irrigation in Requena, Spain. Water relations, yield and wine quality. Am J En Vitic 56:1–18
- Sánchez-de-Miguel, P. 2007. Producción y distribución de fotoasimilados en la vid (*Vitis vinifera* L.) durante el periodo de maduración. Cambios en la respuesta fotosintética a la luz de las hojas por factores biológicos, ambientales y culturales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez de Miguel P, P. Junquera, M. de la Fuente, L. Jiménez, R. Linares, P. Baeza and JR. Lissarrague. 2011. Estimation of vineyard leaf area by linear regression. Span. J. Agric. Res. 9 (1): 202-212.
- Sánchez-Llorente, P. 2004. Respuesta de la vid (*Vitis vinifera* L., cv. Tempranillo) en relación a la evolución del contenido de agua en el suelo en regímenes hídricos deficitarios. Tesis Doctoral. E.T.S.I.Agrónomos. Producción Vegetal: Fitotecnia. Universidad Politécnica de Madrid: 228.
- Schultz, H.R. 1995. Grape canopy structure, light microclimate and photosynthesis. I. A two-dimensional model of the spatial distribution of surface area densities and leaf ages in two canopy systems. Vitis 34: 211-215.
- Schultz, H.R. 1996. Leaf absorptance of visible radiation in *Vitis vinifera* L.: estimates of age and shade effects with a simple field method. Scientia Hort. 66: 93-102.
- Shellie, K.C. 2006. Vine and berry response of Merlot (*Vitis vinifera*) to differential water stress. Amer. J. Enol. Viticult. 57:514–518.
- Sipiora, M. J. 2005. Influencia de la densidad de pámpanos por metro de cordón sobre la variedad de vid (*Vitis vinifera* L.) Tempranillo en seco y regadío. Comportamiento agronómico, fisiológico y modelos descriptivos del desarrollo de la vid. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. Madrid, E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.: 256.
- Smart, R.E. 1974. Aspects of wáter relations of the grapevine (*Vitis vinífera*). Am. J. enol. Vitic 25(2): 84-91.
- Smart, R.E., N.J. Shaulis, R.E. Lemon. 1982. The effect of Concord vineyard microclimate on yield. I. The effect of pruning, training, and shoot positioning on radiation microclimate. Am. J. Enol. Vitic. 33: 99-108.
- Smart, R. E. and B. G. Coombe. 1983. Water relations of grapevines. Water deficits and plant growth. T. T. Kozlowski. New York, Academic Press. VII: 137-196.
- Smart, R. E. 1985. Principles of grapevine canopy management microclimate manipulation with implications for yield and quality. A Review. Am. J. Enol. Vitic. 36, 230-239.
- Smart, R. and M. Robinson. 1991. Sunlight into wine. A handbook for winegrape canopy management. Adelaide, Winetitles. 88.

- Tandonnet, J.P., N. Ollat. 2001. Etude de l'influence du porte-greffe et de l'intergreffe sur la physiologie de la vigne. En: Journées GESCO, 12. Compte rendu. Vol 1. Montpellier. 377-383.
- Tregoat, O., Van Leeuwen, C., Chone and Gaudillère. 2002. Étude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. *J. Int. Sci. Vigne Vin.* 36(3): 133 - 142.
- Williams, L. E. 1987. Growth of "Thompson seedless" grapevines: I - Leaf area development and dry weight distribution. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 112(2): 325-330.
- Williams, L. E. 1996. Grape. Photoassimilate Distribution in Plants and Crops: Source-Sink Relationships. E. Zamski and S. A.A. New York, Marcel Dekker, Inc.: 851-881.
- Williams, L. E. and D. W. Grimes. 1987. Modelling vine growth- development of a data set for a water balance subroutine. Proceedings of VI Australian wine industry Technical Conference, South Australia, 169-174.
- Williams, L. E., NK Dokoozlian and R. Wample. 1994. Grape. Handbook of environmental physiology of fruit crops. I: 86-118.
- Williams, L. E. and P. J. Biscay. 1991. Partitioning of dry weight, nitrogen and potassium in Cabernet Sauvignon grapevines from anthesis until harvest. *Am. J. Enol. Vitic* 42(2): 113-117.
- Williams, L. E. and M. A. Matthews 1990. Grapevine. Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy monograph. 30: 1019-1055.
- Yuste, J. (1995). Comportamiento fisiológico y agronómico de la vid (*Vitis vinífera* L.) en diferentes sistemas de conducción en secano y regadío. Tesis Doctoral. Madrid, E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid: 280.
- Zufferey V., and F. Murisier. 1996. Charge en bourgeons et microclimate lumineux du feuillage de la vigne. *Revue Suisse de viticulture, arboriculture and horticulture* 28(2): 139-141.
- Zufferey V., F. Murisier, and P. Monney. 1998. Interception du rayonnement solaire par la vigne selon différentes dispositions de la haie foliaire chez la vigne. *GESCO* 10: 36-41.

CAPÍTULO VII:

EFFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (*Vitis vinifera* L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BAYA.

VII.1	RESUMEN.....	191
VII.2	INTRODUCCIÓN.....	192
VII.3	MATERIAL Y MÉTODOS.....	195
	VII.3.1 COMPOSICIÓN DE LA BAYA.....	195
	VII.3.1.1 Muestreo de bayas.....	195
	VII.3.1.2 Análisis de bayas.....	195
	VII.3.1.3 Composición fenólica de la baya.....	197
	VII.3.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.....	198
VII.4	RESULTADOS.....	200
	VII.4.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS ANUALES.....	200
	VII.4.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA DESDE CUAJADO A VENDIMIA.....	201
	VII.4.3 MADURACIÓN Y COMPOSICIÓN FINAL DE LA BAYA.....	203
	VII.4.4 EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LA BAYA EN FUNCIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.....	205
VII.5	DISCUSIÓN.....	209
VII.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	213

CAPÍTULO VII: EFECTOS EN EL cv. CABERNET SAUVIGNON (*Vitis Vinífera* L.) DE LA MODIFICACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO CONTINUO EN LOS PERIODOS ANTERIOR Y POSTERIOR AL ENVERO EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BAYA.

VII.1 RESUMEN.

Se estudió el efecto del déficit hídrico en los periodos anterior y posterior al envero en el desarrollo de la baya (de cuajado a envero) y en maduración de la baya (de envero a vendimia), sobre la calidad y composición de la baya en el cv. Cabernet Sauvignon cultivado en espaldera y con riego localizado.

Con este propósito se estudiaron cuatro tratamientos experimentales que consistieron en diferentes riegos deficitarios: déficit ligero (T), déficit moderado continuo (DM_c), déficit moderado a partir de pre-envero (DM₁) y déficit moderado hasta pre-envero (DM₂), en los que se mantuvo el mismo número de pámpanos por metro de fila, en los dos años de estudio. El riego se inició en pre-floración (19¹), floración (23¹).

Se midió la concentración de sólidos solubles, expresado en °Brix, la acidez total titulable (g ácido tartárico·l⁻¹), el pH y la concentración de los compuestos polifenólicos; IPT, antocianos totales y extraíbles, semanalmente, con el fin de estudiar la evolución de la composición y calidad de la baya bajo condiciones de déficit moderado controlado (RDI).

Deficit moderado aplicado de cuajado (27¹) a envero (35¹), generó bayas más pequeñas y aumentó la relación hollejo:pulpa. El déficit moderado aplicado después de envero (35¹) favoreció la acumulación de IPT y antocianos extraíbles, mejorando la calidad de la uva. Pero disminuyó la acidez de la baya. El riego aplicado de envero (35¹) a vendimia (38¹) desaceleró la concentración de azúcares en aquellas bayas que fueron sometidas a déficit antes de pre-envero (34¹).

¹ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

VII.2 INTRODUCCIÓN

Cualquier factor que influye en el crecimiento de la cepa y en el metabolismo, tiene un impacto directo o indirecto en la composición de la baya y esto conduce a una gran variación en las características organolépticas del vino.

La mayoría de las fluctuaciones en la composición de la uva son causadas por las variaciones climáticas. De hecho, las diferencias climáticas entre años, además de la localización del viñedo, son los determinantes más influyentes en la composición de la baya (Downey et al., 2006).

En la zona centro de la península Ibérica, donde se desarrolla el ensayo, debido a las condiciones climáticas del lugar existe un desplazamiento del desarrollo fenológico provocando enveros tardíos, lo que supone que el momento crítico de maduración se desplace hacia periodos más calientes. Esto se traduce en temperaturas excesivas, elevada iluminosidad pudiendo inducir a un estrés oxidativo, lo cual podría conducir a una degradación de antocianos (Mori et al., 2007), a una disminución de la acidez, a elevados pH y concentraciones de sólidos solubles. Empeorando las características cualitativas de la uva y entorpeciendo la elaboración del vino.

Para paliar este problema se plantea el uso del riego como una herramienta eficaz para el manejo del cultivo y mediante su utilización conseguir mostos de calidad, sobre todo en climas secos, cómo es el caso del presente trabajo.

A lo largo de los años se ha estudiado el efecto del agua en la composición final de la baya, así como qué volumen de agua aplicar y que estrategia de riego seguir (McCarthy *et al.*, 2002; Kriedeman and Goodwin 2003, Keller 2005, Chaves *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2011). Además, en los últimos años se han desarrollado diferentes trabajos sobre la aplicación de déficit hídrico en distintos momentos del ciclo. Como es el caso de Romero *et al.*, 2013, con Monastrel donde evalúa el efecto del déficit hídrico aplicado en pre y pos envero en la composición final de la baya y en las características del vino, o Santesteban *et al.*, 2011 con Tempranillo donde aplica déficit hídrico después de cuajado y déficit después de envero. O Basile *et al.*, 2011, con Cabernet Sauvignon donde cuantifica los efectos del déficit hídrico temprano o tardío en el crecimiento y composición de la baya, o Intrigliolo *et al.*, 2012 con Tempranillo, entre otros. Pero en general existe escasa información cuantitativa disponible para determinar los niveles óptimos de déficit de agua en diferentes momentos fenológicos durante el periodo activo de la vid.

Se sabe que el agua es un elemento importante para la composición de la baya, ya que, influye en el desarrollo y crecimiento de la cepa, en la producción de la planta y en la maduración de la baya. El manejo del riego es determinante en el control de la producción de la uva y la calidad del vino (Fereres and Evans 2006).

El Cabernet Sauvignon, es una de las variedades tintas de mayor reconocimiento en el mundo en cuanto a vinos de calidad, además es una de las 5 variedades tintas más cultivadas en España, comprende unas 22000 ha, (MAGRAMA; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013), y es la variedad extranjera que más superficie ocupa en nuestro país por delante de las variedades: Syrah y Merlot. Es originaria de Burdeos. Altamente rica en taninos y colores, lo que la hace especialmente adecuada para la crianza. Y aunque se cultiva en todo el mundo se adapta mejor en climas cálidos. Existen evidencias considerables que sugieren que puede ser relativamente insensible a las variaciones en el rendimiento (Keller et al., 1998, 2005; Keller *et al.*, 1998), y que la respuesta puede depender de cómo y cuando se establece la variación del rendimiento (Chapman et al., 2004). Además no está claro si este (u otro) cultivar puede madurar la misma cantidad de uva bajo diferentes grados de déficit.

Efectos del déficit hídrico moderado en los periodos anterior y posterior al envero.

La composición de la baya está estrechamente ligada al estado hídrico de la planta, y asociada al microclima de racimos y a la arquitectura de la vegetación (Deloire *et al.*, 2003).

Déficit hídricos tempranos, desde cuajado (27¹) a envero (35¹), controlan el tamaño de la baya y reducen el vigor de la planta (Mc Carthy *et al.*, 2002, Keller 2005). Déficit hídrico tardíos, después de envero, durante la maduración de la baya, aumenta la biosíntesis de antocianos y otros componentes polifenólicos (Keller *et al.*, 2002). Ambas prácticas pueden reducir el rendimiento y el desarrollo vegetativo, en comparación con plantas regadas (Kriedeman and Goodwin 2003) y pueden beneficiar a la calidad de la baya y el vino de diferentes formas (Mc Carthy *et al.*, 2002; Cortell *et al.*, 2005, 2007).

La concentración de sólidos solubles totales (SST) y otros parámetros relevantes de la calidad suelen ser mayores en uvas que han sufrido un déficit moderado

¹ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995

después del envero, mientras que estreses excesivos llegan a influir negativamente en la composición de la baya (Esteban et al., 1999).

Kennedy *et al.*, 2002 observó que en cepas sometidas a un déficit moderado en pre-envero, mejoraba el color de la baya en vendimia (38²); en cierto punto, debido al tamaño de la baya, ya que aumentó la relación hollejo/pulpa. Por otro lado, Dry *et al.*, 2001, observaron una relación directa del déficit hídrico sobre la mejora de la producción de antocianos en baya. Sin embargo, estreses severo antes del envero de la baya producen maduraciones irregulares e incompletas del racimo.

La acumulación de taninos y flavonoides, entre otros, parece ser bastante insensible a los cambios en el estado hídrico de la planta, tanto antes como después del envero (Downey *et al.*, 2006), a menos que el déficit hídrico mejore la exposición del racimo al sol. Por otro lado Peyrots des Gachons *et al.*, 2005, observaron que un déficit medio puede mejorar el potencial aromático de las bayas. Pero estrés severo, sin embargo, puede reducir el potencial aromático de la baya.

El objetivo principal del presente capítulo fue conocer cómo déficit hídricos estacionales con diferentes intensidades afectaron a la composición química de la baya, con el fin de poder definir estrategias de riego que logren mejorar las características cualitativas de la baya para la producción de vinos equilibrados, con una adecuada carga polifenólica para su envejecimiento y con unas características organolépticas favorables para el mercado de vinos de alta gama. Para ello se ha estudiado:

- Las características meteorológicas de cada año centrándonos en dos etapas influyentes en el crecimiento y maduración de la baya. Por un lado se ha estudiado, una primera etapa que comprende, desde cuajado a pre-envero y; por otro lado se ha estudiado, una segunda etapa que comprende desde pre-envero hasta vendimia.
- El estado hídrico de la planta desde cuajado hasta vendimia.
- La influencia de la disponibilidad hídrica en la maduración y composición final de la baya.

Por otro lado, se evaluó y se comparó los efectos de las diferentes estrategias de riego en la evolución, desde cuajado a vendimia, de los componentes químicos; como: sólidos solubles totales, acidez total titulable, pH y compuestos fenólicos, en condiciones semiáridas.

² Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995

VII.3 MATERIAL Y MÉTODOS:

VII.3.1 COMPOSICIÓN DE LA BAYA

VII.3.1.1 Muestreo de bayas.

Se tomó una muestra de 100 bayas por parcela elemental desde cuajado (27¹) (tamaño guisante) hasta vendimia (38¹), con una frecuencia semanal. Estas muestras fueron empleadas para la determinación del peso de la baya y, desde pre-verano (34¹), para la determinación de los sólidos solubles totales, el pH y la acidez total titulable del mosto.

Desde el momento en el que se alcanzó el 80 % de bayas enveradas hasta vendimia, se tomó otra muestra de 150 bayas por parcela elemental, también con una frecuencia semanal. Estas muestras fueron empleadas para la determinación del peso y la composición fenólica de la baya.

Las muestras fueron pesadas en el laboratorio en una balanza electrónica (Modelo C-600 SX, COBOS, Barcelona, España). Una vez pesadas las muestras, éstas se mantenían refrigeradas en una nevera portátil para su traslado al laboratorio e inmediato análisis.

VII.3.1.2 Análisis de bayas

Para el análisis y determinación de la composición básica del mosto, se utilizó la muestra de 100 bayas desde pre-verano. Las bayas fueron trituradas con un pasapurés manual y el mosto resultante se centrifugó a 3200 r.p.m. durante 3 minutos en una centrífuga. El sobrenadante se empleó para la determinación de sólidos solubles totales (SST, expresado en °Brix), pH y acidez total titulable (ATT; gramos de ácido tartárico por litro, TH₂).

¹ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

Sólidos solubles totales (SST)

Los sólidos solubles totales, expresados como °Brix, se midieron utilizando un refractómetro digital portátil con compensación automática de temperatura entre 5 y 40°C, con una precisión de $\pm 0,2$ °Brix (PALETTE WM-7, ATAGO Inc., Kirkland, WA, USA).



Imagen VII.1: Refractómetro (PALETTE WM-7, ATAGO Inc., Kirkland, WA, USA) del laboratorio del departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la UPM.

pH

El pH del mosto se midió con un pHímetro previamente calibrado (micropH 2001, CRISON, Barcelona, España).

Imagen VII.2: pHímetro (micropH 2001, CRISON, Barcelona, España) del laboratorio del departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la UPM.



Acidez total titulable (ATT).

La acidez total titulable, expresada como gramos de ácido tartárico/L, se midió mediante neutralización volumétrica de 2 ml de mosto con sosa 0,1 N hasta pH 8,2 (Ought y Amerine 1988), utilizando un valorador automático (736 GP Titrino, METROHM AG, Herisau, Switzerland).

Imagen VII.3: Valorador automático (736 GP Titrino, METROHM AG, Herisau, Switzerland) del laboratorio del departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la UPM.



VII.3.1.3 Composición fenólica de la baya.

El análisis de la composición fenólica de las bayas se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por Glories y Augustin (1993). Consiste en extraer rápidamente los antocianos de las películas, por una parte en condiciones suaves y por otra parte en condiciones más extremas, permitiendo romper las barreras de difusión. Se emplearon dos disoluciones, una a pH 1 (HCl 0,1 N) para la extracción de los antocianos totales, y otra a pH 3,2 (solución de ácido tartárico 5 g/L) para la extracción de los antocianos extraíbles.

Se determinaron el potencial en polifenoles totales (IPT) y los potenciales en antocianos totales y extraíbles, expresados en mg malvidina/L. Para realizar las medidas de absorbancia se empleó un espectrofotómetro (Lambda 11 2.31 uv/vis SPECTROMETER, Perkin-Elmer, Waltham, MA, USA).



Imagen VII.4: Valorador automático (Lambda 11 2.31 uv/vis SPECTROMETER, Perkin-Elmer, Waltham, MA, USA) del laboratorio del departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia de la UPM.

VII.3.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.

Durante el desarrollo y maduración de la baya se evaluó el estado hídrico de las plantas a través de la medida del potencial hídrico foliar. Para ello se utilizó una cámara de presión tipo Scholander (Modelo 3000, Soil Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, CA, USA). Se realizaron las medidas del potencial hídrico foliar en dos momentos del día, a media mañana (a las 9:00 hora solar), y al mediodía solar. En cada hora de medida se muestrearon 6 hojas por tratamiento. Y se realizaron sobre hojas del pámpano principal, de la zona de racimos y bien iluminadas. Las hojas elegidas eran siempre adultas, totalmente desarrolladas y sanas. El tiempo de cada medida fue inferior a una hora.

Para caracterizar el estado hídrico de cada tratamiento experimental en cada momento fenológico, en nuestro caso es de cuajado a pre-envero y de pre-envero a vendimia, se consideró la media ponderada del potencial hídrico foliar de cada estado.

Para caracterizar tanto la intensidad y la duración del estrés hídrico, se integro el potencial hídrico foliar medido al mediodía solar (ψ_{md}) para cada estado fenológico (cuajado – pre-envero; pre-envero – vendimia). La integral del potencial hídrico foliar fue calculada según lo hizo Basile (2011). El valor comprendido entre las medidas obtenidas en dos fechas consecutivas fue calculado en primer lugar según la siguiente ecuación: (en valor absoluto).

$$Int_{i,i+1} = [(\psi_{i+1} + \psi_i)/2] (t_{i+1} - t_i)$$

donde $Int_{i,i+1}$ es la integral calculada entre el día t_i y t_{i+1} , son dos medidas consecutivas expresadas como día del año; ψ_i y ψ_{i+1} es el potencial hídrico foliar al mediodía medido en los días t_i y t_{i+1} respectivamente. Y este valor se uso para calcular la integral del potencial hídrico foliar (Ψ_{leaf}) para cada estado fenológico.

$$Int \Psi_{Sx} = \sum_{i=0}^{n-1} Int \Psi_{i,i+1}$$

Aquí, $Int \Psi_{Sx}$ es la integral de Ψ_{leaf} acumulado durante el estado fenológico “x” y “i” representa el número de días que Ψ_{leaf} fue medido. La unidad de las dos integrales es $MPa \cdot día^{-1}$.

La media ponderada de Ψ_{leaf} fue calculada para cada estado fenológico:

$$\Psi_{Sx} = \frac{Int \Psi_{Sx}}{I}$$

donde S_x es la media ponderada de $leaf$ acumulada durante el estado fenológico "x" y "l" representa la longitud (número de días) del estado fenológico. La unidad es MPa.

En este trabajo se determinó como hora de medida de mediodía solar entre la 13:00 y las 15:00 hora local, midiendo en las hojas que se sitúan en la cara este de la espaldera (cara expuesta al sol durante toda la mañana), justo antes de que cambie el sol de cara.

VII. RESULTADOS:**VII.4.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS ANUALES.**

En la tabla VII.1 se muestra un resumen de las componentes climáticas y del volumen de agua de riego en dos periodos diferenciados. Por un lado está el periodo de cuajado (27¹) a pre-verano (34¹), que correspondería con la fase I y parte de la fase II de crecimiento de la baya, donde DM_c (déficit moderado continuo) y DM₂ (déficit hasta pre-verano) no se riegan (kc = 0); y T (déficit ligero) y DM₁ (déficit moderado a partir de pre-verano) se riegan con un kc = 0,6. Por otro lado está el periodo de pre-verano (34¹) hasta vendimia (38¹), que corresponde con el final de la fase II y toda la fase III de desarrollo de la baya, donde se aplica a DM₁ y DM_c un déficit moderado kc = 0,3 y a los tratamientos T y DM₂ se les aplica un déficit ligero kc = 0,6.

El 2011 fue más extremo que 2010 en el periodo de crecimiento y maduración de la baya; la precipitación fue menor, la demanda evapotranspirativa fue mayor en el periodo de cuajado a vendimia (658mm en 2011 frente a 587 mm en 2010), además la temperatura media en la maduración de la baya (etapa II), el cual es un periodo crítico, fue mayor en 2011 (Tm₂₀₁₁ = 23,9 °C vs Tm₂₀₁₀ = 21,6 °C).

Tabla VII.1: Precipitación efectiva (Pe; mm), evapotranspiración de referencia (ET₀; mm/día), acumulación de temperaturas eficaces (GDD₁₀; grados-día), cantidades de agua aportada por el riego en cada etapa y en cada tratamiento (Lámina de riego; mm), cantidad de agua total aplicada (R; mm), durante las etapas anteriores (cuajado – pre verano) y posteriores (pre verano – vendimia) al cambio de riego en el 2010 y 2011.

	Etapa I (de cuajado a pre-verano)		Etapa II (de pre-verano a vendimia)		
	2010	2011	2010	2011	
Pe (mm)	13,4	17	12,4	0	
ET ₀ (mm/día)	6,04	6,69	4,09	6,04	
ET ₀ (mm)	296	314	291	344	
Tm (°C)	24,3	22,5	21,6	23,9	
GDD ₁₀ (°C·día ⁻¹)	708,3	595,9	753,7	794,8	
	T	88	123	276	305
Lámina de riego (mm)	DM_c	0	0	142	167
	DM₁	88	123	188	177
	DM₂	0	0	229	230
R (mm)	177	246	835	878	

¹ Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

VII.4.2 ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA DESDE CUAJADO A VENDIMIA.

En la figura VII.1 se representa el estado hídrico de la planta a través del potencial hídrico foliar medido al mediodía solar, desde cuajado a vendimia; así como la evolución del desarrollo y crecimiento de la baya desde tamaño pimienta a vendimia.

En el **2010** después de cuajado, y en la primera fase de desarrollo y crecimiento de la baya (fase I) las plantas no presentan estrés $\psi_{md} > -1,2$ MPa (según Deloire et al., 2004), así como no existen diferencias significativas entre tratamientos. En esta primera fase existe una elevada multiplicación celular donde se determina el tamaño de la baya y es altamente sensible al estrés hídrico. Al no existir déficit, el peso de la baya se equipara en todos los tratamientos.

Es más adelante, al inicio de la fase II, cuando se empieza a diferenciar el peso de baya en función de la dosis de riego aplicada, en este caso regadas frente a no regadas; y se hace presente en el estado hídrico de la planta ($DM_c = -1,1$ MPa; $DM_2 = -1,2$; T y $DM_1 < -1,0$ MPa).

Con el cambio de riego, $DM_2 = 70\% ET_0$, el estado hídrico de la planta de este tratamiento se recupera. Sin embargo, en DM_c , después del cambio de riego ($kc = 0,3$), las plantas quedan sometidas a un estrés moderado $-1,4 < \psi_{md} < -1,2$ MPa hasta final de maduración (Deloire et al., 2004).

El peso de la baya no se ve afectado por el cambio de riego que sigue la tendencia con la que había iniciado la fase III, en DM_2 aumenta ligeramente hasta pesar un gramo la baya y DM_1 sufre una caída del peso al final ($DM_1 < 1$ g) debido al déficit hídrico ($35\% ET_0$).

En el **2011** desde cuajado se empiezan a diferenciar los contenidos volumétricos de agua en el suelo, plantas regadas frente a plantas no regadas. Esta diferencia aparece reflejada en el estado hídrico de la planta mediante el potencial hídrico foliar ψ_f medido al mediodía solar (T = $-0,86$ MPa vs $DM_c = -1,05$ MPa), condicionando la multiplicación celular en el desarrollo de la baya.

A partir de pre-envero, con el cambio de riego, se produce un cambio en la humedad del suelo, aumentando el potencial hídrico al mediodía en DM_2 hasta $-1,2$ MPa. Por otro lado el peso de la baya se diferencia desde cuajado según la dosis de riego aplicada; y con el cambio de riego en pre-envero DM_2 aumenta el peso de la baya sin alcanzar a T. Y, por otro lado, DM_1 disminuye el peso de baya debido a la reducción de la dosis de riego.

Al final de maduración existe un descenso común en el peso de la baya de todos los tratamientos, acompañado de elevadas concentraciones de sólidos solubles totales ($T = 27,6$ °Brix; $DM_c = 28,3$ °Brix; $DM_1 = 29$ °Brix; $DM_2 = 25,3$ °Brix), esto puede ser debido a que la vendimia se realizó tarde, pasando la baya a la etapa de sobremaduración. Para comentar los resultados no se ha tenido en cuenta el dato final de vendimia del 2011.

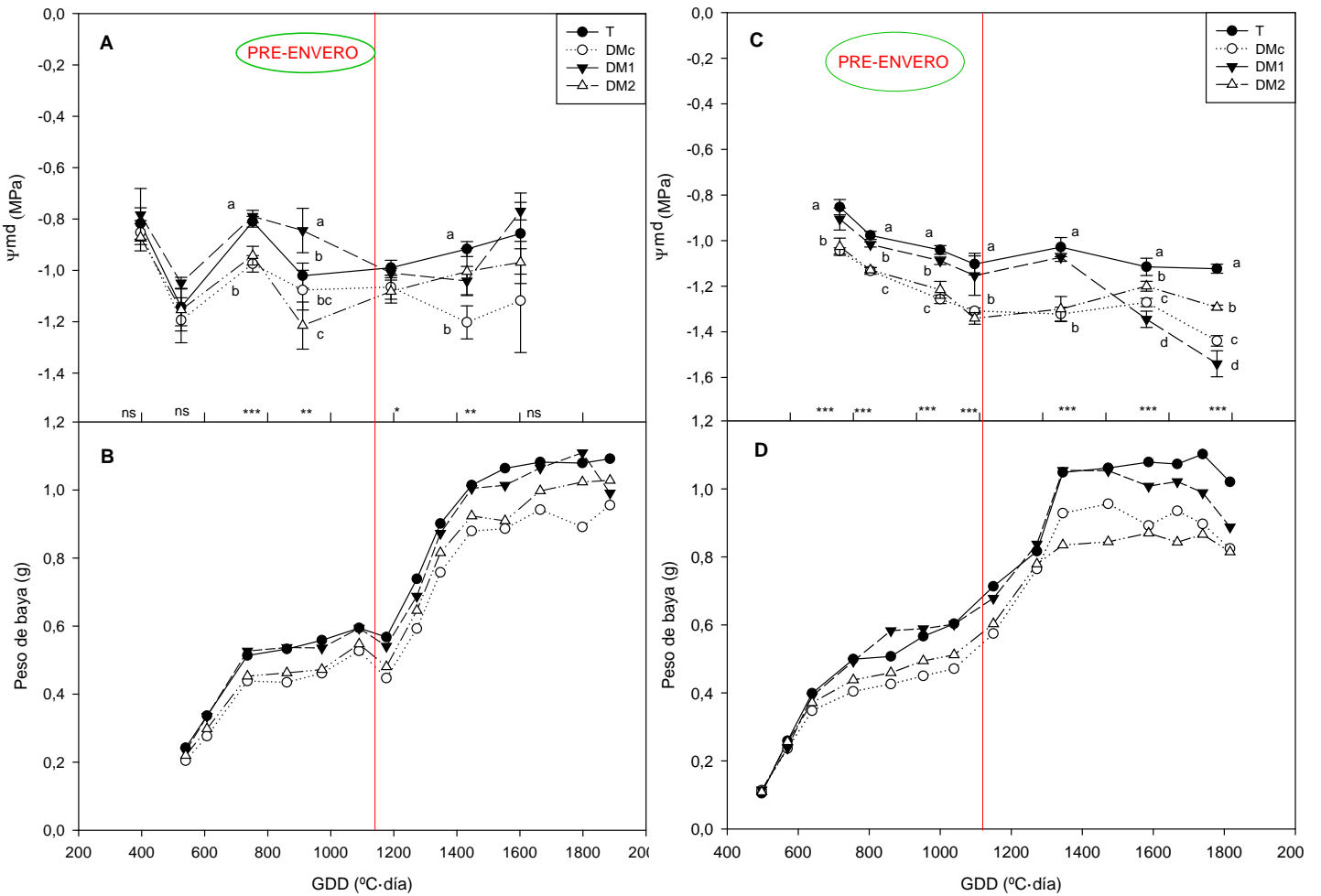


Figura VII.1: Evolución del potencial hídrico foliar (MPa) medido al mediodía solar desde cuajado a vendimia en 2010 (A) y 2011 (C). Evolución del peso de baya en g para las diferentes dosis de riego, en función de los grados día acumulados (GDD_{10} ; °C·día⁻¹) en 2010 (B) y en 2011 (D).

VII.4.3 MADURACIÓN Y COMPOSICIÓN FINAL DE LA BAYA.

En la tabla VII.2 se muestran los datos obtenidos en vendimia en 2010 y 2011, correspondientes a la composición básica: concentración de sólidos solubles totales (SST), acidez total titulable (ATT; g Ac. Tartárico·L⁻¹) y pH; y a la composición fenólica antocianos totales (mg malvidina/l), antocianos extraíbles (mg malvidina/l) y polifenoles mediante el índice de polifenoles totales (IPT).

En 2010 no aparecen diferencias significativas en la composición básica de la baya debidas al tratamiento de riego aplicado, sin embargo en 2011, las condiciones medioambientales fueron más extremas, por un lado, el perfil del suelo no se recargó en invierno, y por otro lado, la fase de maduración de la baya (de pre-verano a vendimia) se adelantó respecto al 2010, desarrollándose bajo una temperatura y demanda atmosférica superior. Y, además, en el 2011 los tratamientos de déficit moderado continuo (DM_c) y déficit moderado hasta pre-verano (DM₂) comenzaron a regarse más tarde que en 2010 extremando los tratamientos. Por todo esto se obtuvieron mostos finales altamente dependientes del riego. En 2011, debido a lo adelantado que venía la cosecha, se pasó el momento de maduración industrial de la baya, obteniendo uvas sobremaduras (SST > 27 °Brix, menos en DM₂).

Por otro lado, la acidez total titulable (ATT; g/l ácido tartárico) no se ve afectada por la dosis de riego en la media de los dos años de estudio, las diferencias estadísticas que aparecen son debidas al año. En 2011 sucede que el tratamiento con menor acidez es el de déficit ligero (T = 4,88 g/l TH₂), esto fue debido a la deshidratación y, por consiguiente, concentración que experimentó al final la baya, disminuyendo el peso y aumentando la concentración de azúcares (> 27 °Brix). Se puede observar que la acidez total final es dependiente del año y no del tratamiento aplicado de ahí los datos tan dispares que obtenemos en los dos años de estudio.

El pH sigue la misma evolución, pero a la inversa, que la acidez, los mostos con mayor pH se corresponden con las acideces más bajas (DM₁ en 2010 y T en 2011). Para la obtención de vinos potencialmente equilibrados en zonas cálidas se buscan mostos ricos en ácido tartárico, con menores valores de pH y menor concentración de sólidos solubles.

Los compuestos fenólicos del mosto obtenido en la vendimia del 2010 fueron dependientes del régimen hídrico adoptado, además se observó que el tratamiento sometido a déficit moderado continuo (DM_c) fue el que obtuvo una mayor concentración de antocianos, tanto totales como extraíbles, y de polifenoles. En 2011,

el factor agua no fue determinante en la concentración final de compuestos fenólicos. Pero en la media de los dos años de estudio, las diferencias que aparecen en el índice de polifenoles son debidas al tratamiento, siendo el déficit moderado continuo (DM_c = 74,1), el que obtiene un índice mayor, en parte debido a la concentración de la baya.

Tabla VII.2: Composición final de la baya: concentración de sólidos solubles totales (SST; °Brix), acidez total titulable (ATT; g Ac. Tartárico·l⁻¹) y pH; y a la composición fenólica antocianos totales (mg malvidina/l), antocianos extraíbles (mg malvidina/l) y polifenoles mediante el índice de polifenoles totales (IPT); para las diferentes dosis de riego en 2010 y 2011.

		Peso baya (g)	SST (°Brix)	ATT (g/l TH2)	pH	A. totales (mg/l)	Antocianos Ex (mg/l)	IPT	
2010	T	1,06 a	26,1	5,17	3,50	1764,6 a	707,0	62,0 ab	
	DM _c	0,89 b	26,7	4,78	3,45	1809,5 a	818,4	68,5 a	
	DM ₁	1,01 ab	26,1	4,80	3,55	1479,3 b	653,9	60,1 b	
	DM ₂	1,03 b	25,6	4,84	3,42	1416,9 b	667,3	66,4 ab	
	Sig.	**	ns	ns	ns	**	ns	*	
2011	T	1,02 a	27,6 b	4,88 c	3,46 a	1577,9	852,8	66,6	
	DM _c	0,82 b	28,3 ab	5,25 b	3,41 a	1478,2	895,4	79,8	
	DM ₁	0,89 b	29,0 a	5,50 b	3,43 a	1566,8	925,8	74,9	
	DM ₂	0,81 b	25,3 c	5,81 a	3,23 b	1495,7	809,1	67,3	
	Sig.	***	**	***	**	ns	ns	ns	
Media 2010-2011									
	T	1,04 a	26,9 a	5,02	3,5 a	1671,3 a	779,9	64,3 b	
	DM _c	0,86 c	27,5 a	5,02	3,4 a	1643,8 a	856,9	74,1 a	
	DM ₁	0,95 b	27,6 a	5,15	3,5 a	1523,1 bc	789,8	67,5 b	
	DM ₂	0,92 bc	25,5 b	5,33	3,3 b	1456,3 c	738,2	66,9 b	
	Sig. Trat	***	***	ns	***	**	ns	*	
	Sig. Año	***	***	***	***	*	***	**	
	Trat * Año	ns	**	**	ns	**	ns	ns	

Significación estadística (Sig.): *, **, ***, ns: diferencias significativas para p 0,05; 0,01; 0,001 o no significativas respectivamente. Separación de medias por el test múltiple de Duncan (=0.05).

VII.4.4 EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LA BAYA EN FUNCIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA.

En las figuras VII.2 hasta VII.5 se representa la relación entre el peso de la baya, los parámetros de composición de la baya, como: la concentración de sólidos solubles totales, la acidez total titulable, el pH, el índice de polifenoles totales y los antocianos extraíbles con el estado hídrico de la planta, medido como la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía solar (Ψ_{md}) diferenciado en dos etapas del desarrollo de la baya, de cuajado a pre-enero y de pre-enero a vendimia.

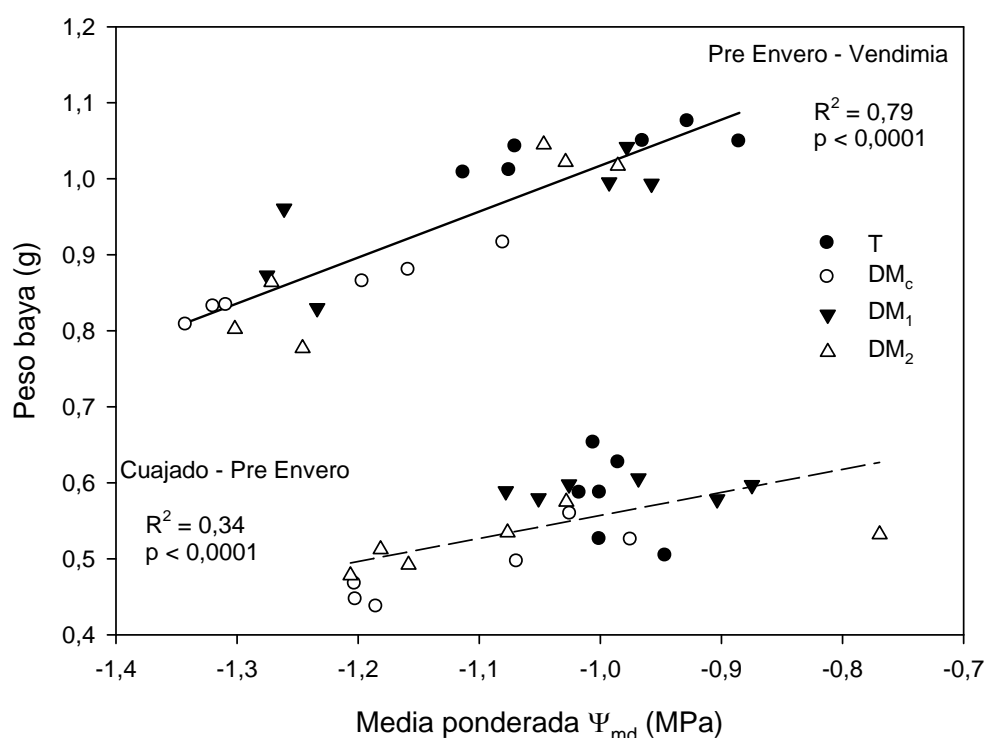


Figura VII.2: Relación del peso de baya (g) con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía (Ψ_{md} ; MPa), para los cuatro tratamientos (T: círculos negros; DM_c : círculos blancos; DM_1 : triángulos negros; DM_2 : triángulos blancos), de cuajado a pre-enero y de pre-enero a vendimia. Para los años 2010 y 2011. Cada punto representa el valor medio por repetición del tratamiento. Coeficiente de determinación (R^2) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y $p < 0,05$).

El peso de la baya está altamente relacionado con el estado hídrico de la planta, sobretudo en la fase de pre-enero (34¹) a vendimia (38¹).

De cuajado (27¹) a vendimia el peso de la baya aumenta linealmente con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía solar. Variando la pendiente

¹Estados fenológicos según la escala de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe, 1995.

según el periodo donde nos encontremos (1,6 de pre-enero a vendimia vs 0,86 de cuajado a pre-enero).

Peso de baya superiores a 1 gramo en Cabernet Sauvignon se corresponden con valores de potencial superiores a -1,0 MPa.

Al analizar la concentración de sólidos solubles se observa que de cuajado a pre-enero la concentración disminuye linealmente con la media ponderada del potencial hídrico foliar, obteniendo mayor concentración los tratamientos sometidos a déficit hasta pre-enero (DM_c , déficit moderado continuo y DM_2 déficit hasta pre-enero). En la fase de maduración de la baya, de pre-enero a vendimia, la relación es cuadrática manteniéndose los valores de brix en un rango pequeño, de 25,5 a 27 °Brix. Alcanzándose valores altos de concentración de sólidos solubles con un elevado rango de estado hídrico de la cepa, desde -1,19 hasta -0,89 MPa. Correspondiendo el máximo valor de SST (27,1 °Brix) con el mínimo valor del potencial hídrico (-1,2 MPa).

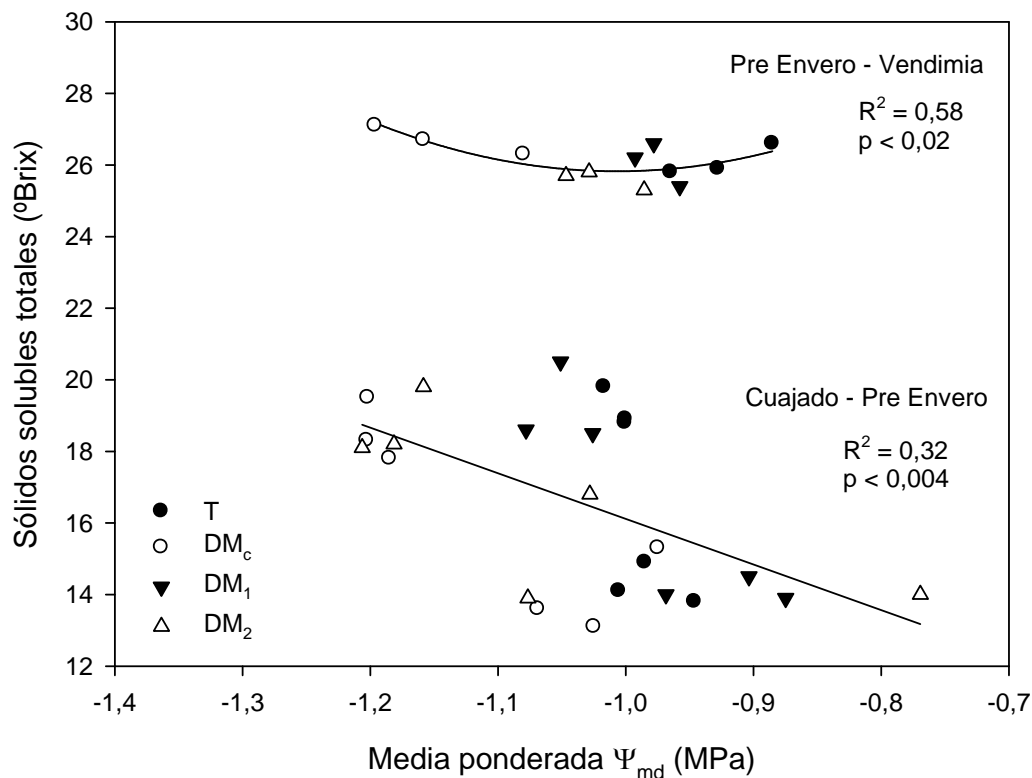


Figura VII.3: Relación de la concentración de sólidos solubles totales (° Brix) con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía (Ψ_{md} ; MPa), para los cuatro tratamientos (T: círculos negros; DM_c : círculos blancos; DM_1 : triángulos negros; DM_2 : triángulos blancos), de cuajado a pre-enero y de pre-enero a vendimia. Para los años 2010 y 2011. Cada punto representa el valor medio por repetición del tratamiento. Coeficiente de determinación (R^2) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y $p < 0,05$).

No existe relación significativa entre la acidez y la media ponderada del Ψ_{md} en el periodo de cuajado a pre-verano. Pero si que existe una relación curvilínea significativa entre ambos parámetros en el periodo de pre-verano a vendimia. La acidez disminuye a medida que aumenta el déficit hídrico, para valores de acidez mayores a 5 g de ácido tartárico·L⁻¹ la media ponderada del $\Psi_{md} > -1,0$ MPa, y para valores de acidez < 5 g de ácido tartárico·L⁻¹ la media ponderada del $\Psi_{md} < -1,0$ MPa. El pH no tiene correlación significativa con el estado hídrico de la planta. En ninguna de las dos fases de estudio.

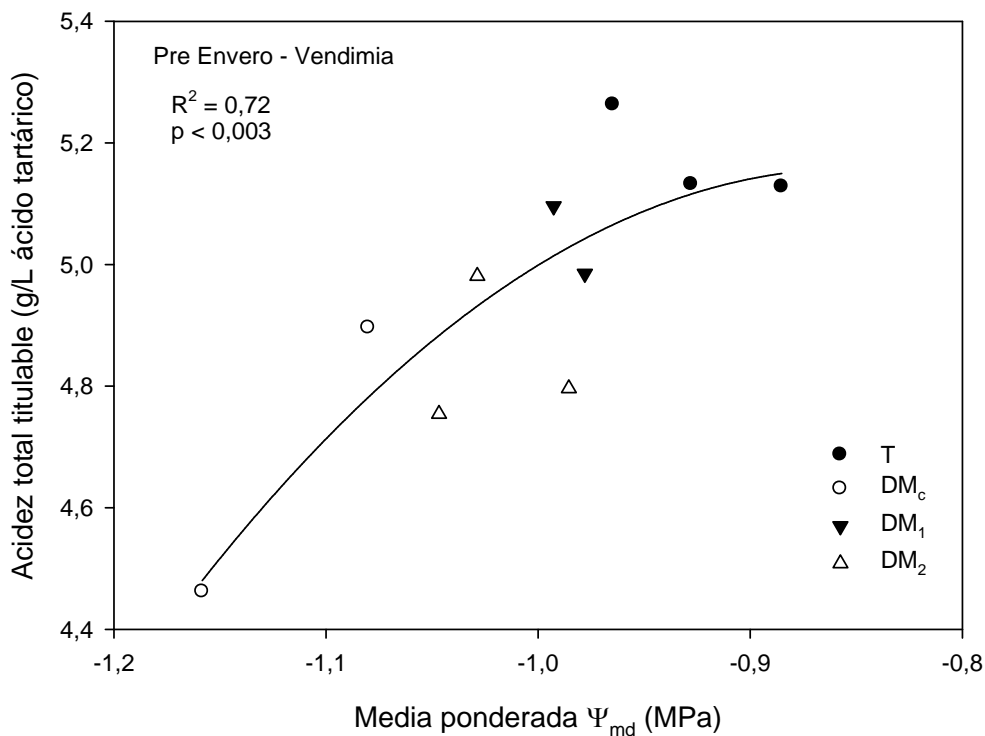


Figura VII.4: Relación de la acidez total titulable (g/l ácido tartárico) con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía solar (Ψ_{md} ; MPa), para los cuatro tratamientos (T: círculos negros; DM_c: círculos blancos; DM₁: triángulos negros; DM₂: triángulos blancos), de pre-verano a vendimia. Para los años 2010 y 2011. Cada punto representa el valor medio por repetición del tratamiento. Coeficiente de determinación (R^2) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y $p < 0,05$).

Los componentes polifenólicos y antocianos están altamente relacionados con el estado hídrico de la planta en el periodo de pre-verano a vendimia. Valores bajos de la media ponderada del Ψ_{md} corresponden con concentraciones altas de polifenoles (IPT > 70), cómo sucede con el tratamiento de déficit moderado continuo (DM₂) que para la media ponderada del potencial hídrico foliar del mediodía $\Psi_{md} = -1,3$ MPa el IPT > 75 .

Por otro lado la concentración de antocianos extraíbles mantiene una alta significación lineal negativa con el estado hídrico de la planta en la fase de pre-enero a cuajado.

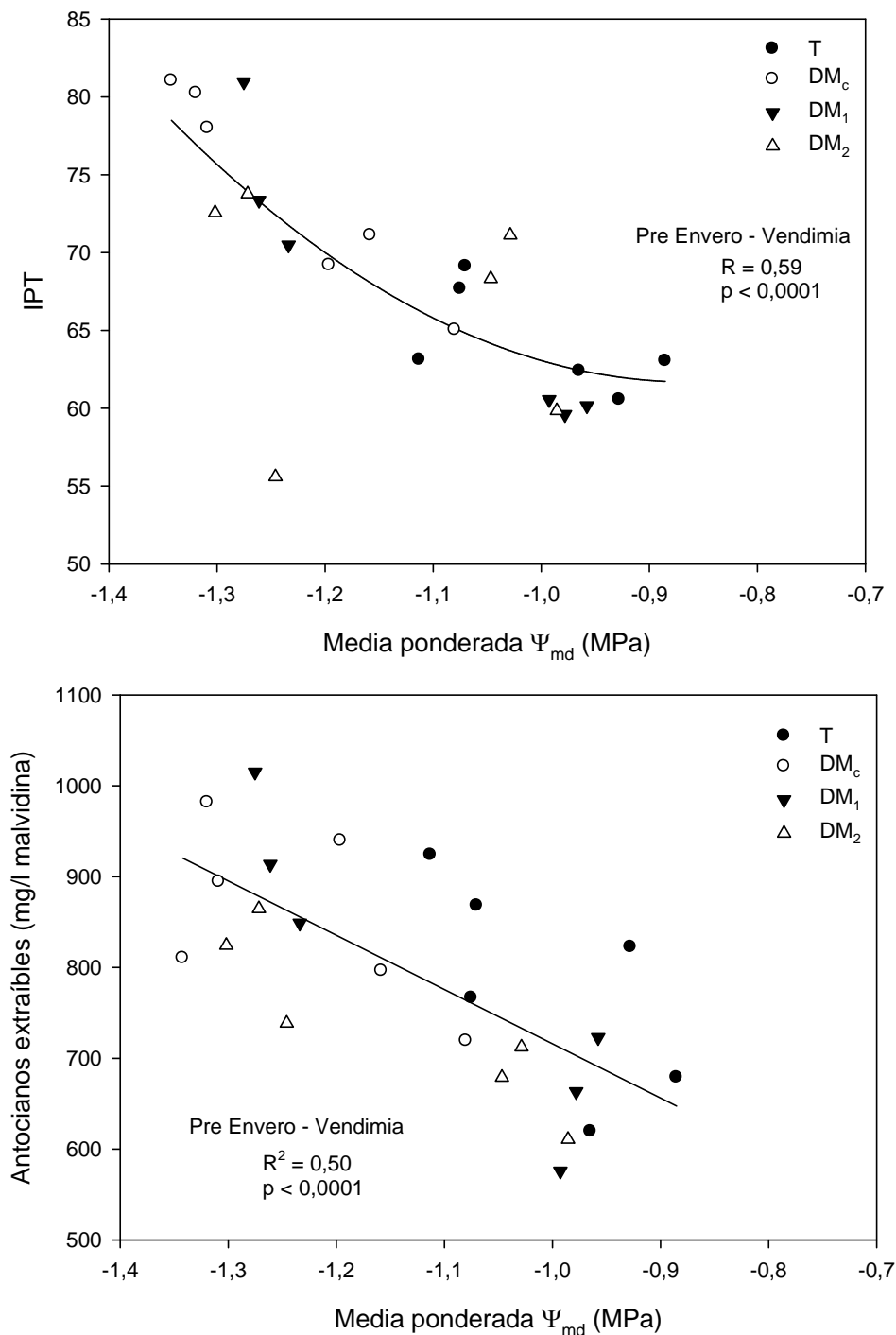


Figura VII.5: Relación del índice de polifenoles totales (IPT) y antocianos extraíbles (mg/l de malvidina) con la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía (Ψ_{md} ; MPa), para los cuatro tratamientos (T: círculos negros; DM_c: círculos blancos; DM₁: triángulos negros; DM₂: triángulos blancos), de pre-enero a vendimia. Para los años 2010 y 2011. Cada punto representa el valor medio por repetición del tratamiento. Coeficiente de determinación (R^2) y grado de significación del mismo (ns y *: no significativo y p < 0,05).

VII.5 DISCUSIÓN:

La respuesta del tamaño y composición de la baya de Cabernet Sauvignon al estrés hídrico está altamente relacionada con el estado fenológico y la severidad del estrés aplicado.

Se ha estudiado la evolución de los diferentes parámetros de composición química de la baya en dos etapas: desde cuajado a pre-envero (etapa I) y desde pre-envero a vendimia (etapa II). Y como la aplicación de déficits hídricos estacionales con diferentes intensidades han condicionado dichos parámetros.

Los diferentes parámetros de composición de la baya serán discutidos por separado de acuerdo a la naturaleza de sus respuestas.

Sólidos solubles totales (SST)

Varios autores defienden que las condiciones óptimas para mejorar la síntesis y acumulación de sólidos solubles totales, se obtienen cuando existe déficit hídrico de leve a moderado antes del envero, seguido de una mayor disponibilidad hídrica hasta vendimia (Esteban et al., 1999; Intrigliolo y Castel 2010). Es lo que sucede con el tratamiento de déficit moderado hasta pre-envero (DM₂), que al someterle a un déficit moderado antes de envero, y a continuación aplicarle un déficit ligero consigue mejorar la síntesis y acumulación de sólidos solubles, obteniendo una concentración buena en maduración (25,5° Brix).

De pre-envero a vendimia, la concentración de sólidos solubles está altamente relacionada con el estado hídrico de la planta mediante una relación cuadrática, y en la fase de cuajado a pre-envero la relación es lineal. Basile et al., (2011) con Cabernet sauvignon, diferenciando las tres fases de crecimiento y maduración de la baya, obtienen una relación cuadrática al comparar los SST con la media ponderada del σ_{md} diferente a la que se ha obtenido en este trabajo. Esto puede ser porque el rango de datos de la media ponderada del σ_{md} es mayor (-0,4 a -1,4 MPa) que la que se obtiene en este estudio (-0,7 a -1,4 MPa). Por otro lado, la relación lineal negativa que describe el efecto del estrés hídrico en SST antes de pre-envero es similar a la descrita por Girona *et al.* (2009) en la fase II del crecimiento de la baya en Tempranillo.

Existe un efecto positivo en el déficit moderado aplicado únicamente antes de envero (DM₂), porque desarrolla bayas más pegueñas, aumentando la proporción hollejo:pulpa, y da tiempo a que la baya se rehidrate hasta vendimia manteniendo concentraciones de sólidos solubles moderadas en comparación con las obtenidas en

climas cálidos. ($DM_2 = 25$ °Brix). Sin embargo si el déficit moderado continua aplicándose después, en la etapa de maduración, como es el caso del tratamiento de déficit moderado continuo (DM_c); las altas temperaturas unidas a déficit hídricos provocan la aceleración de la abscisión foliar en dicha etapa, dejando el racimo expuesto. Lo que da lugar a aumentar la concentración de sólidos solubles en baya, hasta vendimia. Obteniéndose concentraciones altas ($DM_c = 27,5$ °Brix).

En el periodo de maduración de la baya, los días son más cortos y se reduce el periodo de asimilación de CO_2 , y con ello, también se produce la reducción de la exportación de azúcar de las hojas a la baya (Keller, 2005; Conde *et al.*, 2007, Romero *et al.*, 2011). La concentración de azúcares está altamente relacionada con la superficie foliar funcional de la cepa en maduración (Mabrouk and Sinoquet, 1998). En el tratamiento de déficit ligero (T), se vio en el capítulo VI, que el área foliar funcional ($SFE/SFT = 0,63$ m^2/m^2) era menor que en los otros tratamientos. Entonces; la reducción de la actividad fotosintética de la planta disminuye la exportación de azúcar de las hojas a la baya (Keller, 2005; Conde *et al.*, 2007, Romero *et al.*, 2011). En nuestro caso el tratamiento de déficit ligero (T) disminuye la exportación de azúcar (26,9 °Brix), en comparación con los tratamientos que han sido sometidos a déficit moderado en maduración.

El déficit hídrico moderado aplicado en maduración (de envero a vendimia) unido a las altas temperaturas provocan la aceleración en la abscisión de la hoja. Esto puede producir un efecto de deshidratación – concentración en los solutos de la baya (Williams and Matthews 1990). En este estudio las cepas sometidas a déficit moderado después de envero (DM_1) se ven afectadas por dicho fenómeno obteniéndose concentraciones altas de sólidos solubles ($DM_1 = 27,6$ °Brix).

Acidez total titulable (ATT)

La acidez mantiene una correlación curvilínea negativa con el estrés hídrico durante la fase de maduración, de envero a vendimia. Donde valores bajos de ácidos corresponden con valores bajos de la media ponderada del potencial hídrico foliar medido al mediodía solar. Otros autores han encontrado una relación similar entre la acidez y el estado hídrico de la planta como Bindon *et al.*, (2008) y Basile *et al.* (2011) en Cabernet sauvignon, Esteban *et al.* (1999) en Tempranillo y Van Leeuwen *et al.* (2009) en Merlot. Este suceso puede explicarse porque las plantas que fueron sometidas a estrés antes de envero, desarrollaron menor área foliar (ver capítulo VI), dejando expuestos los racimos a la radiación solar (Romero *et al.*, 2011), esto supone un aumento en la temperatura del racimo (Santos *et al.*, 2005), y por lo tanto, aumenta

la respiración de la baya (Williams et al., 1994). De forma contraria a nuestros resultados hay estudios realizados donde no se encontraron valores de acidez que concluyeran que el riego afectase de manera directa a la acidez del mosto (Reynolds et al., 2005; Sivilotti et al., 2005; Williams et al., 2007).

El pH no tiene correlación significativa con el estado hídrico de la planta en ninguna de las dos fases de estudio. Smith and Raven (1979) no establecieron ninguna relación simple entre la acidez total titulable y el pH, además Shiratake and Martinoia (2007) afirmaron que los ácidos orgánicos tienden a amortiguar y por lo tanto estabilizan el pH.

Composición polifenólica

La síntesis y concentración de los compuestos fenólicos de la baya está altamente influenciada por las condiciones del medio y por el manejo del cultivo. La radiación solar, la temperatura y la disponibilidad hídrica, son posiblemente los factores más importantes, aunque existen otros como la disponibilidad de nutrientes, que afectan de forma indirecta sobre la concentración de compuestos fenólicos en la baya. Los antocianos, responsables del color en los vinos tintos presentes en el hollejo, frecuentemente aumentan su nivel a causa del déficit hídrico y por una mayor exposición a la radiación solar, y al contrario elevadas temperaturas provocaran una caída de los mismos.

Varios estudios afirman que existe una relación directa del déficit hídrico con el incremento en la producción de antocianos (Dry et al., 2001). Por un lado hay autores que dicen que el color mejora al implantarse un déficit de leve a moderado en pre-vero (Kennedy et al., 2002, Roby and Matthews 2004, Castellarin et al., 2007), debido al aumento de la relación hollejo:pulpa. Y por otro lado, existen estudios que atribuyen dicho incremento de antocianos al déficit hídrico producido entre enero y vendimia (Matthews et al., 1990; Nadal y Arola 1995).

Existe una correlación lineal y positiva de los antocianos con el estrés hídrico después de enero, de acuerdo con estudios anteriores que indican que la concentración de compuestos fenólicos mejora con el estrés hídrico (Ginesta *et al.*, 1998; Ojeda et al., 2002; Castellarin et al., 2007; Romero et al., 2011; Basile et al., 2011). El efecto positivo del déficit hídrico en la concentración de antocianos de la baya puede ser debido tanto al efecto directo como indirecto del estrés hídrico. El efecto indirecto está relacionado con la disminución en el tamaño de la baya dando lugar al aumento de la proporción hollejo:pulpa (Williams and Matthews, 1990). En

este estudio el déficit moderado continuo (tratamiento DM_c) provocó un aumento en el índice de polifenoles totales (IPT = 74,1); así como, en la síntesis de antocianos del hollejo. En la media de los 2 años de estudio se obtuvieron 1671 mg/L de antocianos totales para un peso de baya 1,04 g en T, frente a 1644 mg/l de antocianos totales para un peso de baya 0,86 g en DM_c. En este caso se obtuvieron concentraciones similares para tamaños de baya estadísticamente diferentes. Hay otros estudios que contrastan dicha hipótesis (Ojeda et al., 2002; Roby and Matthews 2004).

Estrés hídrico severo (σ_{stem} al mediodía de -1,40 a -1,50 MPa), aplicado tanto en pre y post envero, según los estudios previos, aumenta la intensidad de color del vino y la concentración de fenoles y antocianos en comparación con las cepas regadas (Ferreyra et al., 2004). En estudios anteriores, el estrés hídrico severo (σ_{leaf} -1,45 MPa) al principio de post envero, no afectó a la concentración de antocianos en cosecha (Castellarin et al., 2007). Sin embargo Keller *et al.* (2008) señalan que el color del mosto disminuye ligeramente en plantas sometidas a déficit hídrico en pre-envero en comparación con el mosto de uva de plantas sometidas a déficit hídrico en post-envero.

Basile et al. (2011) obtuvieron que la respuesta de la concentración de antocianos en mostos de Cabernet Sauvignon al déficit después de envero aumentaba a medida que se intensificaba el estrés hídrico. Sin embargo Girona *et al.* (2009) con Tempranillo observaron que la concentración de antocianos estaba afectada por un déficit de leve a medio después del envero, mientras que déficit hídricos severos disminuían dicha concentración.

En el presente estudio la acumulación de antocianos y polifenoles se mostró insensible a los cambios del estado hídrico de la planta de cuajado a pre-envero. Pero no sucede lo mismo después de envero, donde la concentración de antocianos extraíbles en mosto aumenta mediante una relación lineal, y el contenido de polifenoles también se ve afectado por el estado hídrico de la planta manteniendo una relación cuadrática positiva.

VII.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Basile, B., J. Marsal, M. Mata, X. Vallverdú, J. Bellvert, and J. Girona. 2011. Phenological sensitivity of Cabernet Sauvignon to water stress: vine physiology and berry composition. *Am. J. Enol. Vitic.* 62:4 (452 - 461).
- Bindon, K.A, P.R. Dry, and B.R. Loveys. 2008. Influence of partial rootzone drying on the composition and accumulation of anthocyanins in grape berries (*Vitis vinifera* cv. Cabemet Sauvignon). *Austral. J. Grape Wine Res* 14:91-103.
- Castellarin, S.D., A Pfeiffer, P. Sivilotti, M. Degan, E. Peterlunger, and G. Di Gaspero. 2007. Transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis in ripening fruit of grapevine under seasonal water deficit. *Plant Cell Envir.* 30:1381-1399.
- Chapman, D.M., M.A. Matthews, J.X. Guinard. 2004. Sensory attributes of Cabernet sauvignon wines made from vines with different crop yields. *Am. J. Enol. Vitic.* 55: 325-334.
- Chaves, M.C., c.R. Souza, T.P. Santos, M.F. Ortuno, M.L. Rodrigues, C.M. Lopes, J.P. Maroco, and J.S. Pereira. 2007. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Ann. Appl. Biol.* 150:237-252.
- Cortell, J.M., M. Halbleib, AV. Gallagher, T. Righetti, and J.A Kennedy. 2005. Influence of vine vigor on grape (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) and wine proanthocyanidins. 1. *Agric. Food Chern.* 53:5798-5808.
- Cortell, J.M., M. Halbleib, A.V. Galagher, T.L. Righetti, and J.A. Kennedy. 2007. Influence of vine vigor on grape (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) anthocyanins. 1. Anthocyanin concentration and composition in fruit. *J. Agric. Food Chem.* 55:6575-6584.
- Deloire, A., A. Carbonneau, Z. Wang, H. Ojeda. 2004, Vine and water, a short review. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 38: 1-13.
- Downey, M. O., N. K. Dokoozlian and M. P. Krstic. 2006. Cultural practice and environmental impacts on the flavonoid composition of grapes and wine. A review of recent research. *Am. J. Enol. Vitic.* 57: 257-268.
- Dry, P. R., B. R. Loveys, M. G. McCarthy and M. Stoll. 2001. "Gestion des stratégies d'irrigation dans les vignobles australiens." *Progrès Agricole et Viticole* 118(21): 457- 470.
- Esteban, M.A., M.J. Villanueva, J.R. Lissarrague. 1999. Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugar, organic acids, and mineral elements. *Am. J. Enol. Vitic.* 50: 418-434.
- Fereres E, Evans RG (2006) Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. *Irrig Sci* 24:55–57
- Ferreyra, R., V. Selles, J. Peralta, and J. Valenzuela. 2004. Effect of water stress applied al different development periods of Cabernet Sauvignon grapevine on production and wine quality. *Acta Hortic.* 646:27-33.

- Ginestar, C., J. Eastham, S. Gray and P. Iland. 1998. Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of Shiraz grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* 49(4): 421-428.
- Girona, J., J. Marsal, M. Mata, J. del Campo, and B. Basile. 2009. Phenological sensitivity of berry growth and quality of 'Tempranillo' grapevines (*Vitis vinifera* L.) to water stress. *Aust. J. Grape Wine Res.* 15:268-277.
- Glories, Y., M. Augustin. 1993. Maturité phénologique du raisin, conséquences technologiques: application aux millésimes 1991 et 1992. *Compte Rendu Colloque Journée Techn. CIVB, Bordeaux*: 56-61.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2010. Response of grapevine cv. Tempranillo to timing and amount of irrigation: water relations, vine growth, yield and berry and wine composition. *Irrig. Sci.* 28, 113–125.
- Intrigliolo, D.S., D. Pérez, D. Risco, A. Yeves and J.R. Castel. 2012. Yield components and grape composition responses to seasonal water deficits in Tempranillo grapevines. *Irrig. Sci.* 5, 339-349.
- Keller, M., K. Arnink and G. Hrazdina. 1998. Interaction of nitrogen availability during bloom and light intensiti during verarion. I. Effect on grapevine growth, fruit development, and ripening. *American Journal of Enology and Viticulture* 49: 333-340
- Keller LF, Waller DM. 2002. Inbreeding effects in wild populations. *Trends Ecol. Evol.*; 17:230-241.
- Keller, M. 2005. Deficit irrigation and vine mineral nutrition. *Am. J. Enol. Vitic.* 56: 267-283.
- Keller, M., R.P. Smithyman, and L.J. Mills. 2008. Interactive effects of deficit irrigation and crop load on Cabernet Sauvignon in an arid climate. *American Journal of Enology and Viticulture* 59, 221–234.
- Kenedy, A. J., M. A. Matthews and A. Waterhouse. 2002. Effect of maturity and vine water status on grape skin and wine flavonoids. *American Journal of Enology and Viticulture* 53(4): 269-274
- Kriedemann, P.E., and I. Goodwin. 2003. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying: an overview of principles and applications. *Irrigation insights* no. 4. (Land and Water Australia: Canberra).
- Matthews, M., R. Ishii, M. Anderson, and M. O mahony. 1990. Dependence of wine sensory attributes on vine water status. *J. Sci. Food Agric.* 51:231-335.
- McCarthy, M.G., B. Loveys, P. Dry, and M. Stoll. 2002. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. pp. 79-87. In: *Deficit irrigation practices, FAO Water Reports No. 22* Rome, Italy.
- Mori K., N. Goto-Yamamoto, M. Kitayama, H. Hashizume. 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *J Exp Bot* 58:1935–1945

- Nadal, M. and Arola, L. 1995. Effects of limited irrigation on the composition of must and wine of Cabernet sauvignon under semi-arid conditions. *Vitis* 34(3): 151-154.
- Ojeda, H., C. Andary, E. Kraeva, A. Carbonneau and A. Deloire. 2002. Influence of Pre- and Postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture* 53(4): 261-267
- Peyrot des Gachons, C., van Leeuwen, C., Tominaga, T., Soyer, J-P., Gaudillère, J-P., Dubourdieu, D. 2005. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon Blanc in field conditions. *J. Sci. Food Agric.* 85:73-85.
- Reynolds, A.G., T. Molek, C. De Savigny. 2005. Timing of shoot thinning in *Vitis vinifera*: Impacts on yield and fruit composition variables. *Am. J. Enol. Vitic.* 56: 343-356.
- Roby, G., Harbertson, J. F., Adams, D. A. and Matthews, M. A. (2004). Berry size and vine water deficits as factors in winegrape composition: anthocyanins and tannins. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 10: 100-107.
- Rogiers, S. Y., J. M. Hatfield and M. Keller. 2004. Irrigation, nitrogen, and rootstock effects on volumen loss of berries from potted Shiraz vines. *Vitis* 43(1): 1-6
- Romero, P., J.I. Fernández-Fernández, A. Martínez-Cutillas. 2010. Physiological thresholds for efficient regulated deficit-irrigation management in winegrapes grown under semiarid conditions. *Am. J. Enol. Vitic.* 61:3 (300-312).
- Santesteban, L.G., J. Bernardo Royo. 2006. Water status, leaf area and fruit load influence on berry weight and sugar accumulation of cv. 'Tempranillo' under semiarid conditions. *Sci. Hort.* 109: 60-65.
- Santesteban, L.G., C. Miranda and J.B. Royo. 2011. Regulated deficit irrigation effects on growth, yield, grape quality and individual anthocyanin composition in *Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo. *Agricultural Water Management.* 98: 1171-1179.
- Santos T.P., Lopes C.M., Rodrigues M.L., De Souza C.R., Ricardo-Da-Silva J.M., Maroco J.P., Pereira J.S., Chaves M.M. 2005. Effects of partial root-zone drying irrigation on cluster microclimate and fruit composition of field-grow Castelão grapevines. *Vitis*, 44: 117–125.
- Shiratake, K. and E, Martinoia. 2007. Transporters in fruit vacuoles. *Plant Biotech.* 24: 127-133.
- Sivilotti, P., C. Bonetto, M. Paladin and E. Peterlunger. 2005. Effect of soil moisture availability on Merlot: from leaf water potential to grape composition. *Am. J. Enol. Vitic.* 56(1): 9-18.
- Smith, F.A., and Raven, J.A., 1979. Intracellular pH and its regulation. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 30, 289–311.
- Van Leeuwen, C., O. Tregoat, X. Chone, B. Bois, D. Pernet, J.P. Gaudillere. 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *J. Int. Sci. Vigne Vin* 43, 121–134.

- Williams LE. and Baeza P. 2007. Relationships among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines. *Am J Enol Vitic* 58:173–181
- Williams, L. E. and M. A. Matthews. 1990. Grapevine. *Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy monograph.* 30: 1019-1055.
- Williams, L.E., N.K. Dokoozlian, R. Wample. 1994. Grape. In *Handbook of environmental physiology of fruit crops. Vol I. Temperate crops.* B. Schaffer and P.C. Andersen (Eds.), pp. 85-133. CRC Press, Boca Raton, Florida.

CAPÍTULO VIII:

CONCLUSIONES GENERALES.

Influencia del riego deficitario moderado aplicado en diferentes momentos del ciclo al consumo de agua y evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo.

La humedad del perfil del suelo resultó estar altamente relacionada con el aporte hídrico, el efecto de la escasez de lluvias en el periodo estival logró mitigarse mediante la aplicación de estrategias de riego.

En el desborre las cepas iniciaron su actividad con la reserva hídrica del suelo. Entre floración y envero esta reserva se fue agotando y hubo que suplantarla mediante el riego. El uso de riego deficitario, en dicha fase, afectó directamente al desarrollo vegetativo de la cepa, obteniéndose un canopy menor, y por consiguiente, un menor consumo de la planta.

Durante la maduración de la baya el contenido volumétrico de agua en el suelo mantuvo una relación directa con el riego aplicado:

- DM_c déficit moderado continuo; la planta desarrolló menor área foliar adaptándose a la limitación hídrica impuesta.
- DM_2 déficit moderado hasta pre-envero; en maduración se recuperó el perfil hídrico del suelo.
- DM_1 déficit moderado a partir de envero; el contenido volumétrico de agua en el suelo disminuyó drásticamente.
- T déficit ligero; las plantas no fueron eficientes en maduración. El contenido volumétrico de agua en el suelo no fue suficiente para cubrir las necesidades hídricas de la planta debido al excesivo desarrollo vegetal.

En el periodo activo de la vid el contenido volumétrico de agua en la zona de raíces disminuyó en función de la estrategia de riego utilizada, siendo más lento a medida que se aportó mayor dosis de riego.

En el ciclo activo de la vid el consumo de agua aumentó a medida que se incrementó la dosis de riego. Los periodos de cierre de racimos a envero y de envero a vendimia fueron los periodos de mayor consumo de la planta.

Influencia del déficit hídrico estacional en el intercambio gaseoso de la hoja y estado hídrico de la planta.

En una situación de riego deficitario en plantas del cv. Cabernet Sauvignon la estrategia de riego empleada afectó significativamente al intercambio gaseoso de la hoja una vez que disminuyó la reserva de agua en el suelo.

Valores elevados de la conductancia estomática ($g_s > 0,300 \text{ mol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), indicaron que la planta estaba bien hidratada; sin embargo los mecanismos de regulación del cierre estomático se vieron altamente dependientes de las condiciones ambientales del medio. El cierre progresivo de los estomas a lo largo del ciclo provocó una reducción de la fotosíntesis.

El Cabernet Sauvignon bajo condiciones de déficit moderado tuvo fisiológicamente un comportamiento anisohídrico, utilizando todo el agua disponible para su crecimiento y fisiología, a la espera de que el nivel de agua se mantuviera a lo largo del ciclo, pudiendo llegar a comprometer su supervivencia frente al agotamiento de la humedad del suelo.

Se estudiaron diferentes indicadores del estado hídrico de la vid, bajo condiciones de déficit moderado a lo largo del ciclo ($\psi > -1,4 \text{ MPa}$), obteniendo que el cierre estomático en respuesta al estrés hídrico sucede antes de los cambios detectables en el ψ o en el contenido volumétrico de agua en el suelo. Esto sugiere que la conductancia estomática (g_s) es un indicador más preciso y sensible a los cambios en el estado hídrico de la planta que el potencial hídrico foliar o la humedad del suelo, cuando trabajamos bajo un déficit hídrico de leve a moderado, aplicado bajo RDI. Además, g_s es más sensible al estrés hídrico de leve a moderado que la fotosíntesis y la transpiración.

En una situación de déficit hídrico moderado la actividad fotosintética estuvo altamente relacionada con el potencial hídrico foliar, mediante una función cuadrática negativa. Indicando que en condiciones menos extremas (en pre-verano) potenciales inferiores permitieron seguir aumentando la tasa fotosintética. Y en condiciones más limitantes, con demandas atmosféricas superiores (en pos-verano), la tasa fotosintética disminuyó con potenciales mayores.

La estrategia de riego influyó en la relación entre g_s y WUE_i . En pos-verano para valores de g_s similares, WUE_i fue menor cuando el agua de riego aplicado fue mayor. WUE_i y WUE aumentó cuando ψ estuvo entre $-1,3 \text{ MPa}$ y $-1,4 \text{ MPa}$ en pre-verano y -

1,4 MPa y -1,6 MPa en pos-envero. Y cuando g_s estuvo entre 0,100 y 0,150 mol·m⁻²·s⁻¹, independientemente del momento fenológico.

DPV influyó en la respuesta de WUE_i y WUE a la estrategia de riego en la maduración de la baya. Para valores de DPV 1,5 KPa, la eficiencia en el uso del agua (WUE) alcanzó su máximo para luego disminuir. Mientras que la eficiencia en el uso del agua intrínseca (WUE_i) alcanzó su máximo con déficit de presión de vapor mayor (DPV = 3 KPa).

Influencia del déficit hídrico estacional en la productividad y eficiencia de la planta.

El déficit hídrico aplicado en el periodo anterior y posterior al envero afecta de manera directa e indirecta a la productividad global de la planta.

Las diferencias encontradas en el rendimiento a causa de la disponibilidad hídrica fueron debidas primeramente al peso de la baya. Se obtuvo mayor peso de baya en cepas regadas desde floración, seguido por cepas que fueron regadas de floración a envero y finalmente las cepas que se empezaron a regar en envero. El déficit hídrico antes de envero fue más crítico para el rendimiento que el déficit impuesto durante la madurez.

La fertilidad expresada como racimos por sarmiento o bayas por racimo, no se vio afectada por la dosis de riego ni por el momento de aplicación del déficit.

Generalmente el aumento de la producción global de materia seca está asociado con la actividad fisiológica de la planta, la cual es altamente dependiente de la disponibilidad hídrica. La productividad de materia seca estuvo afectada por la disponibilidad hídrica y no por el momento de aplicación del riego.

En condiciones deficitarias el volumen de agua fue más determinante en la producción de uva que el momento de aplicación del déficit hídrico moderado. El rendimiento final estuvo altamente influenciado por el volumen de agua disponible durante el proceso activo de la cepa.

Influencia del déficit hídrico estacional en la composición química de la baya.

Bajo condiciones de déficit hídrico moderado la concentración de sólidos solubles de la baya de cv. Cabernet Sauvignon de cuajado a vendimia dependió del estado hídrico de la planta.

- El déficit moderado aplicado únicamente antes de envero, desarrolló bayas más pequeñas, aumentando la proporción pulpa:hollejo, y la baya hasta vendimia tuvo tiempo de rehidratarse manteniendo concentraciones de sólidos solubles moderadas en comparación con las obtenidas en climas cálidos.
- El déficit hídrico aplicado de envero a vendimia causó un efecto de deshidratación – concentración en los solutos de la baya.

El déficit hídrico moderado afectó directamente a la acidez de la baya en maduración. Las plantas sometidas a estrés antes de envero, desarrollaron menor área foliar, dejando los racimos expuestos a la radiación solar, que supuso un aumento en la temperatura del racimo, y por lo tanto, en la respiración de la baya, disminuyendo la acidez, aún con riego, igualmente en maduración.

Bajo condiciones de déficit hídrico moderado la acumulación de compuestos polifenólicos se mostró insensible a los cambios en el estado hídrico de la planta de cuajado a pre-envero. Pero en la maduración de la baya, de envero a cuajado, la concentración de antocianos extraíbles en mosto estuvo altamente relacionada con el estado hídrico de la cepa describiendo una relación lineal, y el contenido de polifenoles también se vio afectado por el estado hídrico de la planta manteniendo una relación cuadrática positiva.