

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***

**EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE LA VARIEDAD DE
VID “TEMPRANILLO” PARA LA TOMA DE DECISIONES DE RIEGO**

presentado por

Javier Eraso Zabalegui -*k*

aurkeztua

**INGENIERO AGRONOMO
*NEKAZARITZA INGENIARITZA***

Febrero 2011

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

NAFARROAKO UNIBERTSITATE PUBLIKOA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

***NEKAZARITZA INGENIARITZAREN GOI-MAILAKO ESKOLA
TEKNIKOA***

“Evaluación de métodos de estimación del estado hídrico de la variedad de vid
“Tempranillo” para la toma de decisiones de riego”

Trabajo Fin de Carrera presentado por Don Javier Eraso Zabalegui al objeto de optar al
título de Ingeniero Agrónomo. Dirigido por Gonzaga Santesteban García.

Director

Autor

Zuzendaria

Egitea

L.Gonzaga Santesteban

Javier Eraso Zabalegui

Agradecimientos:

A Gonzaga Santesteban, director del trabajo,
por su ayuda en todo momento y por enseñarme tanto sobre viticultura.

A Mariaje y a todo el departamento de Producción Vegetal
por ayudarme con el trabajo.

A la Fundación Fuentes Dutor
y al Gobierno de Navarra (Departamento de Innovación, Empresa y Empleo)
por haber hecho posible mediante su financiación este trabajo.

Al personal de Bodegas Ochoa
por su entera disponibilidad.

A mis padres Juanjo y Ascen,
a mis hermanos Juan y Miguel,
y a toda mi familia,
por todo el cariño y comprensión que me han dado siempre.

Y sobre todo a Irantzu,
por todo su apoyo y paciencia.

RESUMEN

Palabras clave: *Vitis vinifera* L., estrés hídrico, potencial hídrico, temperatura de canopy, dendrometría, riego.

Keywords: *Vitis vinifera* L., water stress, water potential, canopy temperature, dendrometry, irrigation.

El manejo de la alimentación hídrica de la vid tiene numerosas implicaciones agronómicas, ya que afecta de manera fundamental a la cantidad y calidad de la cosecha. Si se quiere conseguir uva de buena calidad, será muy importante el manejo adecuado del riego. Por este motivo será fundamental el empleo de métodos adecuados de evaluación del estado hídrico de la planta para conocer las necesidades de agua de la misma. De esta manera, se podrá hacer un buen manejo del riego manteniendo las condiciones de estrés más adecuadas para cada momento del ciclo.

El objetivo del presente Trabajo Fin de Carrera es comparar procedimientos de estimación del estado hídrico de la vid basados en la medida del potencial hídrico, de la temperatura de canopy y de la dendrometría, valorando su adecuación para ser utilizados como herramienta en la toma de decisiones de riego.

El ensayo se realizó en diferentes viñas, en el término municipal de Traibuenas. Se estudiaron zonas del viñedo que recibían 3 dosis diferentes de riego y en días con diferentes condiciones climáticas para obtener mayor variabilidad. Los métodos de estimación del estrés hídrico estudiados son el potencial hídrico foliar antes del amanecer (Ψ_{fa}), el potencial xilemático a media mañana (Ψ_{x}^9), el de mediodía (Ψ_{x}^{12}), la temperatura de canopy (mediante termografía) y la dendrometría.

De los métodos de estimación del estado hídrico estudiados, la medida del potencial hídrico foliar antes del amanecer y del potencial xilemático a las 9:00 h han sido los únicos que han permitido, en las condiciones de estudio, valorar el estado hídrico de la vid con suficiente adecuación como para ser considerados como herramientas de toma de decisiones de riego. En cuanto a la dendrometría y a la termografía, habría que profundizar más su estudio (en la interpretación de las tendencias de crecimiento y en la utilización de superficies de referencia respectivamente) para mejorar su capacidad de valorar el estado hídrico de la vid.

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES	1
1.1. Importancia del manejo del agua	1
1.1.1. Funciones	1
1.1.2. Movimiento del agua en la planta	2
1.1.2.1. Absorción	2
1.1.2.2. Transpiración	3
1.1.2.3. Transporte	3
1.2. Importancia del manejo del agua en la vid	3
1.2.1. Efectos sobre el desarrollo vegetativo	4
1.2.2. Efectos sobre el desarrollo reproductivo y la producción	5
1.2.3. Efectos sobre la calidad de cosecha	5
1.3. Determinación del estado hídrico en viñedo	6
1.3.1. Métodos de estimación	6
1.3.1.1. Humedad del suelo	6
1.3.1.2. Cálculos de balance hídrico en el suelo	8
1.3.2. Métodos directos	8
1.3.2.1. Potencial hídrico	8
1.3.2.2. Potencial xilemático	10
1.3.2.3. Dendrometría	11
1.3.2.4. Temperatura de la planta	12
1.3.2.5. Flujo de savia	13
1.3.2.6. Apertura estomática	13
1.3.2.7. Ratio de discriminación isotópica del carbono	13
1.3.3. Comparación de los distintos métodos	14
1.3.3.1. Ventajas e inconvenientes de cada método	14
1.3.3.2. Experiencias en viticultura comparando los diferentes métodos	17
2. OBJETIVO	19
3. MATERIAL Y MÉTODO	20
3.1. Materiales	20
3.1.1. Material vegetal	20
3.1.2. Material instrumental	20
3.2. Método	20
3.2.1. Diseño del ensayo	20
3.2.2. Controles realizados	22
3.2.2.1. Potencial hídrico foliar antes de amanecer (Phaa)	22
3.2.2.2. Potencial xilemático (ψ_x^9 , ψ_x^{12})	24
3.2.2.3. Temperatura de canopy (TCan)	24
3.2.2.4. Dendrometría	26
3.2.3. Variables climáticas	28
3.2.3.1. Parámetros registrados	28
3.2.4. Tratamiento de datos	28
3.2.4.1. Índice de capacidad de discriminación e índice de errores	28
3.2.4.2. Ratio de discriminación	30

4. RESULTADOS.....	32
4.1. Descripción de los tratamientos de riego.....	32
4.1.1. Evolución del potencial hídrico foliar antes del amanecer.....	32
4.2. Evaluación de la capacidad de discriminación de las medidas de potencial hídrico y T ^a de canopy a distintas horas del día.....	35
4.2.1. Índice de capacidad de discriminación e índice de errores.....	35
4.2.2. Ratio de discriminación.....	38
4.2.3. Valoración global.....	39
4.3. Evaluación del interés de la dendrometría para la estimación del estado hídrico del viñedo.....	39
4.3.1. Evolución del crecimiento del tronco.....	39
4.3.2. Índice de capacidad de discriminación e índice de errores.....	41
4.3.3. Ratio de discriminación.....	44
4.3.4. Valoración global.....	44
4.4. Discusión general.....	44
5. CONCLUSIONES.....	46
6. BIBLIOGRAFÍA.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterio utilizado para puntuar el orden de los subconjuntos.....	30
Tabla 2. Índice de la capacidad de discriminación observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en el potencial hídrico y la temperatura de canopy.....	35
Tabla 3. Índice de errores observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en el potencial hídrico y la temperatura de canopy.....	36
Tabla 4. Índice de capacidad de discriminación total observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en el potencial hídrico y la temperatura de canopy.....	37
Tabla 5. Ratio de discriminación observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en el potencial hídrico y la temperatura de canopy..	38
Tabla 6. Índice de la capacidad de discriminación observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en la dendrometría.....	41
Tabla 7. Índice de errores observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en la dendrometría.....	42
Tabla 8. Índice de capacidad de discriminación total observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en la dendrometría.....	43
Tabla 9. Ratio de discriminación observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en la dendrometría.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rutas simplástica y apoplástica.....	2
Figura 2. Suelo laboreo.....	21
Figura 3. Suelo cubierta.....	21
Figura 4. Suelo cascajo.....	22
Figura 5. Cámara de presión para medida del potencial hídrico.....	23
Figura 6. Gota de savia sobre el peciolo.....	23
Figura 7. Bolsa para medida del potencial xilemático.....	24
Figura 8. Toma de termografía.....	25
Figura 9. Tratamiento de las termografías.....	25
Figura 10. Estación transmisora de datos.....	26
Figura 11. Dendrómetro.....	27
Figura 12. Evolución del Phaa en los distintos suelos.....	32
Figura 13. Evolución del Phaa según los diferentes tratamientos de riego.....	33
Figura 14. Evolución de los diámetros de los troncos durante el ciclo productivo.....	39

1. ANTECEDENTES

1.1. Importancia del manejo del agua

El agua es el componente químico más abundante en las plantas. En los tejidos de las plantas herbáceas alcanza valores entre 80-85% del peso fresco, y en las partes leñosas más del 50 %. Del agua total contenida en las plantas, entre un 60-90% se encuentra situada en el interior de las células (agua simplástica) mientras que el resto (10-40% del total) está en las paredes celulares. El agua en las paredes celulares forma un continuo con células especializadas en el transporte de agua a lo largo de la planta (agua apoplástica). El volumen total de agua en una planta es muy pequeño en relación al volumen total de agua transpirada a lo largo de su ciclo vital; de toda el agua absorbida por una planta a lo largo de su ciclo vital, aproximadamente un 95% se pierde por transpiración y sólo el 5% se usa en metabolismo o crecimiento (Kramer, 1983). Incluso a nivel diario, el volumen de agua dentro de la planta es a menudo insuficiente para compensar el déficit en las necesidades de agua transpirada que ocurren en un día cálido y soleado. Las grandes cantidades de agua transpiradas por la planta en relación a la contenida en los tejidos puede considerarse como el coste que la planta tiene que pagar por abrir los estomas para permitir la entrada de CO₂ para la fotosíntesis.

1.1.1. Funciones

El agua es un factor muy importante de estudio a la hora de manejar un cultivo y es necesaria para el funcionamiento de todos los vegetales. Penetra por las raíces en estado líquido, circula por los tallos y sale por las hojas en forma de vapor. El agua desempeña una serie de funciones en la planta entre las que se puede destacar (Santesteban & Royo 2008):

1. Es el disolvente universal que posibilita el medio donde ocurren las reacciones bioquímicas de las células. Además el agua interviene directamente en muchas reacciones químicas que ocurren en las células.
2. Es el medio de transporte de sustancias, en el floema y en el xilema; e interviene en movimientos decisivos de las plantas (apertura y cierre de estomas).
3. Mantiene las células turgentes en hojas, raíces y otros órganos, resolviendo los problemas de sostén de algunas plantas.
4. Interviene en el intercambio y movimiento continuo de las sustancias disueltas a través de las paredes celulares.
5. Absorbe la energía calorífica que se desprende en las reacciones metabólicas, por efecto de su gran inercia térmica, y permite regular la temperatura de la planta sin que ésta suba demasiado.
6. Es la fuente de las dos reacciones químicas más importantes en las plantas, la fotosíntesis y la respiración.

7. El agua posee un potente efecto hidrófobo que permite mantener la estructura de las moléculas orgánicas y la disposición de las bicapas lipídicas de las membranas.

1.1.2. Movimiento del agua en la planta

1.1.2.1 Absorción

La **absorción** del agua se puede dar por las raíces y por las hojas.

En el caso de las raíces, el desplazamiento del agua desde el suelo hasta la raíz es la primera etapa del flujo hídrico en el sistema continuo suelo-planta-atmósfera. Las plantas utilizan el agua libre y el agua de capilaridad del suelo (fuente esencial en periodos de sequía). El agua entra en la mayoría de las plantas por las raíces por ósmosis, especialmente por los pelos absorbentes, situados unos milímetros por encima de la cofia. Estos pelos, largos y delgados poseen una elevada relación superficie/volumen y, pueden introducirse a través de los poros del suelo de muy pequeño diámetro. Los pelos absorbentes incrementan de esta manera la superficie de contacto entre la raíz y el suelo. Estos pelos absorbentes, son células que contienen una gran vacuola y se forman constantemente ya que su vida es poco duradera. Desde los pelos absorbentes, el agua se mueve a través de la corteza, la endodermis (la capa más interna de la corteza) y el periciclo, hasta penetrar en el xilema primario. Este movimiento está causado por la diferencia de potencial entre la corteza de la raíz y el xilema de su cilindro vascular, y el camino seguido estará determinado por las resistencias que los caminos alternativos pongan a su paso. Hay que distinguir dos caminos alternativos: el simplasto (conjunto de protoplastos interconectados mediante plasmodesmos) y el apoplasto (conjunto de paredes celulares y espacios intercelulares) (Figura 1).

Figura 1. Rutas simplástica y apoplástica.



Se piensa que el agua discurre en la raíz mayoritariamente por la vía apoplástica mojando paredes y espacios intercelulares ya que se considera que el apoplasto formado principalmente por celulosa y otras sustancias hidrófilas, presenta una menor resistencia

al paso de agua que el simplasto, en el que abundan lípidos, sustancias hidrófobas, orgánulos y partículas que aumentan la viscosidad del medio.

La absorción del agua por las hojas tiene menos importancia que la absorción radicular, ya que la cantidad así absorbida es mucho menor. Es debida principalmente a la humedad atmosférica, los rocíos y las nieblas. El mayor interés de esta absorción, reside en la aplicación de abonos foliares. En hojas el agua penetra por los estomas, y también puede llegar a filtrarse por la cutícula epidérmica. (Ribéreau-Gayon & Peynaud, 1982).

1.1.2.2. Transpiración

La **transpiración** es la pérdida de agua, en forma de vapor, a través de las distintas partes de la planta, si bien, se realiza fundamentalmente por las hojas (a través de la cutícula y por los estomas). La transpiración esta íntimamente relacionada con una función de vital importancia para el crecimiento de las plantas, la fotosíntesis. La absorción de dióxido de carbono para la fotosíntesis y la pérdida de agua por transpiración están inseparablemente enlazadas en la vida de las plantas verdes, y todas las condiciones que favorecen la transpiración favorecen la fotosíntesis. Se ve afectada por factores ambientales (temperatura, luz, humedad relativa y viento) y por factores internos (número y superficie de las hojas, número y apertura de los estomas y composición celular). (Ribéreau-Gayon & Peynaud, 1971).

1.1.2.3. Transporte

Una vez alcanzado el xilema de la raíz, el agua con iones y moléculas disueltas asciende por los lúmenes de tráqueas y traqueidas, y se distribuye por ramas y hojas hasta las últimas terminaciones del xilema inmersas en el tejido foliar. El xilema es un tejido especialmente adaptado para el transporte ascendente del agua a lo largo de la planta, ya que además de recorrerla en toda su longitud, sus elementos conductores, dispuestos en hileras longitudinales, carecen de protoplasma vivo en su madurez; de esta forma los elementos se convierten en los sucesivos tramos de vasos más o menos continuos por los que el agua circula como en una tubería. En el transporte ascendente del agua, intervienen las fuerzas capilares, y la cohesión del agua (afinidad de las moléculas del agua entre sí). Además, los vasos pueden dilatarse o comprimirse según el agua que reciban (dificultando de esta manera su paso, ya que se aumenta la resistencia al flujo de agua (Lovisol & Schubert, 1998). Estas pequeñas variaciones, se ven reflejadas en el diámetro del tronco, el cual también varía y se puede medir por medio de los dendrómetros.

1.2. Importancia del manejo del agua en la vid

El manejo de la alimentación hídrica de la vid tiene numerosas implicaciones agronómicas, ya que afecta de manera fundamental a la cantidad y calidad de la producción. Si se quiere conseguir uva de buena calidad, será muy importante el manejo adecuado del riego.

En la uva, se busca la abundancia de “compuestos nobles” (colores, aromas...) para desarrollar a posterior un buen vino. Estos compuestos (antocianos, taninos...) se encuentran principalmente en el hollejo de de la uva, por lo que se buscará una relación

hollejo/pulpa grande, siendo deseables bayas pequeñas. Esto generalmente se consigue con un riego deficitario que provoque cierto grado de estrés hídrico a la planta.

La vid responde a las condiciones de estrés a través de dos mecanismos:

- Disminución de la conductividad hídrica del continuo suelo-planta-aire: a nivel del xilema se produce una disminución del diámetro de los vasos, que aumenta la resistencia al flujo de agua (Lovisolo & Schubert, 1998) y en la hoja se produce el cierre estomático. El cierre estomático puede producirse también como respuesta a otros estímulos ambientales: iluminación, contenido en CO₂ intracelular, humedad ambiental y temperatura.
- Ajuste osmótico: se produce un aumento en la concentración de solutos osmóticamente activos, consiguiéndose una disminución en el potencial hídrico foliar, lo que permite a la planta extraer agua del suelo en condiciones limitantes.

No todas las variedades presentan las mismas necesidades hídricas ni la misma capacidad de adaptación y respuesta a diferentes niveles de sequía. Por lo tanto, estudiar las relaciones hídricas de las distintas variedades es necesario para establecer el riego según las particularidades de cada parcela (Santesteban *et al*, 2009).

Los efectos hídricos varían según la época de riego y la cantidad de este, además, cobra gran importancia el efecto positivo del estrés.

1.2.1. Efectos sobre el desarrollo vegetativo

El desarrollo vegetativo viene determinado en gran medida por la disponibilidad de agua, aumentando éste y la madera de poda conforme se aumenta el agua de riego. En condiciones naturales el estrés hídrico durante el verano limita el desarrollo vegetativo, pero los regadíos permiten al viticultor manejar el riego. El control del agua disponible para la viña es importante ya que nos permitirá controlar el vigor de las cepas.

Si se aporta un riego sin ningún tipo de restricción, el desarrollo vegetativo es excesivo y puede llegar a competir por los fotoasimilados con las bayas de uva. Con demasiado desarrollo vegetativo, pueden aparecer problemas de maduración (más lenta debido a la competencia entre frutos y brotes) y se favorece el desarrollo de enfermedades debido al aumento de humedad y a la sombra producida (Pellegrino *et al*, 2006).

Un déficit de agua severo disminuye la producción de fotoasimilados, disminuyendo el rendimiento y la calidad de la cosecha, además, se produce el cierre de los estomas limitándose la fotosíntesis y disminuyendo el área foliar y la luz interceptada (Pellegrino *et al*, 2006).

Un riego con un estrés hídrico regulado permite al viticultor controlar el desarrollo vegetativo de sus cepas. Esto se consigue mediante un riego deficitario durante la temporada entera o solo en algún-os estado-s fenológico-s. (Intrigliolo & Castel, 2009)

1.2.2. Efectos sobre el desarrollo reproductivo y la producción

Todos los autores están de acuerdo en que el riego aumenta la producción. Relacionando una parcela de secano con una de regadío, se observa como el aumento de producción en la zona regada puede ser del 23 al 65% respecto a la otra (García-Escudero *et al.*, 1997) y del 22% (Intrigliolo & Castel, 2009).

Este aumento de producción es debido principalmente al aumento del tamaño de la baya, ya que este parámetro es el componente del rendimiento más afectado por la disponibilidad de agua (Baeza *et al.*, 2007; Esteban *et al.*, 1999; Salón *et al.*, 2005). Este aumento de tamaño de baya se da durante dos estados principalmente: durante la fase I (formación de células en las bayas) y durante la fase III (maduración), siendo más sensible a la fase I.

En cuanto al aumento de producción por un aumento de fertilidad, los autores discrepan. Para Esteban *et al.* (1999), el riego aumentó tanto el tamaño de las bayas como el número de racimos por cepa. Sin embargo para Salón *et al.* (2005), Baeza *et al.* (2007) e Intrigliolo & Castel (2009) no hubo diferencias significativas entre el número de racimos por cepa ni en número de bayas por racimo. Estos autores concluyeron que podía ser debido a que al agua del invierno supliera las necesidades de hídricas durante la inducción floral.

1.2.3. Efectos sobre la calidad de cosecha

Se han realizado numerosos estudios de cómo el riego (o la ausencia de éste) afecta a la calidad de la cosecha. Los resultados no son muy claros ya que han dado diferentes datos a los distintos autores. Esto es en parte debido a que la calidad de la uva no es fácil de definir, ya que comprende muchos conceptos y a que depende de muchas variables. Algunas características son difíciles de determinar o requieren de análisis químicos que difícilmente se pueden llevar a cabo durante la maduración de una manera continua. Aún así, los viticultores necesitan parámetros fácilmente medibles y simples para realizar las operaciones pertinentes para conseguir la mejor calidad posible de la cosecha (Santesteban & Royo, 2006). El tamaño de la baya y la concentración de azúcar son parámetros fácilmente medibles. Y aunque por si solos no pueden evaluar la calidad de la cosecha, son útiles, ya que si se consiguen bayas pequeñas con alta concentración de azúcar, probablemente se consiga una cosecha de cierta calidad. Es decir, se obtendrá una relación alta de hollejo/pulpa.

Con los diferentes estudios se ha observado que un riego moderado con momentos de déficit hídrico tiene una acción más positiva en la calidad de la cosecha que un riego en el que se aporta agua subsanando todas las necesidades y evitando los momentos de estrés.

Como se ha dicho, el grado de azúcar es un parámetro importante de la calidad de la cosecha, además se ve influenciado de manera notable por la disponibilidad de agua. Dosis altas de riego provocan una reducción de la concentración de azúcar ya que se producen bayas más grandes en las que el azúcar queda diluido. Además puede haber competencia por los fotoasimilados entre bayas y pámpanos. Déficits severos de agua, disminuyen la actividad de la planta disminuyendo la cantidad de fotoasimilados y disminuyendo por tanto la cantidad de azúcar. Por lo tanto, un estrés moderado durante

la fase I (multiplicación celular en la baya) y un riego no excesivo en la fase III (maduración) permitirá obtener una cosecha de bayas pequeñas y con una alta concentración de azúcar.

La síntesis de ácidos en la vid se produce principalmente durante la fase herbácea, siendo estos principalmente el málico y el tartárico; y en menor medida el cítrico. A partir de enero y durante la maduración, la acidez disminuye por dilución (debido al aumento del tamaño de los granos), por respiración (ácido málico) y por disolución-movilización (ácido tartárico). La disminución de la acidez se produce sobre todo por la respiración degradándose ácido málico, esta respiración es muy sensible a temperaturas altas. El vigor favorece la riqueza en málico de tres formas diferentes: aumenta la síntesis foliar, retrasa la madurez y mantiene la uva en un microclima más fresco (Santesteban L.G.; Apuntes viticultura 2008-2009). Controlado el vigor mediante el riego, de manera indirecta se podría controlar la cantidad de ácidos presentes en la cosecha. No obstante, en numerosos estudios llevados a cabo no queda muy claro si el riego afecta de manera directa a la cantidad de ácidos: Reynolds *et al.* (2005), Stevens *et al.* (1995), Sivilotti *et al.* (2005), Walker *et al.* (2005) y Baeza *et al.* (2007) no encontraron relaciones significativas entre régimen hídrico y pH; mientras que Esteban *et al.* (1999), Salón *et al.* (2005) e Intrigliolo & Castel (2009) si encontraron relaciones. Esto puede ser debido a lo explicado, las cepas regadas tienen más crecimiento vegetativo, lo que disminuye la exposición de los racimos al sol, creando un microclima que favorece la retención del ácido málico.

Las “sustancias nobles” (antocianos, aromas, taninos) se encuentran sobre todo en el hollejo, es por esto por lo que cuanto mayor sea la relación hollejo/pulpa, mayor será la presencia de estas sustancias en la uva cosechada. El máximo se produce en unas condiciones de estrés moderado.

1.3. Determinación del estado hídrico en viñedo

Vista la importancia de la aplicación del agua para el desarrollo del viñedo y la obtención de una cosecha adecuada a los objetivos de la plantación, será fundamental el empleo de métodos adecuados de evaluación del estado hídrico de la planta para conocer las necesidades de agua de la misma. De esta manera, se podrá hacer un buen manejo del riego manteniendo las condiciones de estrés más oportunas en cada momento, lo que repercutirá en el área foliar y la cantidad de fotoasimilados producidos, el nivel de azúcar en la baya y el peso de esta entre otros. Existen diferentes métodos para medir la cantidad de agua disponible para la planta, se pueden distinguir principalmente entre métodos de estimación y métodos directos.

1.3.1. Métodos de estimación

1.3.1.1. Humedad del suelo

La humedad del suelo es la cantidad de agua que hay en el suelo en un determinado momento. Existen al menos dos tipos de medidas relacionadas con el agua del suelo que son importantes de cara a la planificación y gestión del riego, el contenido hídrico y el potencial hídrico del suelo.

El contenido hídrico se refiere normalmente a la masa de agua contenida por unidad de masa del suelo (humedad gravimétrica) o volumen de agua por unidad de volumen de suelo (humedad volumétrica). Este valor describe la cantidad de agua almacenada en el suelo, y puede ser medido directamente por muestreo, o estimado con sondas de neutrones (equipos de difícil manejo por emplear partículas radioactivas) o sondas TDR (*Time Domain Reflectometry*) de más reciente desarrollo. En las sondas TDR la medición se realiza a través de varillas introducidas en el suelo, no requiere la toma de muestras, pudiendo realizar las mediciones siempre en el mismo punto.

El agua en el suelo se encuentra almacenada en poros de diferente tamaño, los cuales condicionan su velocidad de paso y su facilidad de absorción por la vegetación. Según el tamaño del poro en el que se encuentra, podemos hablar de: agua gravitacional (en grietas y poros de mayor tamaño, drena libremente), agua capilar (en los capilares del suelo, se mueve por capilaridad y es aprovechable por la vegetación), agua higroscópica (adherida a las partículas del suelo y fuertemente retenida por ellas) y agua estructural (que forma parte de las partículas de suelo). Cuando todos los microporos (capilares) del suelo están llenos de agua, el suelo está en Capacidad de Campo, y el suelo se encuentra en el Punto de Marchitez cuando las plantas no pueden absorber el agua del suelo. La Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD) en el suelo es la diferencia entre Capacidad de Campo y Punto de Marchitez y se trata del agua disponible para la planta. Cuanto más cerca se esté del Punto de Marchitez, más difícil será para la planta obtener agua del suelo. El potencial matricial es una medida del potencial hídrico del suelo (la fuerza con la que el suelo retiene el agua). Se mide generalmente con tensiómetros, que se suelen colocar a distintas profundidades para estudiar los valores de los distintos conceptos explicados y, de esta manera estimar la cantidad de agua presente en el suelo y la que es necesario aportar en forma de riego.

Experiencias en viticultura:

Asenjo & Yuste (2003) estudiaron la relación entre las estimaciones del estado hídrico del suelo (por tensiometría y volumetría) con el estado hídrico del viñedo (utilizando como estimador de este el potencial hídrico foliar antes del amanecer). Para ello, colocaron tensiómetros a 30 y a 60 cm de profundidad y una sonda TDR de 60 cm (contenido medio en volumen de los 60 primeros centímetros). El potencial hídrico foliar antes del amanecer fue medido entre los meses de junio y septiembre. Encontraron una mayor relación entre las medidas de TDR con las de tensiometría a 30 cm que con las de 60 cm de profundidad, en consonancia con la forma de aplicación y las distintas dosis de riego aplicadas. Las medidas de TDR y de tensiometría a 60 cm apenas se relacionaron con el potencial hídrico de la vid. Por el contrario, la relación entre el estado hídrico de la planta y el potencial matricial del suelo a 30 cm resultó muy estrecha. Concluyeron, que en las condiciones del ensayo, las medidas tensiométricas a 30 cm pueden ser una herramienta útil para la monitorización del riego.

Williams *et al.* (2005) estudiaron la relación entre las medidas basadas en la cantidad de agua presente en el suelo (mediante lisímetros a 2 y 4 metros de profundidad) y el estado hídrico de una variedad de vid (mediante medidas de potencial hídrico foliar antes de amanecer y al mediodía). Concluyeron que las medidas del lisímetro se aproximaban notablemente a las necesidades de la planta, por lo que el riego basado en estas medidas era correcto.

Centeno *et al.* (2010) relacionaron la disponibilidad de agua en el suelo con el estado hídrico de la planta para determinar un valor umbral del potencial mátrico a partir del cual se active el riego. Realizaron medidas del potencial hídrico del suelo (a 0.3m, 0.6m y 1.2m) con tensiómetros, del potencial hídrico de la hoja y de la conductancia estomática según distintas dosis de riego (45%, 30% de la evapotranspiración de referencia y nada de riego). Obtuvieron altas correlaciones entre las medidas del potencial hídrico del suelo y el potencial hídrico de la hoja y la conductancia estomática. Integrando sus datos con los de estudios anteriores determinaron un umbral de 0,12 MPa a partir del cual se debería activar el riego para evitar un grave estrés hídrico durante el crecimiento de la baya.

1.3.1.2. Cálculos de balance hídrico en el suelo

El balance hídrico es el seguimiento de la cantidad de agua que hay en el suelo a largo del año. Para ello, se tienen en cuenta los aportes de agua al suelo (por precipitaciones y/o riego) y los consumos (transpiración) y pérdidas de agua (evaporación). Para estimar los consumos y pérdidas, con la ayuda de datos climáticos, se hace una estimación del agua consumida en transpiración y pérdida por evaporación (evapotranspiración) de un suelo de referencia (1 m² de una pradera *ray-grass*, de una altura de entre 8 y 15 cm y bien regada). Según el tipo de cultivo que se maneje y el estado fenológico en el que se encuentre, se multiplicará por un coeficiente Kc (coeficiente de cultivo) obteniendo la evapotranspiración del mismo. A partir de la diferencia entre los aportes de las precipitaciones y la evapotranspiración, se puede, cada mes, saber si el suelo se encuentra seco o húmedo y cuantificar las necesidades de riego. Es un método sencillo, pero requiere de datos climáticos fiables para la parcela estudiada y es necesario un coeficiente de cultivo preciso; igualmente, hay que tener en cuenta que el error del método es acumulativo y necesita recalibración.

Experiencias en viticultura:

El balance hídrico del suelo es muy utilizado por numerosos autores para sus ensayos y trabajos. Muchos de estos autores establecen distintos tratamientos de riego en función de la evapotranspiración de referencia. Algunos ejemplos son: Baeza *et al.* (2007), Intrigliolo & Castel (2009), Girona *et al.* (2009)...

1.3.2. Métodos directos

1.3.2.1. Potencial hídrico

El potencial hídrico foliar es una medida directa del estado hídrico de la planta y se realiza directamente en campo mediante una cámara de presión. La relación suelo-planta-atmósfera relativa a la disposición de agua que hay en el suelo para la planta, hará que los potenciales hídricos de las distintas partes de la planta varíen. Cuando la disponibilidad de agua en el suelo es baja (por ejemplo en una situación de estrés), la planta tiene que hacer más fuerza para absorberla aumentando la presión osmótica y disminuyendo el potencial hídrico foliar. Es por esto por lo que la determinación de este potencial es un indicador del estado hídrico de la hoja.

La medición consiste en colocar un órgano (hoja, tallo, etc.) en una cámara, dejando fuera de ella una pequeña porción de dicho órgano. Desde un reservorio o tubo

se inyecta gas inerte comprimido (nitrógeno) para aumentar la presión interna de la cámara y provocar el reflujo de savia por los vasos de conducción (xilema), hasta que aparezca la savia en forma de gota sobre el corte. Cuando esto ocurre, se corta el paso de nitrógeno y se alcanza el "punto final". En este momento la presión en la cámara es similar a la tensión de la savia en los vasos del órgano, y su manómetro proporciona el valor del potencial hídrico, que se mide en bares o mega pascales (MPa), siendo 1 bar = 0,1 MPa, considerándose siempre como valores negativos. Cuanto mayor sea el estrés hídrico de la planta, mayor será la presión que se debe imprimir a la cámara para vencer la tensión y lograr el reflujo de savia.

Las mediciones se realizan a distintas horas del día recibiendo los siguientes nombres:

- Potencial hídrico antes del amanecer (también llamado de base): se mide antes de amanecer, cuando la planta ha logrado su máxima re-hidratación y alcanzado un equilibrio con la humedad del suelo.
- Potencial hídrico del mediodía: se alcanza el mínimo potencial en la mitad de la jornada, reflejando así la dinámica de desecamiento en el curso del día, debido a la transpiración y a la limitación de absorción de agua.
- También se puede realizar a media mañana.

Experiencias en viticultura:

Es muy común el uso del potencial hídrico en ensayos y trabajos relacionados con la viticultura. Uno de los métodos más utilizados en el viñedo es el potencial hídrico foliar antes del amanecer. En estas condiciones los estomas están cerrados, cesa la transpiración de la vid y se produce una rehidratación de la planta en función del contenido de humedad del suelo. Este proceso provoca un reequilibrio entre el potencial matricial de suelo y el potencial hídrico de la planta. El potencial antes del amanecer es un indicador más estable y fácil de interpretar que los potenciales hídricos foliares medidos a lo largo del día y además aporta información acerca de la disponibilidad de agua en la zona explorada por las raíces (Van Leeuwen, 2003). Por otra parte, la relación entre el potencial foliar antes del amanecer y la actividad fisiológica de la vid se encuentra descrita en los trabajos de Carbonneau (1998), donde relaciona el potencial foliar antes del amanecer y el grado de estrés hídrico, y Deloire *et al.* (2003), quien relaciona los potenciales hídricos foliares de base con el crecimiento vegetativo y con el proceso de maduración de la uva. Por estos motivos Asenjo J. & Yuste (2003) relacionaron el estado hídrico del suelo con el estado hídrico del viñedo.

Santesteban *et al.* (2006) utilizaron el potencial hídrico foliar antes del amanecer para determinar el estado hídrico de los viñedos. Los mismos autores en Santesteban *et al.* (2009) utilizaron el mismo potencial para manejar los distintos tratamientos hídricos.

Girona *et al.* (2006) estudiaron el uso de potencial hídrico foliar de mediodía para llevar a cabo el manejo de un riego deficitario en viñedos. Llegaron a la conclusión de que el potencial foliar medido al mediodía podría ser utilizado para manejar el riego de un viñedo ya que este método aumenta la precisión del riego con resultados repetitivos y que podría llegar a mejorar la homogeneidad del mosto, factor clave en la producción de vino.

Baeza *et al.* (2007) estudiaron las relaciones entre los potenciales hídricos a distintas horas (antes del amanecer, a media mañana y al mediodía) con otros parámetros como la fotosíntesis neta, el crecimiento de pámpanos, el peso de baya y la composición del mosto. Concluyeron, entre otras cosas, que la fotosíntesis neta estaba relacionada linealmente con las medidas de potencial hídrico foliar y que el tamaño de baya estaba mejor correlacionado con el potencial de antes del amanecer que con el de media mañana y el de mediodía (aunque estos se relacionaban también correctamente).

Girona *et al.* (2009) igualmente, realizaron un estudio de cómo afecta el estrés hídrico al crecimiento de la baya y a la composición de la uva. Para ello, el seguimiento del estado hídrico de las cepas fue llevado a cabo mediante medias de medidas del potencial hídrico foliar y de potencial hídrico xilemático. Encontraron relaciones entre peso de baya y las medidas de potencial hídrico foliar, a mayor estrés, menor tamaño de baya.

1.3.2.2. Potencial xilemático

Es una medida similar al potencial hídrico, se mide con la misma cámara de presión y de igual manera. Antes de la medida, se meten las hojas en bolsas que mantienen la hoja a oscuras y evitan que ésta transpire y realice la fotosíntesis. La hoja tiene que estar en esta situación al menos una hora y media antes de la medición, de esta manera, la transpiración es prácticamente cero y el potencial hídrico foliar se iguala con el xilemático. Cuando se mide con la cámara de presión, se obtiene el valor del potencial xilemático. Esta medida se realiza durante el día, generalmente a media mañana y al mediodía.

La medida del potencial xilemático indica la capacidad de la cepa de conducir agua desde el suelo hasta la atmósfera (Choné *et al.* 2001). El éxito de esta medida como indicador del estado hídrico de la planta reside en la poca variabilidad que presenta este parámetro comparado con la del potencial hídrico foliar. Además, el potencial hídrico xilemático, representa el estado hídrico de toda la planta, mientras que el potencial hídrico foliar representa el potencial de una hoja (Acevedo-Opazo *et al.* 2010).

Experiencias en viticultura:

Choné *et al.* (2001) estudiaron la utilización del potencial xilemático como indicador del estado hídrico del viñedo. Para ello, en un viñedo de California y en otro de Francia, realizaron mediciones durante el ciclo productivo de potencial hídrico foliar antes del amanecer y al mediodía y del potencial xilemático al mediodía. Estudiando los valores del potencial xilemático llegaron a la conclusión de que este método es una buena herramienta para controlar el estado hídrico del viñedo y manejar el riego.

Intrigliolo & Castel (2009) realizaron un estudio para ver la respuesta de de un viñedo de la variedad “Tempranillo” a distintos tratamientos de riego. Para controlar el estado hídrico realizaron medidas de del potencial xilemático a media mañana (07:00-08:00 hora solar) y al mediodía (11:30-12:30 hora solar). Concluyeron (entre otras cosas) que la determinación del tratamiento de riego era más claro utilizando el potencial xilemático a media mañana que al mediodía.

Girona *et al.* (2009) en el seguimiento del estado hídrico de este estudio, además de realizar medidas del potencial hídrico foliar (explicado en el apartado anterior), realizaron en algunas fechas mediciones del potencial xilemático al mediodía. Las medidas realizadas les permitieron calcular la siguiente relación lineal entre potencial hídrico foliar y potencial xilemático para su viñedo:

$$\Psi_{\text{hoja}} = 1.075055\Psi_{\text{xilemático}} - 0.168348$$

Acevedo-Opazo *et al.* (2010) estudiaron el efecto del estado hídrico de la planta en el crecimiento vegetativo y en la calidad de la uva. Los tratamientos de riego consistían en regar para mantener distintos valores de potencial xilemático. Controlaron el estado hídrico de la planta mediante mediciones del potencial xilemático al mediodía. Llegaron a la conclusión de que este parámetro se puede utilizar como indicador fisiológico permitiendo manejar el riego de manera precisa. Este manejo estaría basado en la demanda de agua de la cepa y no en meteorología o medidas del agua en el suelo, además, considera factores del continuo suelo-planta-atmósfera.

1.3.2.3. Dendrometría

El diámetro de los frutos y del tronco varía estacional y diariamente, esto es respuesta al contenido de agua. Los cambios diarios se pueden utilizar como indicadores de las necesidades de riego (Jones, 2004)

En condiciones normales, las plantas sufren cierta deshidratación durante el día, que es compensada con la absorción de agua por la noche, esto es debido al desfase entre la tasa de transpiración y la de absorción de agua durante el día. Estos cambios hacen que por el día se produzca una contracción en el diámetro de los tallos, y la recuperación y el posible crecimiento se produce durante la noche. Las plantas sometidas a estrés presentan, por una parte, una mayor oscilación día-noche en el diámetro de sus tallos, y además la recuperación nocturna es menor, pudiendo no producirse crecimiento en absoluto.

En campo, con el uso de dendrómetros, se pueden medir y monitorizar valores de diámetro con una precisión de centésimas de milímetro, siendo este equipo un buen sistema para la toma de decisiones de riego. Las mediciones de los dendrómetros se recopilan en archivos de datos permitiendo al investigador ver tanto las variaciones diarias como la tendencia del crecimiento (o decrecimiento) del tronco.

Experiencias en viticultura:

Intrigliolo & Castel (2007) estudiaron la utilización de la variación del diámetro del tronco (mediante la utilización de la contracción máxima diaria y la tasa de crecimiento) para la determinación del estado hídrico de un viñedo de la variedad “Tempranillo”. Establecieron distintos tratamientos de riego y compararon las mediciones realizadas con medidas de potencial xilemático. Concluyeron que la determinación del estado hídrico mediante la contracción máxima diaria y la tasa de crecimiento es muy dependiente del estado fenológico y que la dendrometría es menos sensible que las medidas de potencial. Sus resultados mostraron que el crecimiento del tronco depende de otros factores aparte del estado hídrico, por lo que se complica su uso como indicador de estrés hídrico.

1.3.2.4. Temperatura de la planta (mediante termografía de infrarrojos)

Cuando una planta carece de agua sus estomas se cierran, esto es debido principalmente a la falta de turgencia en las células oclusivas. En esta situación, la transpiración, y por lo tanto la absorción de energía por evaporación se reduce, lo que hace que la temperatura de la hoja aumente. Es decir, la temperatura aumenta al aumentar la situación de estrés. Es por esto por lo que la temperatura de la hoja se puede utilizar como indicador del estado hídrico de la planta

Es posible medir la temperatura de las hojas mediante el uso de cámaras de infrarrojo. La detección del estrés hídrico de la planta mediante termografías infrarrojas es un método rápido y práctico y no es necesario el contacto con la planta. Las termografías sacadas en campo (siendo preferibles del canopy entero que de hojas sueltas (Grant *et al.*, 2006)), acompañadas de un tratamiento informático de las mismas (eliminar partes que no forman parte del canopy como suelo y cielo, seleccionar partes del canopy...) permiten al investigador obtener la temperatura a la que se encuentra la planta (Zia *et al.*, 2009).

Experiencias en viticultura:

Van Zyl (1986) estudió la utilización de la temperatura de la planta (temperatura de canopy) como indicador del estado hídrico de un viñedo. Mediante dos diferentes dosis de riego (tratamiento húmedo y tratamiento seco) estudio como variaba la temperatura mediante el uso de un termómetro infrarrojo. Realizo también medidas del contenido de agua en el suelo (con tensiómetros), del contenido de agua en la planta (potencial hídrico foliar de antes del amanecer y a las 14:00 y conductancia estomática) y comparó y relacionó los distintos métodos. Obtuvo un máximo de 3,2°C de diferencia y concluyó que este era un método rápido y fácil de utilizar para medir la temperatura de la planta. Concluyó también que la medida de la temperatura de canopy es una herramienta viable para el manejo del riego.

Grant *et al.* (2006) ensayaron la utilización de la cámara de termografías para la detección del estrés hídrico en viñedos bajo distintos regímenes hídricos. Realizaron estudios en dos cultivares Portugueses en los que establecieron diferentes tratamientos de riegos en los que midieron la temperatura de la planta (de hojas solas y del canopy) y la conductancia estomática. Calcularon el “*Crop water stress index*” (CWSI) mediante la utilización de superficies de referencia (hojas secas cubiertas por vaselina y hojas húmedas). Sacaron la conclusión de que la utilización de las termografías para la determinación de la temperatura de la planta, era una herramienta útil que permitía distinguir los diferentes tratamientos de riego. Concluyeron también que es más adecuado utilizar la temperatura del canopy entero que de hojas simples.

Zia *et al.* (2009) estudiaron la determinación del estado hídrico del viñedo mediante termografía. Midieron la temperatura de las cepas mediante una cámara termográfica, establecieron diferentes tratamientos de riego, igualmente realizaron mediciones del potencial hídrico foliar de antes de amanecer y del agua en el suelo. Calcularon el “*Crop water stress index*” (CWSI) a partir de la siguiente fórmula: $CWSI = (T_{canopy} - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet})$. Llegaron a la conclusión de que la termografía infrarroja es un buen método para el manejo del riego, que no necesita de información adicional y que es un método rápido y que solo requiere de la cámara.

1.3.2.5. Flujo de savia

Se entiende como flujo de savia el movimiento de agua y solutos, de manera conjunta, debido a las diferencias de presión que provoca la evaporación de agua en la parte aérea de la planta. La medida del flujo de savia por el tallo dará información de la transpiración de la planta, siendo un indicador de su estado hídrico. En la medida que una planta esté sometida a mayor estrés, tendrá una menor transpiración y por tanto disminuirá la velocidad del flujo de savia.

Este método se basa en la medida de la temperatura a ambos lados de una resistencia térmica colocada en el tallo que determinará la velocidad del flujo de savia, de esta manera, se aprovecha la gran capacidad calorífica que posee la savia en comparación a las del aire y de la madera húmeda.

1.3.2.6. Apertura estomática

El estrés hídrico produce el cierre estomático como forma de evitar la pérdida de agua por parte de la planta. El grado de apertura estomática puede ser por tanto indicativo del estado hídrico de la planta. La medida estándar de conductancia estomática se realiza empleando porómetros, equipos que usados adecuadamente pueden ser una buena herramienta para su uso en campo. El porómetro mide la conductividad estomática de las hojas usando la técnica del Estado Estacionario. Esta técnica mide la presión de vapor y el flujo de vapor sobre la superficie de la hoja. La pinza del porómetro, que incorpora una cámara con un recorrido de difusión conocido, se fija a la superficie de las hojas, y a continuación se empieza a medir la presión de vapor entre dos puntos de esta trayectoria, para calcular el flujo y el gradiente con las medidas de presión de vapor y conductancia de difusión conocida.

La apertura y el cierre de los estomas son controlados por diversos factores ambientales y fisiológicos, por lo que se requiere un seguimiento continuo de la conductancia estomática para poder separar el efecto del estrés hídrico sobre la misma del efecto de otros factores.

Experiencias en viticultura:

Van Zyl (1986) en su estudio de la utilización de la temperatura de canopy como indicador del estado hídrico en viñedo, utilizó como medidas comparativas distintas medidas de potencial hídrico foliar y la conductancia estomática. Llegando a la conclusión de que este método era bueno para indicar la aparición de estrés hídrico.

Zia *et al.* (2009) utilizaron la medida de la conductancia estomática (junto con el potencial hídrico foliar de base) para estudiar la utilización de termografías para la determinación del estado hídrico del viñedo. Dando por sentado que la conductancia estomática es un buen método del estado hídrico.

1.3.2.7. Ratio de discriminación isotópica del carbono

La proporción de isótopos estables de carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) se modifica por la fotosíntesis: los enzimas que intervienen en la fotosíntesis recogen preferentemente isótopos ^{12}C . Este proceso se denomina «discriminación isotópica», ya que la planta

favorece la absorción de ^{12}C que de ^{13}C . En condiciones de estrés hídrico, la discriminación no es tan marcada y los azúcares producidos tienen más cantidad de ^{13}C que los producidos en una planta sin déficit hídrico. Por lo tanto un índice llamado $\delta^{13}\text{C}$, basado en el ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del azúcar de la uva, puede ser utilizado como parámetro integrador del estado hídrico de la planta durante la maduración de la uva. Para ello se expresa el ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en comparación con un estándar y rangos de -27 p. 1000 (no déficit hídrico) a -20 p. 1000 (estrés hídrico severo) (Van Leeuwen 2009).

Experiencias en viticultura:

Van Leeuwen 2009 realizó un estudio sobre el estado hídrico del viñedo y de su importancia para la posterior obtención de un vino de calidad. Realizó medidas en viñedos situados en tres diferentes tipos de suelo (uno con gravas, otro arenoso y el último arcilloso) de potencial xilemático y del ratio de discriminación del carbono. Llegó a la conclusión de que, como los resultados de estas medidas están disponibles después de la cosecha, este método no se puede utilizar para el manejo del riego diario. Sin embargo, puede ser utilizado para validar estrategias de riego.

Santesteban *et al.* (2010) estudiaron el interés del ratio de discriminación isotópica del carbono en el fruto como integrador del estado hídrico del viñedo en zonas semiáridas. Evaluaron el interés de la medida de este ratio cuando se mide en bayas a la finalización de las fases de desarrollo herbáceo y maduración. Llegaron a la conclusión de que el ratio de discriminación isotópica del carbono es un parámetro muy interesante de cara a explicar el comportamiento del viñedo en zonas semiáridas, y que sería interesante de considerar en futuros trabajos de modelización.

1.3.3 Comparación de los distintos métodos

1.3.3.1. Ventajas e inconvenientes de cada método (Jones 2004)

a) Humedad del suelo

Ventajas:

- Fácil de aplicar en la práctica
- Puede ser bastante preciso
- Indica cuanta agua se debe aplicar exactamente
- Hay sensores automáticos y muchos sistemas comerciales

Inconvenientes:

- El suelo heterogéneo precisa de varios sensores
- Seleccionar la posición del sensor para que sea representativo de la zona radicular es difícil

b) Cálculos del balance hídrico del suelo

Ventajas:

- Fácil de aplicar
- Indica la cantidad exacta de agua que necesita la planta

Inconvenientes:

- No utiliza directamente la humedad existente en el suelo
- Necesita las estimaciones locales de precipitaciones y evaporación de agua del suelo
- La estimación de la evapotranspiración necesita una buena estimación del coeficiente del cultivo
- El error del método es acumulativo y necesita recalibración

c) Potencial hídrico

Ventajas:

- El método no requiere de instrumentación compleja
- No son necesarios otros datos para completar el método
- Es muy sensible a niveles altos de estrés
- Puede ser utilizado en cualquier lugar y condición

Inconvenientes:

- En plantas isohídricas no es un método muy sensible
- La sensibilidad está sometida a las variaciones de temperatura así como a diferentes tratamientos
- Puede dar resultados erróneos cuando se realiza riego deficitario en el cual se realizan pequeños aportes con alta frecuencia
- Es una técnica cara, pues precisa de una labor intensiva y lenta
- No existe posibilidad de automatizar

d) Potencial xilemático

Ventajas:

- El método no requiere de instrumentación compleja
- No son necesarios otros datos para completar el método
- Las medidas son más precisas que en otros métodos
- Aporta mayor información que otros métodos
- Reduce la variabilidad
- Es muy sensible en niveles altos de estrés
- Puede ser utilizado en cualquier lugar y condición

Inconvenientes:

- En plantas isohídricas no es un método muy sensible
- La sensibilidad está sometida a las variaciones de temperatura así como a diferentes tratamientos
- Requiere gran precisión para obtener valores objetivos
- Es una técnica cara, pues precisa de una labor intensiva y lenta
- No existe posibilidad de automatizar

e) Dendrometría

Ventajas:

- Técnica que permite obtener datos casi inmediatos

- Permite una rápida actuación
- Está informatizado
- No precisa mano de obra

Inconvenientes:

- Necesita de otros complementos para complementarla
- Requiere una buena selección para colocarla en un lugar representativo
- Su precio es elevado, por lo que no es fácil disponer de muchas estaciones

f) Temperatura de la planta (mediante termografía de infrarrojo)

Ventajas:

- Método directo, se puede obtener información al instante
- Rapidez en la toma de medidas
- Agilidad en tratamiento de resultados
- Tiene en cuenta condiciones climáticas y fisiológicas de la planta
- Se puede utilizar en cualquier estado del cultivo
- Permite analizar el canopy entero

Inconvenientes:

- Muy sensible a factores climáticos como la radiación y el viento, que pueden llegar a modificar resultados
- Resultados fiables solo en regiones áridas o semiáridas
- Problema en cultivos discontinuos, como por ejemplo la viña
- Son necesarios los datos climáticos del lugar

g) Flujo de savia

Ventajas:

- Método muy sensible

Inconvenientes:

- Requiere técnicas e instrumentación experta
- La instrumentación es muy delicada y generalmente cara
- Únicamente estima los cambios en la conductancia
- El flujo es muy dependiente de las condiciones atmosféricas
- Necesita de calibración para cada planta y para definir el control del riego

h) Apertura estomática

Ventajas:

- Generalmente muy sensible

Inconvenientes.

- Mala respuesta en plantas anisohídricas
- Requiere equipo complejo y calibración

- Técnica cara, pues requiere una labor intensiva y lenta
- No automatizado
- Variaciones de hoja a hoja que hacen necesaria la realización de muchas repeticiones

i) Ratio de discriminación isotópica del carbono

Ventajas:

- Método sensible

Inconvenientes

- No se puede utilizar para manejar el riego diario

1.3.3.2. Experiencias en viticultura comparando los diferentes métodos

Van Zyl (1986) en su estudio de la utilización de la temperatura de canopy como indicador del estado hídrico en viñedo, realizó un seguimiento del estado hídrico de un viñedo (estableciendo dos tratamientos de riego distintos) mediante los siguientes métodos (que después comparó y relacionó): temperatura de canopy, humedad del suelo (mediante la utilización de tensiómetros a diferentes profundidades), potencial hídrico foliar (antes del amanecer, a las 12:00 y a las 14:00) y conductancia estomática. A partir de los resultados que obtuvo, llegó a la conclusión de que el termómetro infrarrojo era un aparato útil para medir la temperatura de la planta, y que a partir de esta, se podía manejar el riego. En su estudio, la temperatura de canopy, la conductancia estomática y el potencial hídrico foliar a las 14:00 fueron igual de sensibles para indicar el inicio del estrés hídrico, mientras que el potencial hídrico foliar antes de amanecer fue más sensible que los tres. Sin embargo, para Van Zyl, la rapidez de toma de medidas del termómetro infrarrojo le daba a ese método grandes posibilidades.

Zia *et al.* (2009) estudiaron la determinación del estado hídrico del viñedo mediante termografía. Para ello se apoyaron en medidas del potencial hídrico foliar de antes de amanecer, de la conductancia estomática y del contenido de agua en el suelo (por TDR) en diferentes tratamientos de riego. Estudiaron las relaciones entre el *crop water stress index* (CWSI, índice calculado a partir de las medidas de la temperatura de la planta) y las medidas de potencial hídrico foliar y la conductancia estomática. Encontraron relaciones lineales claras entre CWSI y el potencial hídrico foliar antes de amanecer, y relación inversa entre CWSI y la conductancia estomática. Concluyendo que la termografía era un buen método ya que es más simple de realizar que las medidas foliares ya que requiere solo de una cámara.

Van Leeuwen (2009) realizó un estudio sobre el estado hídrico del viñedo y de su importancia para la posterior obtención de un vino de calidad. Realizó medidas en viñedos situados en tres diferentes tipos de suelo (uno con gravas, otro arenoso y el último arcilloso) de potencial xilemático y del ratio de discriminación del carbono. Concluyeron que el potencial xilemático, en sus condiciones, es uno de los mejores métodos para evaluar el estado hídrico de la planta y que puede ser la herramienta más precisa para la gestión del riego. En cuanto al ratio de discriminación del carbono, llegó a la conclusión de que es una buena herramienta para la caracterización de bloques y que puede ser utilizado para validar estrategias de riego.

Santesteban *et al.* (2011) estudiaron la idoneidad del potencial hídrico foliar de antes de amanecer y del potencial xilemático como indicadores del estado hídrico de viñedos de la variedad “Tempranillo”. Para ello realizaron seguimientos del estado hídrico de viñedos situados en Olite y Traibuenas (Navarra) mediante medidas del potencial hídrico foliar antes de amanecer y del potencial xilemático a media mañana y al mediodía. Los distintos viñedos tenían diferente profundidad de suelo, diferente pendiente y diferente carga de racimos. A partir de las mediciones realizadas estudiaron relaciones entre los dos potenciales medidos y otras variables como la carga, el crecimiento vegetativo, el tipo de suelo... Sus resultados mostraron que a parte de las condiciones climáticas, la carga y el crecimiento vegetativo, otros factores podían modificar la dinámica diaria del agua en la planta y, por lo tanto, afectar a los datos de potenciales tomados a diferentes horas del día. Concluyeron que para medir la disponibilidad de agua de un viñedo, el potencial hídrico foliar antes de amanecer es probablemente más apropiado que los potenciales xilemáticos, ya que este método no es afectado por las condiciones climáticas durante las mediciones diarias. Sin embargo, para ver en qué medida está un viñedo bajo déficit hídrico, el potencial xilemático (a media mañana y al mediodía) es más adecuado ya que integra todos los factores diarios (profundidad de suelo, pendiente, carga, tamaño de canopy...) que pueden afectar al déficit hídrico.

2. OBJETIVO

El objetivo del presente Trabajo Fin de Carrera es comparar procedimientos de estimación del estado hídrico de la vid basados en la medida del potencial hídrico, de la temperatura de canopy y de la dendrometría, valorando su adecuación para ser utilizados como herramienta para la toma de decisiones de riego.

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1. Materiales

3.1.1. Material vegetal

El presente Trabajo Fin de Carrera se ha realizado en una explotación vitivinícola en el término municipal de Traibuenas, perteneciente a Bodegas Ochoa. El material vegetal empleado ha sido *Vitis vinifera* L. de la variedad “Tempranillo”. En el Anejo I se pueden ver las características específicas de esta variedad. El viñedo está conducido en espaldera a cordón doble, con una altura de tronco de unos 50 centímetros y una carga de 3 ó 4 pulgares por brazo.

3.1.2. Material instrumental

- Cámara de presión Scholander “P3000, Soilmoisture Corp. Santa Barbara, California, USA”.
- Cámara de infrarrojos “Therma CAM B2” y su software “Therma CAM software”.
- Estación meteorológica situada en El Plano, Bardenas; donde se registraban datos cada 10 minutos de: temperatura del aire, humedad relativa y precipitaciones. Se pueden ver más detalles en el Anejo II.
- Estación meteorológica de Riegos de Navarra situada en Traibuenas. Más datos en Anejo III. Con los datos de esta estación se completaron los datos meteorológicos de los días no disponibles en la estación del Plano (31 de agosto; 1, 2, 28, 29 y 30 de septiembre).
- Calibre digital.
- Bolsas aluminizadas y herméticas para mediciones del potencial xilemático.
- Cinta métrica.
- Software: Microsoft Office v. 2007 y SPSS v. 15.0.
- Dendrómetros Plantsens, instalados por Verdtech Nuevo Campo S.A., proporcionan medidas de diámetro de tronco cada 15 minutos.

3.2. Método

3.2.1. Diseño del ensayo

Con el fin de abarcar un rango de situaciones vitícolas relativamente amplio en el estudio y poder conseguir, de esta manera, resultados más generalizables, se trabajó en 3 zonas del viñedo con diferente suelo, en las que se establecieron 3 tratamientos de riego.

Las 3 zonas del viñedo elegidas se corresponden con 3 parcelas que se distinguen principalmente en el tipo de suelo:

- **Suelo con laboreo tradicional (“Laboreo”):** es un suelo en el que la calle se mantiene libre de vegetación mediante pases de cultivador para evitar la proliferación de malas hierbas y romper la capa superficial que se produce en suelos con arcilla. Figura 2.

Figura 2. Suelo laboreo.



- **Suelo con cubierta vegetal (“Cubierta”):** se trata de un suelo muy similar al del tratamiento “Laboreo” en el que se implantó una cubierta vegetal en 2003. La cubierta es segada una o dos veces al año. Durante la mayor parte del verano la cubierta se encuentra agostada. Figura 3.

Figura 3. Suelo cubierta.



- **Suelo pedregoso (“Cascajo”):** es un suelo con un alto porcentaje de piedras. La granulometría a diferentes alturas del perfil del suelo no es conocida, pero la superficie está cubierta de piedras (cantos rodados procedentes del río). Figura 4.

Figura 4. Suelo cascajo.



En cada una de estas tres parcelas se establecieron los diferentes tipos de riego:

- **No riego (R0):** Son cepas en las que se quitaron los tubos de riego, por lo que no recibieron riego. El agua que recibieron fue únicamente la de lluvia.
- **Riego normal (R1):** En estas cepas se mantuvo el tubo de riego presente en la parcela, regándose cuando el viticultor lo hacía. El agua que recibieron estas cepas fue la del riego y la de la lluvia.
- **Riego doble (R2):** En estas cepas se duplicó el tubo de riego, de esta manera recibieron el doble de agua. El agua que recibieron estas cepas fue la del riego (doble) y la de la lluvia.

De esta manera se establecieron un total de nueve variantes de tipo de suelo y riego. En cada tratamiento de riego, se eligieron 30 cepas uniformes (en lo referido a sección de tronco) y representativas de la zona del viñedo en la que se encontraban. En el Anejo IV se muestra la distribución del diseño del ensayo.

3.2.2. Controles realizados

Los controles previstos se organizaron en días completos en los que se realizaron las mediciones dos días por semana: los lunes y los jueves. De esta manera las salidas a campo se realizaron los días: 1, 5, 8, 12, 15, 19, 22, 26 y 29 de julio; 2, 5, 9, 12, 16, 19, 23, 26 y 30 de agosto y 6, 9, 13 y 16 de septiembre. Los lunes se midieron potenciales xilemáticos a las 9:00 y a las 12:00 (hora solar) y se realizaron termografías a las 7:00 y a las 10:00 (hora solar); mientras que los jueves a parte de estas mediciones se midió el potencial hídrico antes del amanecer (entre las 2:00 y las 4:00 (hora solar)). Las medidas de los días en los que hubo precipitaciones y las hojas se encontraban mojadas no se han tenido en cuenta en la realización del trabajo.

3.2.2.1. Potencial hídrico foliar antes de amanecer (Phaa)

La medida de potencial hídrico se realizó con una cámara de presión Scholander. Este método consiste en aplicar presión, sobre una hoja escindida, hasta que se

empiezan a ver unas pequeñas gotas de savia sobre el peciolo (Figuras 5 y 6). En este momento la presión en la cámara es similar a la tensión de la savia en los vasos del órgano, y su manómetro proporciona el valor del potencial hídrico, que se mide en bares o mega pascales (MPa), siendo 1 bar = 0,1 MPa, considerándose siempre como valores negativos. Las mediciones del potencial hídrico foliar se realizaron los jueves antes del amanecer (entre las 2:00 y las 4:00 hora solar), garantizando que estas siempre se realizaran antes de salir el sol.

Figura 5. Cámara de presión para medida del potencial hídrico.



Figura 6. Gota de savia sobre el peciolo.



Las medidas se realizaron en 5 hojas pertenecientes a 5 de las 30 cepas seleccionadas para cada tratamiento y cada zona.

3.2.2.2. Potencial xilemático (ψ_x^9 , ψ_x^{12})

El potencial xilemático se midió de la misma forma que el hídrico foliar, con la cámara de presión Scholander. Para medir el potencial xilemático se colocan, hora y media antes de realizar las mediciones, las hojas (aún unidas a la planta) en bolsas que mantienen la hoja a oscuras y evitan que ésta transpire y realice la fotosíntesis. De esta forma se consigue que el potencial hídrico de la hoja se iguale con el xilemático del resto de la planta.

Las bolsas utilizadas fueron bolsas *zip lock* herméticas cubiertas por un film metalizado de polietileno de alta densidad para evitar de esta manera tanto la transpiración como la fotosíntesis (el polietileno refleja la luz evitando que llegue a la hoja y el calentamiento excesivo). Se puede ver una bolsa colocada en la Figura 7.

Figura 7. Bolsa para medida del potencial xilemático.



Las medidas fueron realizadas los lunes y los jueves en dos momentos del día: en una primera tanda entre las 8:30 y las 9:30 de la mañana solar (ψ_x^9), y en una segunda tanda entre las 11:30 y las 12:30 hora solar (ψ_x^{12}). La colocación de las bolsas se realizó una hora y media antes de las dos tandas de medidas (a las 7:00 (ψ_x^9) y a las 10:00 (ψ_x^{12}) hora solar. Tanto la colocación de las bolsas como las mediciones se realizaron siempre en el mismo orden, empezando por laboreo, siguiendo por cubierta y terminando con cascajo.

Las medidas se realizaban en 5 hojas pertenecientes a 5 de las 30 cepas seleccionadas para cada tratamiento y cada zona. De las 5 hojas por tratamiento, se tomaban 3 de una cara de la fila y 2 de la otra, eligiéndose aleatoriamente de cuál de ellas (soleada o no soleada) se cogían cada número de hojas.

3.2.2.3. Temperatura de canopy (T_{Can})

La temperatura de canopy se estimó a partir de termografías obtenidas con una cámara de infrarrojos (Figura 8). Las termografías se tomaron a la misma hora que se

colocaban las bolsas para la posterior medición del potencial xilemático, es decir en dos tandas: a las 7:00 y a las 10:00 de la mañana (hora solar).

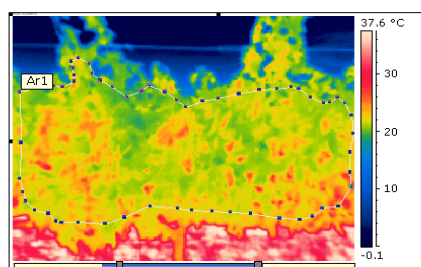
Figura 8. Toma de termografía.



Las termografías fueron tomadas los lunes y los jueves, realizándose 3 al lado soleado de la fila y 3 al lado no soleado en cada tratamiento y en cada zona. De esta manera se obtenían 6 termografías de 6 cepas diferentes para cada tratamiento, lo que hacía un total de 58 termografías por tanda.

A partir de las termografías obtenidas, mediante tratamiento informático con el complemento de Word “Therma CAM software” se estimó la temperatura de canopy (TCan⁷ y TCan¹⁰). Este software permite elegir las zonas representativas de la planta (en la termografía) calculando la temperatura media de la zona seleccionada en °C (Figura 9).

Figura 9. Tratamiento de las termografías.



Parámetro de objeto	Valor
Emisividad	0.99
Distancia al objeto	2.0 m
Temperatura reflejada	20.0 °C
Temperatura atmosférica	20.0 °C
Transmisión atmosférica	0.99
Etiqueta	Valor
Ar1: Máx.	30.1 °C
Ar1: Mín.	14.1 °C
Ar1: Media	21.8 °C

De esta forma se obtuvieron las siguientes temperaturas de canopy:

- Temperatura de canopy de las 7:00 del lado soleado ($T_{Can_{sol}^7}$).
- Temperatura de canopy de las 7:00 del lado no soleado ($T_{Can_{sombra}^7}$).
- Temperatura de canopy de las 10:00 del lado soleado ($T_{Can_{sol}^{10}}$).
- Temperatura de canopy de las 10:00 del lado no soleado ($T_{Can_{sombra}^{10}}$).

A partir de estas temperaturas, se calcularon las variables a emplear en los análisis estadísticos. Se utilizó la temperatura del aire a la hora de la realización de la termografía (T_{Aire}) como referencia, de esta forma, se tuvieron en cuenta las condiciones de cada día. Las variables se obtuvieron restando a las temperaturas obtenidas en las termografías el valor de la temperatura del aire a la hora en la que se realizó cada termografía. Obteniendo las siguientes variables:

- Diferencia de temperatura a las 7 al sol (ΔT_{sol}^7): $T_{Can_{sol}^7} - T_{Aire}^7$
- Diferencia de temperatura a las 7 a la sombra (ΔT_{sombra}^7): $T_{Can_{sombra}^7} - T_{Aire}^7$
- Diferencia de temperatura a las 10 al sol (ΔT_{sol}^{10}): $T_{Can_{sol}^{10}} - T_{Aire}^{10}$
- Diferencia de temperatura a las 10 a la sombra (ΔT_{sombra}^{10}): $T_{Can_{sombra}^{10}} - T_{Aire}^{10}$

3.2.2.4. Dendrometría

El estudio dendrométrico se realizó mediante el seguimiento de los datos proporcionados por dendrómetros Plantsens instalados por Verdtech. La información proporcionada por estos dendrómetros se recibía vía internet ya que éstos estaban comunicados a una estación transmisora que enviaba los datos registrados cada 15 minutos (Figura 10).

Figura 10. Estación transmisora de datos.



Se colocaron 12 dendrómetros en cada tipo de suelo, 4 por tratamiento de riego. A partir de los datos registrados por estos dendrómetros se estudiaron distintos parámetros (Figura 11).

Figura 11. Dendrómetro.



Se estudiaron distintas variables obtenidas por los datos registrados por los dendrómetros para observar si eran buenos detectores del estrés hídrico. Las distintas variables están basadas en el crecimiento y en la contracción diaria máxima.

- Crecimiento diario (Crecimiento): Calculado como la diferencia entre los máximos diarios alcanzados por el tronco en dos días consecutivos, indica la amplitud del desplazamiento, que es equivalente al crecimiento (si es positiva), estado estacionario (si es próxima a cero) o decrecimiento (si es negativa) del tronco.
- Crecimiento acumulado en tres días (Crecimiento 3): Es la suma del crecimiento en tres días, indica si en tres días ha habido crecimiento positivo, nulo o negativo.
- Crecimiento diario junto con contracción diaria máxima (Crec.^{/(}Crec./Contr.)): Es un parámetro que engloba al crecimiento diario y a la contracción diaria máxima conjuntamente, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$X = |\text{Crecimiento diario}| \left| \frac{\text{Crecimiento diario}}{\text{Contracción diaria máxima}} \right|$$

Para intentar reducir el error asociado a la variabilidad que puede existir en las lecturas de dendrometría como consecuencia de la posición que ocupa en la cepa (mayor o menor grosor, mayor o menor flujo xilemático), se estandarizaron las variables anteriores en función del crecimiento observado en cada cepa en un momento en el que

éste era muy elevado (24 de mayo al 3 de junio de 2010). De esta forma se calcularon los valores medios de este periodo (valores de referencia) de: crecimiento diario, crecimiento acumulado en tres días.

A partir de los valores de referencia se obtuvieron los datos relativizados como el cociente de los valores registrados entre los valores de referencia. Obteniéndose de esta forma los siguientes parámetros:

- Crecimiento diario relativizado (Crec. Rel.)
- Crecimiento acumulado en tres días relativizado (Crec.3 Rel.)

3.2.3. Variables climáticas

Las variables climáticas se obtuvieron directamente de la estación climática de El Plano (Bardenas); algunos días (31 de agosto; 1, 2, 28, 29 y 30 de septiembre) no estaban disponibles los datos de esta estación, por lo que los datos de estos días se completaron con los proporcionados por la estación climática de Riegos de Navarra en Traibuenas.

3.2.3.1. Parámetros registrados

Son aquellos datos que se obtuvieron directamente de las estaciones meteorológicas. Se descargaron directamente desde internet (<http://meteo.navarra.es/>). Son los siguientes:

- Temperatura del aire (T): La temperatura del aire se podría describir como la mayor o menor agitación de las numerosas moléculas que lo componen. Se mide mediante un sensor de temperatura y humedad, situado habitualmente a 2 metros sobre el nivel del suelo. Este sensor lleva como accesorio un protector para radiación, que protege al sensor de temperatura de la radiación directa y difusa, ya que, si ésta incidiese directamente sobre él, se registrarían medidas muy superiores a la realidad. Su diseño es tal que permite la ventilación natural. Las temperaturas utilizadas son las medias registradas desde 30 minutos antes de la hora de la medición hasta 30 minutos después; de esta forma se consigue representar la temperatura media que hubo durante la medición.
- Humedad relativa (HR): Es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Indica cuanto vapor de agua contiene el aire comparado al total que podría contener a esa temperatura sin que se produjese condensación. Se expresa en tanto por ciento (%).

3.2.4. Tratamiento de datos

3.2.4.1. Índice de capacidad de discriminación e índice de errores

Los resultados obtenidos en las tres parcelas y los tres tratamientos de riego se analizaron conjuntamente para determinar la capacidad de discriminación de cada método de estimación del estado hídrico. Para ello, se determinaron: el índice de capacidad de discriminación (ICD) y el índice de errores (IE) siguiendo los pasos enumerados a continuación:

- a) En primer lugar, se estudió la capacidad de discriminación utilizando los valores observados cada día en cada tipo de suelo. Para ello, se determinó en qué días que había diferencias significativas entre tratamientos de riego mediante la realización de un Análisis de Varianza (ANOVA, $P < 0.05$) y, cuando las diferencias eran significativas, se calcularon los subconjuntos homogéneos mediante el test de Duncan.
- b) Los resultados anteriores se transformaron en puntuaciones numéricas que permitieran estimar la capacidad de discriminación de cada método de medida de estrés. Se consideró que una variable tenía más capacidad de discriminación cuando permitía detectar diferencias entre tratamientos más frecuentemente, siempre que las diferencias entre tratamientos se correspondieran con lo esperable a la vista de la dosis de riego. Se establecieron las siguientes puntuaciones:
- 2 Puntos: si los tres tratamientos de riego se separaban en tres subconjuntos (a, b, c) ordenados coherentemente (mayor estrés en las cepas del tratamiento R0, seguido de las cepas de R1 y de las de R2).
 - 1 Punto: si los tres tratamientos se ordenaban en 2 subconjuntos (a, b) ordenados coherentemente según la aplicación de riego (a, a, b; a, ab, b; a, b, b).
 - 0 Puntos: si se distinguían dos subconjuntos (a, b) y dos tratamientos estaban ordenados coherentemente según la aplicación de riego, pero el otro tratamiento quedaba entre los dos (ab, a, b; a, b, ab).
 - -1 Punto si se establecían diferencias significativas entre tratamientos pero la agrupación de los mismos no era coherente con las aportaciones de riego.

En la Tabla 1, se resumen los criterios utilizados para determinar si la ordenación observada era coherente o no¹.

- c) A partir de estas puntuaciones, se calcularon los índices ICD, IE e ICDt.
- Índice cap. de discriminación (ICD) = $\frac{\text{suma de puntos positivos}}{\text{n}^\circ \text{ de días}}$
 - Índice de errores (IE) = $\frac{\text{suma de puntos negativos}}{\text{n}^\circ \text{ de días}}$
 - Índice de cap. de discriminación total (ICDt) = ICD + IE

¹ En el caso de las medidas de crecimiento obtenidas mediante dendrometría, se valoraron dos posibles órdenes: uno manteniendo el mismo orden durante todo el ciclo (Opción 1) y el otro variando el orden coherente a partir del cambio de tendencia de crecimiento del diámetro del tronco (alrededor del 23-7-2010) (Opción 2).

Tabla 1. Criterio utilizado para puntuar el orden de los subconjuntos.

a) Potencial hídrico y termografía

Variables	Orden coherente
Phaa	R0 < R1 < R2
ψ_x^9	R0 < R1 < R2
ψ_x^{12}	R0 < R1 < R2
ΔT_{sol}^7	R0 > R1 > R2
ΔT_{sombra}^7	R0 > R1 > R2
ΔT_{sol}^{10}	R0 > R1 > R2
ΔT_{sombra}^{10}	R0 > R1 > R2

b) Dendrometría

Variables	Opción 1	Opción 2
Crecimiento	Todo el ciclo: R0 < R1 < R2	Hasta \approx 23-jul: R0 < R1 < R2 A partir de 23-jul: R0 > R1 > R2
Crecimiento 3	Todo el ciclo: R0 < R1 < R2	Hasta \approx 23-jul: R0 < R1 < R2 A partir de 23-jul: R0 > R1 > R2
Crec. ^{^(Crec./Contr.)}	Todo el ciclo: R0 > R1 > R2	Hasta \approx 23-jul: R0 > R1 > R2 A partir de 23-jul: R0 < R1 < R2

Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; ψ_x^9 , Potencial xilemático a las 9:00 (hs); ψ_x^{12} , Potencial xilemático a las 12:00 (hs); ΔT_{sol}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 al sol; ΔT_{sombra}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 a la sombra; ΔT_{sol}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 al sol; ΔT_{sombra}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 a la sombra; Crecimiento, Crecimiento diario; Crecimiento 3, Crecimiento acumulado en tres días; Crec.^{^(Crec./Contr.)}, Crecimiento^{^(Crecimiento diario/Contracción diaria)}; R0, No riego; R1, Riego normal; R2, Riego doble.

3.2.4.2. Ratio de discriminación

Además de los índices explicados en el apartado anterior, para calcular la capacidad que cada método tiene de diferenciar entre los diferentes estados hídricos de las plantas se utilizó también el método del “Ratio de Discriminación (DR)” (Browning et al. 2004, Levy et al. 1999).

En este método, se compara, para cada método de medida del estado hídrico de la planta, la varianza dentro de los datos de 1 mismo punto (un tratamiento de riego) con la varianza del total de puntos. Para ello hay que calcular la desviación típica INTER (SD_{INTER} , media de las desviaciones típicas de las medias de las mediciones de cada tratamiento de riego cada día) y la desviación típica INTRA (SD_{INTRA} , media de las desviaciones típicas de cada medición (5 hojas en el caso de potencial, 4 sondas en el caso de los dendrómetros y 3 termografías en el caso de la temperatura de canopy) en cada tratamiento de riego y tipo de suelo). Además, es necesario corregir la SD_{INTER} , ya que en está, hay parte de SD_{INTRA} que hay que eliminar. Para ello se calcula la desviación típica subyacente (underlying) (SD_U).

$$SD_U = \sqrt{SD_{INTER}^2 - \frac{SD_{INTRA}^2}{K}}$$

El cociente entre la SD_U y la SD_{INTRA} es el ratio de discriminación (DR):

$$DR = \frac{SD_U}{SD_{INTRA}}$$

En el presente TFC se han calculado dos variantes del ratio de discriminación, según se considerara la SD_{INTER} como la desviación observada en un día ($SD_{INTER-DÍA}$) o si se considerara la desviación observada en el conjunto del ciclo ($SD_{INTER-TOTAL}$), calculada como la desviación típica de los datos tomados todos los días durante el ensayo. Por tanto, finalmente se han calculado dos modalidades de DR: $DR_{INTER-DÍA}$ y $DR_{INTER-TOTAL}$.

4. RESULTADOS

4.1. Descripción de los tratamientos de riego

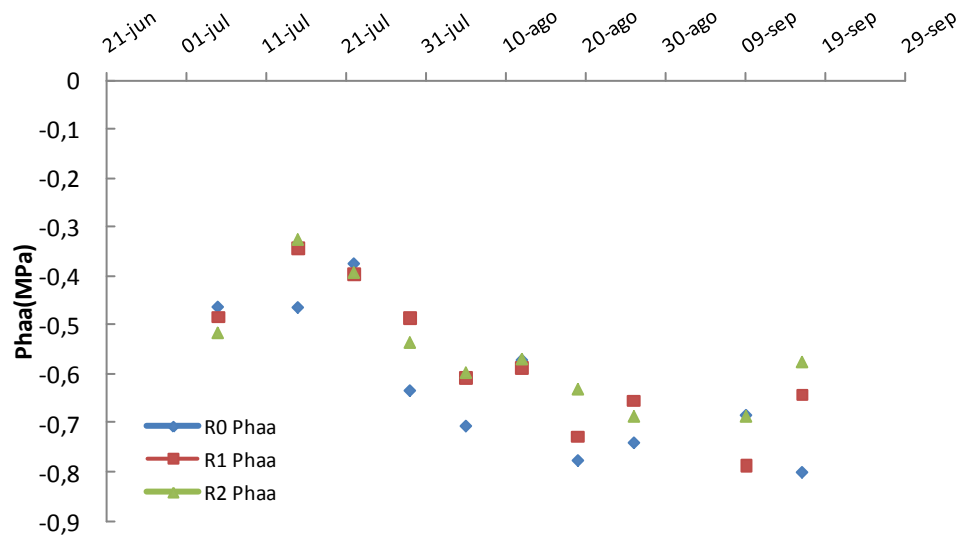
A partir de las medidas realizadas se elaboraron los siguientes gráficos con el objetivo de describir los diferentes tratamientos de riego.

4.1.1. Evolución del potencial hídrico foliar antes del amanecer

En la Figura 12 se representa la evolución del potencial hídrico foliar antes del amanecer en los tres suelos estudiados por separado.

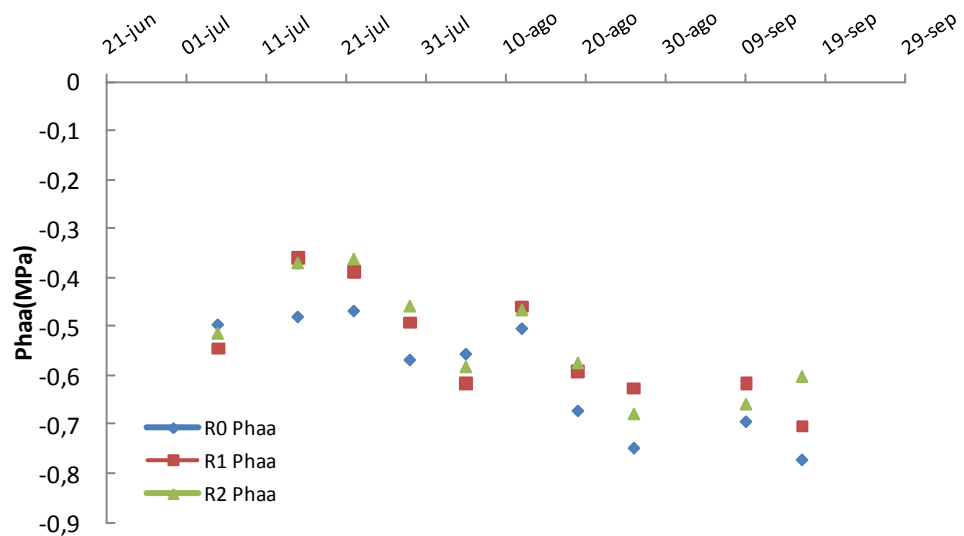
Figura 12. Evolución del Phaa a lo largo del ciclo en los distintos suelos.

a) Laboreo



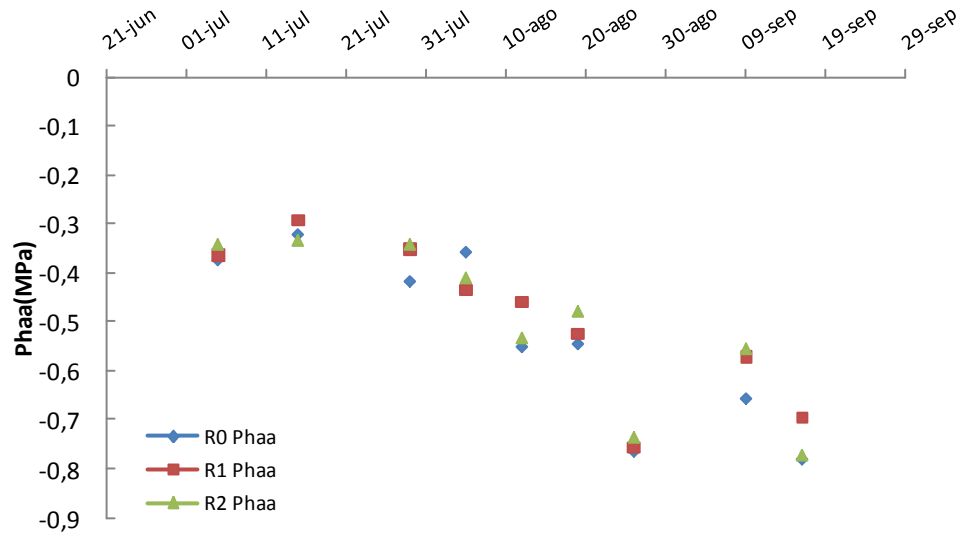
Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; R0, No riego; R1, Riego normal, R2, Riego doble.

b) Cubierta



Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; R0, No riego; R1, Riego normal, R2, Riego doble.

c) Cascajo



Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; R0, No riego; R1, Riego normal, R2, Riego doble.

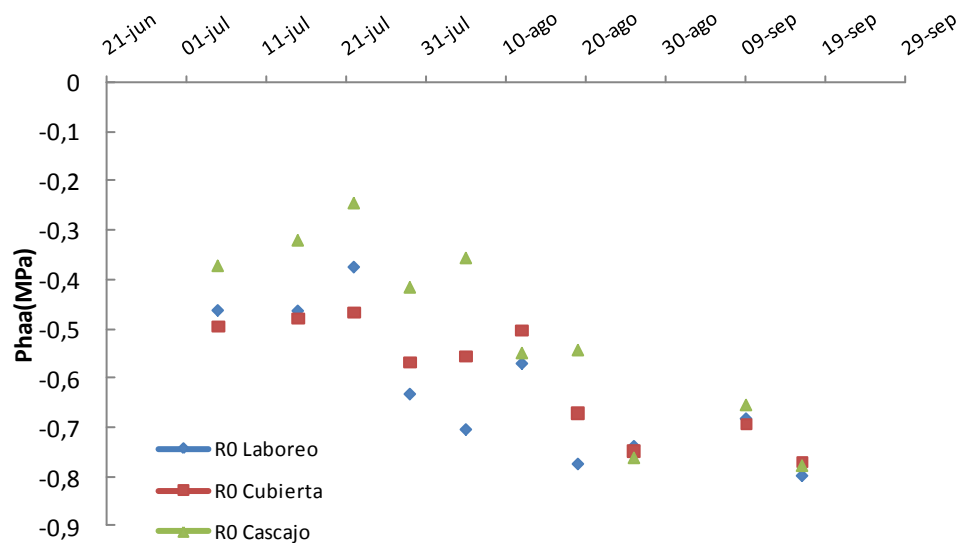
Se observan los diferentes valores obtenidos en los diferentes días de medida de Phaa. En los tres suelos se ve como hay varios días en los que los valores de Phaa tienen valores coherentes, es decir, se encuentran más estresadas (valor de Phaa más negativo) las cepas del tratamiento R0, seguidas por R1 y las menos estresadas las R2.

Los valores de Phaa varían de los -0,3 MPa (estrés medio-bajo) a los -0,8 MPa (estrés severo) en los 3 suelos. No obstante, la mayoría de los días el Phaa se encuentra entre los -0,3 MPa y los -0,6 MPa, lo que indica que este viñedo se encuentra bajo un estrés moderado (Santesteban & Royo 2006).

En la Figura 13 se representa la evolución del potencial hídrico foliar antes del amanecer en los distintos suelos según los diferentes tratamientos de riego por separado.

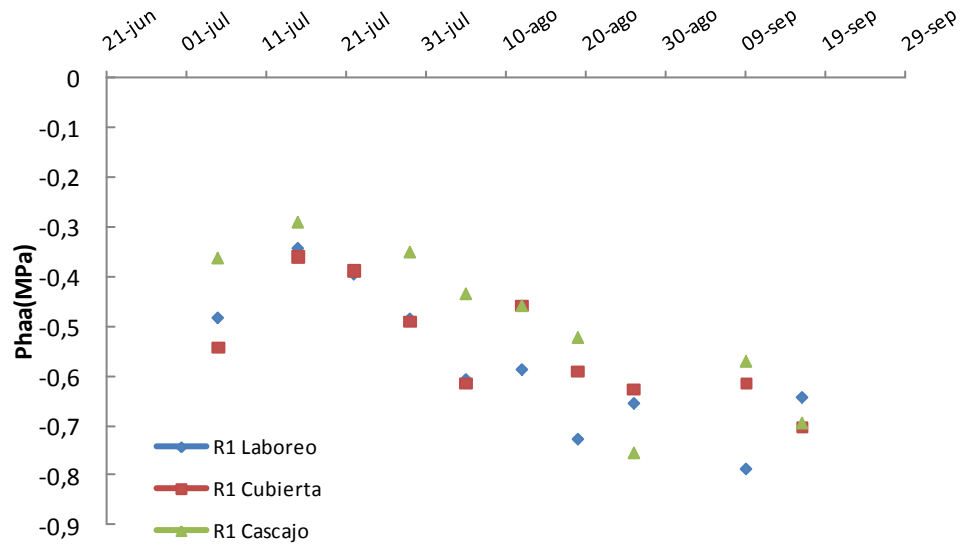
Figura 13. Evolución del Phaa según los diferentes tratamientos de riego.

a) Riego 0



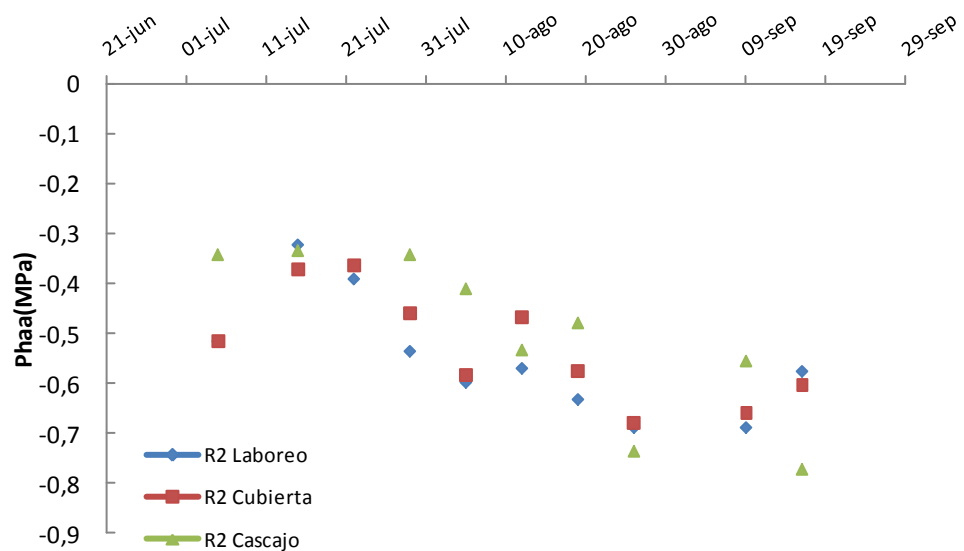
Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; R0, No riego.

b) Riego 1



Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; R1, Riego normal.

c) Riego 2



Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; R2, Riego doble.

Se aprecian diferencias entre los distintos suelos para los diferentes tratamientos de riego, se observa que los valores de Phaa en las cepas situadas en cascajo son normalmente más altos (menos negativos) que los de laboreo y cascajo, esto indica que estas cepas están menos estresadas. Hay menos diferencia entre laboreo y cascajo, no obstante realizando las medias de los valores de Phaa se obtiene un valor de $-0,58$ MPa para laboreo y $-0,55$ MPa para cubierta (en cascajo la media da $-0,47$ MPa), luego las cepas situadas en el suelo laboreo están ligeramente más estresadas.

4.2. Evaluación de la capacidad de discriminación de las medidas de potencial hídrico y Tª de canopy a distintas horas del día

4.2.1. Índice de capacidad de discriminación e índice de errores

Se han calculado el índice de capacidad de discriminación y el índice de errores de los distintos métodos de estimación del estado hídrico del viñedo empleados en el trabajo.

En la Tabla 2 se recogen los resultados del análisis de la capacidad de discriminación de los diferentes métodos de estimación del estado hídrico del viñedo estudiados. Se presentan los valores del índice para los distintos suelos y el total, calculado como la media del ICD observado en los tres suelos.

Tabla 2. Índice de la capacidad de discriminación observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en el potencial hídrico y la temperatura de canopy.

Variable	ICD			
	Laboreo	Cubierta	Cascajo	Total
Phaa	40%	30%	30%	33%
ψ_x^9	68%	42%	26%	46%
ψ_x^{12}	42%	32%	21%	32%
ΔT_{sol}^7	5%	5%	11%	7%
ΔT_{sombra}^7	5%	26%	16%	16%
ΔT_{sol}^{10}	33%	17%	17%	22%
ΔT_{sombra}^{10}	28%	33%	33%	31%

Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; ψ_x^9 , Potencial xilemático a las 9:00 (hs); ψ_x^{12} , Potencial xilemático a las 12:00 (hs); ΔT_{sol}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 al sol; ΔT_{sombra}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 a la sombra; ΔT_{sol}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 al sol; ΔT_{sombra}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 a la sombra; ICD, Índice de la capacidad de discriminación.

Se comprueba que los métodos que presentan un mayor valor de este índice son los de medida de potencial hídrico, siendo el mayor valor el del ψ_x^9 , seguido del Phaa y del ψ_x^{12} . Los valores del índice para las medidas de la diferencia de la temperatura planta-aire son menores, excepto el de ΔT_{sombra}^{10} que es similar al de ψ_x^{12} y al de Phaa. Esto significa, que según este índice, el mejor método para medir el estado hídrico del viñedo es mediante medidas de potencial hídrico, siendo la más adecuada la del ψ_x^9 .

En la Tabla 3 se recogen los resultados del análisis del índice de errores de los diferentes métodos de estimación del estado hídrico del viñedo estudiados. Se presentan los valores del índice en los distintos suelos estudiados y el total, que es la media de los tres.

Tabla 3. Índice de errores observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en el potencial hídrico y la temperatura de canopy.

Variable	IE			
	Laboreo	Cubierta	Cascajo	Total
Phaa	-10%	0%	0%	-3%
ψ_x^9	0%	-5%	0%	-2%
ψ_x^{12}	-16%	-21%	-21%	-19%
ΔT_{sol}^7	-21%	-16%	-21%	-19%
ΔT_{sombra}^7	-5%	-21%	-21%	-16%
ΔT_{sol}^{10}	-22%	-6%	-17%	-15%
ΔT_{sombra}^{10}	-22%	-33%	-17%	-24%

Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; ψ_x^9 , Potencial xilemático a las 9:00 (hs); ψ_x^{12} , Potencial xilemático a las 12:00 (hs); ΔT_{sol}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 al sol; ΔT_{sombra}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 a la sombra; ΔT_{sol}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 al sol; ΔT_{sombra}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 a la sombra; IE, Índice de errores.

Se observa que los valores más bajos del índice de errores corresponden a las medidas de ψ_x^9 y de Phaa. En los métodos de estimación del estado hídrico del viñedo basados en la temperatura de canopy y en el ψ_x^{12} en cambio, los valores son más elevados (más negativos).

Esto significa, que según este índice de errores, los métodos más adecuados para medir el estado hídrico del viñedo son el de ψ_x^9 y el de Phaa, ya que son pocos los días que se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos de riego de forma no coherente. En cambio, en los métodos basados en la termografía y en la medida del ψ_x^{12} los valores son más elevados, lo que indica que estos métodos son menos adecuados de cara a la toma de decisiones de riego, ya que hay un mayor porcentaje de días en los que se obtienen resultados menos fiables (engañosos); como por ejemplo días en los que los resultados muestran que las cepas más estresadas son las de mayor riego. En el caso del ψ_x^{12} esto puede ser debido a que la planta al tener más cantidad agua, consume más, aumentando su situación de estrés, dando estos resultados, no incorrectos, pero tampoco útiles para el manejo del riego ya que no indican la cantidad de agua disponible para la planta, sino el estado de la planta en el momento de medida.

En la Tabla 4 se recogen los resultados conjuntos de los dos índices estudiados (Capacidad de discriminación e índice de errores) y el Índice de Capacidad de Discriminación total, que es la suma de ambos.

Tabla 4. Índice de capacidad de discriminación total observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en el potencial hídrico y la temperatura de canopy.

Variable	ICD	IE	ICDt
Phaa	33%	-3%	30%
ψ_x^9	46%	-2%	44%
ψ_x^{12}	32%	-19%	12%
ΔT_{sol}^7	7%	-19%	-12%
ΔT_{sombra}^7	16%	-16%	0%
ΔT_{sol}^{10}	22%	-15%	7%
ΔT_{sombra}^{10}	31%	-24%	7%

Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; ψ_x^9 , Potencial xilemático a las 9:00 (hs); ψ_x^{12} , Potencial xilemático a las 12:00 (hs); ΔT_{sol}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 al sol; ΔT_{sombra}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 a la sombra; ΔT_{sol}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 al sol; ΔT_{sombra}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 a la sombra; ICD, Índice de capacidad de discriminación; IE, Índice de errores; ICDt, Índice de capacidad de discriminación total.

Se observa que el valor más elevado de la suma del índice de capacidad de discriminación y del índice de errores corresponde con las medidas de ψ_x^9 , seguido por el Phaa y por el ψ_x^{12} . Con valores más bajos (e incluso negativos) se encuentran los métodos basados en la diferencia de temperatura planta-aire.

Por lo que según este índice conjunto, los métodos más adecuados para estimar el estado hídrico del viñedo son los basados en medidas de potencial hídrico, especialmente la medida del ψ_x^9 , que supera incluso a Phaa (tomado en numerosos estudios como referencia).

Del conjunto de índices se desprende que de los métodos de estimación del estado hídrico de la planta estudiados, el más adecuado para el manejo del riego del viñedo es el basado en el ψ_x^9 , seguido por el Phaa, ya que para estos métodos, hay un porcentaje elevado de días en los que se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos de riego de forma coherente (los resultados indican que las cepas más estresadas se corresponden con las menos regadas). Esto coincide con otros estudios como Santesteban *et al.* (2010) que concluyeron que el Phaa es un método adecuado para medir la disponibilidad de agua de un viñedo; Intrigliolo & Castel (2006, 2009) demostraron que el potencial xilemático a media mañana era capaz de distinguir diferentes tratamientos de riego y que éste estaba relacionado con el Phaa.

En cuanto al ψ_x^{12} , como se ha explicado anteriormente, conforme avanza el día, aumenta la temperatura, aumentando el consumo de agua, por lo que el valor del ψ_x aumenta. Por esta razón, puede dar resultados engañosos, ya que al tener más agua la cepa, ésta puede consumir más agua estresándose más (dando valores más elevados de ψ_x). Estos valores por tanto, proporcionan resultados sobre el estado hídrico de la planta en el momento de la medición y no de la cantidad de agua disponible para la planta. Acevedo-Opazo *et al.* (2010) concluyeron que el manejo del riego basado en el potencial xilemático al mediodía considera factores del continuo suelo-planta-atmósfera. Igualmente Santesteban *et al.* (2010) concluyeron que el ψ_x se ve afectado

por todos los factores diarios y es un buen indicador de en qué medida está un viñedo bajo déficit hídrico. Por estas razones pese a dar resultados correctos del estado hídrico de la planta, el ψ_x^{12} no es (al menos en este caso, en el nivel de estrés hídrico de este viñedo) un método adecuado para el manejo del riego.

Las variables basadas en la diferencia de temperatura planta-aire no parecen tener mucha relación con el estado hídrico de la planta, habiendo numerosos días en los que se encuentran diferencias significativas entre los distintos tratamientos de riego, pero de manera no coherente. No obstante en este trabajo no se han empleado superficies de referencia que permitan establecer relaciones entre ΔT (diferencia t^a planta-aire) y el estado hídrico de la planta. En otros trabajos, como Grant *et al.* (2006) y Zia *et al.* (2009) se utilizaron superficies de referencia (hojas humedecidas y hojas secas cubiertas por vaselina) para calcular el “*Crop water stress index*” (CWSI) a partir de la siguiente fórmula $CWSI = (T_{canopy} - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet})$; obteniendo resultados que indicaban la termografía infrarroja como un buen método para estimar el estado hídrico de la planta y manejar el riego.

4.2.2. Ratio de discriminación

En la Tabla 5 se muestran los resultados del análisis de capacidad de discriminación de cada método mediante el método estadístico “Ratio de Discriminación”.

Tabla 5. Ratio de discriminación observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en el potencial hídrico y la temperatura de canopy.

Variable	SD _{INTRA}	SD _{INTER-DÍA}	SD _{INTER-DÍA U}	SD _{INTER-TOTAL}	SD _{INTER-TOTAL U}	DR _{INTER-DÍA}	DR _{INTER-TOTAL}
Phaa	0,070	0,082	0,075	0,152	0,148	1,068	2,105
ψ_x^9	0,102	0,126	0,117	0,215	0,210	1,154	2,065
ψ_x^{12}	0,097	0,119	0,111	0,204	0,199	1,136	2,042
ΔT_{sol}^7	0,495	1,157	1,122	2,214	2,195	2,266	4,434
ΔT_{sombra}^7	0,312	0,724	0,701	1,174	1,161	2,249	3,721
ΔT_{sol}^{10}	0,523	1,133	1,092	1,761	1,735	2,088	3,315
ΔT_{sombra}^{10}	0,442	0,923	0,887	1,348	1,323	2,005	2,991

Phaa, Potencial hídrico foliar antes del amanecer; ψ_x^9 , Potencial xilemático a las 9:00 (hs); ψ_x^{12} , Potencial xilemático a las 12:00 (hs); ΔT_{sol}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 al sol; ΔT_{sombra}^7 , Diferencia de temperatura a las 7 a la sombra; ΔT_{sol}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 al sol; ΔT_{sombra}^{10} , Diferencia de temperatura a las 10 a la sombra; SD_{INTRA}, Desviación típica intra; SD_{INTER-DÍA}, Desviación típica inter-día; SD_{INTER-DÍA U}, Desviación típica inter-día underlying; SD_{INTER-TOTAL}, Desviación típica inter-total; SD_{INTER-TOTAL U}, Desviación típica inter-total underlying; DR_{INTER-DÍA}, Discrimination ratio día; DR_{INTER-TOTAL}, Discrimination ratio total.

Se observa que los valores más elevados para ambos DR corresponden a los métodos de medición basados en la temperatura de canopy obtenida por termografía. Esto significa que según este ratio estadístico, la termografía sería mejor método para la estimación del estado hídrico del viñedo que las medidas basadas en el potencial hídrico foliar. Sin embargo, como se ha visto en el punto 4.2.1; estos métodos no son los más adecuados ya que hay numerosos días en los que se encuentran diferencias significativas entre tratamientos pero de forma no coherente.

En los métodos basados en el potencial hídrico foliar existen diferencias en los dos DR: según el DR_{INTER} el ψ_x^9 sería el método más adecuado para estimar el estado hídrico del viñedo, seguido por el ψ_x^{12} y por último el Phaa. Mientras que por otro lado el $DR_{INTER-TOTAL}$ indica que el método más adecuado es el Phaa seguido por el ψ_x^9 y por último el ψ_x^{12} .

4.2.3. Valoración global

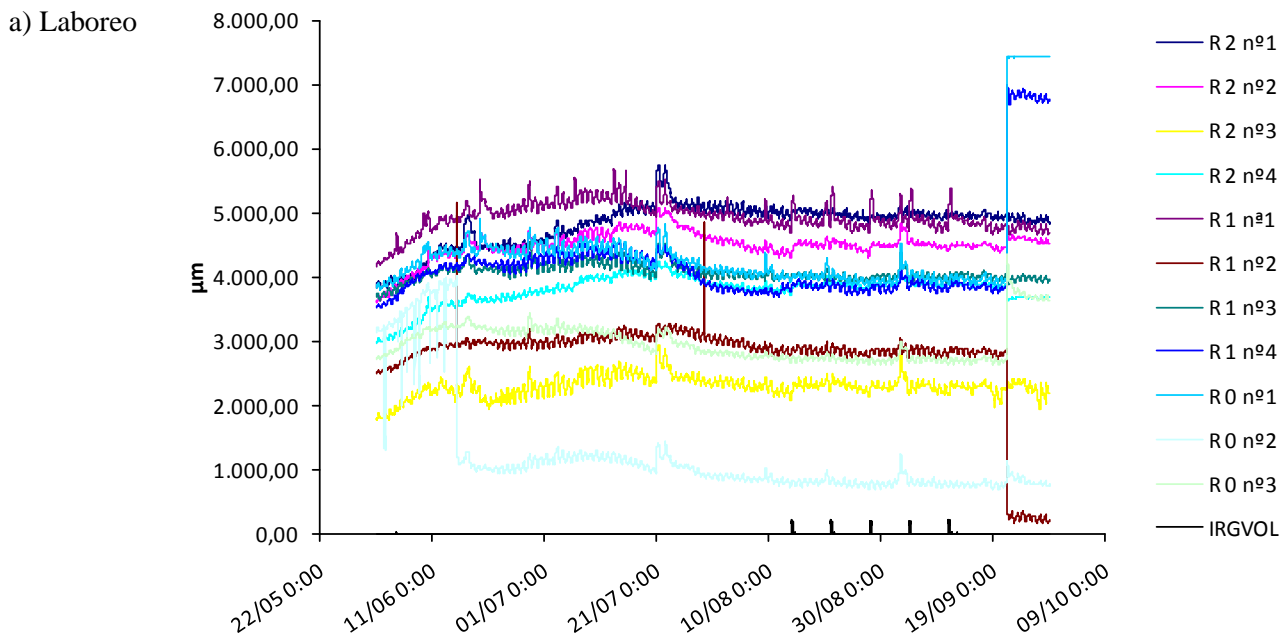
Los distintos índices y ratios calculados dan resultados diferentes, las matemáticas (DR) indican que los mejores métodos son los basados en termografía, sin embargo como se ha visto anteriormente en los índices (ICD, IE e ICDt) estos métodos no son adecuados. En cuanto a los métodos basados en el potencial hídrico, en ambos se puede decir que los mejores métodos son los basados en el ψ_x^9 y en el Phaa.

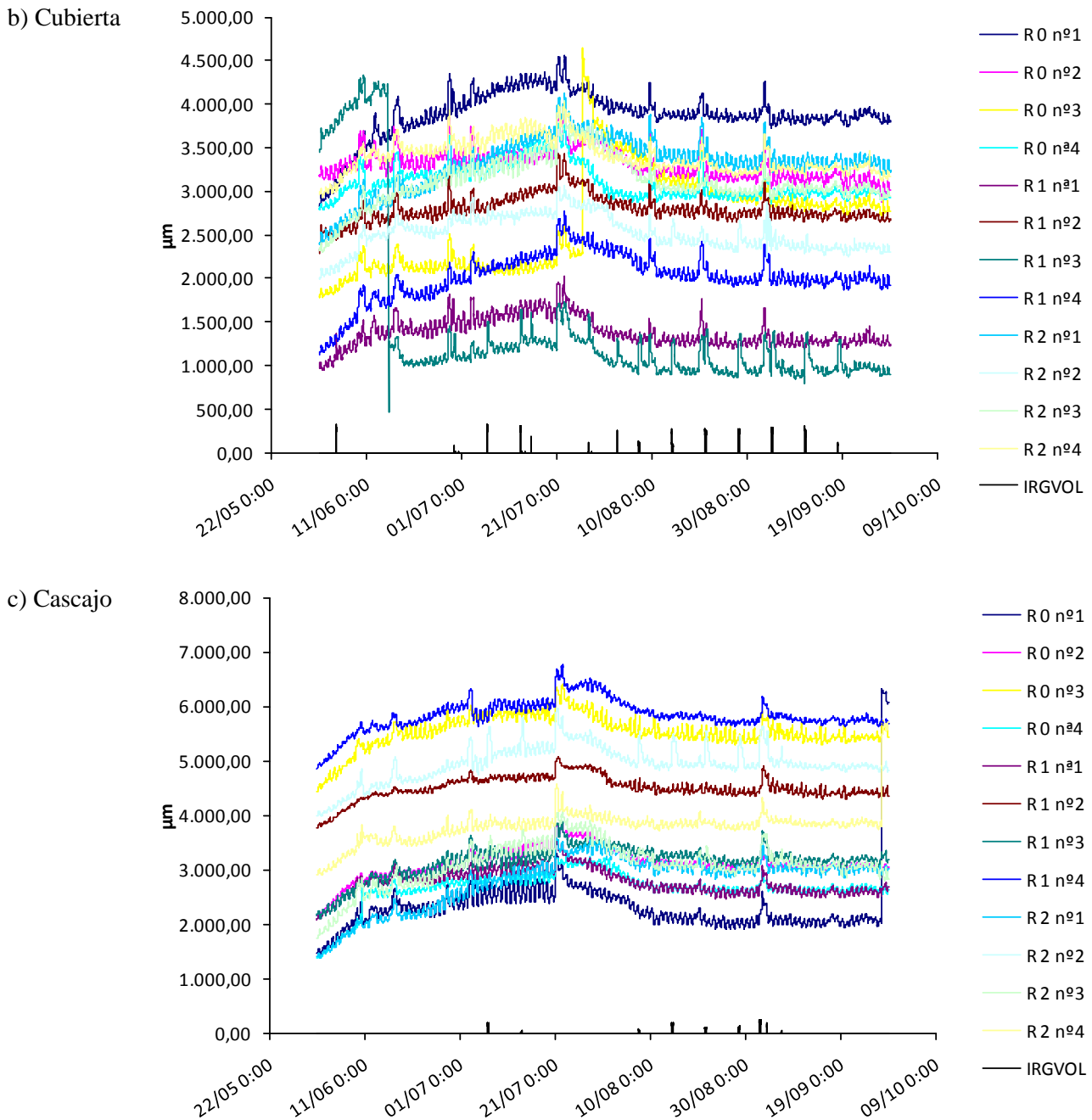
4.3. Evaluación del interés de la dendrometría para la estimación del estado hídrico del viñedo

4.3.1. Evolución del crecimiento del tronco

En la Figura 14 se representa la evolución de las medidas proporcionadas por los dendrómetros durante el ciclo productivo en los distintos suelos. En cada tipo de suelo se representan los 4 dendrómetros de cada tratamiento.

Figura 14. Evolución de los diámetros de los troncos durante el ciclo productivo. Para cada tratamiento de riego se indica la repetición como n°1, n°2, n°3 y n°4 y la gestión de riego como IRGVOL.





En los tres suelos se observa un desarrollo similar, observándose el crecimiento y decrecimiento diarios y la tendencia en las distintas épocas. En las tres figuras se ve que, en torno al 23 de junio, se produce una desviación de la tendencia; pasando de un crecimiento positivo a un decrecimiento del diámetro del tronco. Este cambio de tendencia es probablemente debido a la movilización de reservas para la maduración de la uva. Es por este cambio de tendencia por el que se estudian los índices según dos opciones, ya que, en la opción 2, las puntuaciones según el orden de subconjuntos varían a partir de este cambio de tendencia. Igualmente se observa el aumento de diámetro de las cepas provocado por cada riego, que aún estando en tendencia negativa produce un crecimiento positivo ese día.

4.3.2. Índice de capacidad de discriminación e índice de errores

Al igual que en los métodos basados en la medida del potencial hídrico foliar y en los basados en la temperatura de canopy, se han calculado estos índices para las distintas variables dendrométricas estudiadas. Conforme a lo explicado en material y método, estos índices se calcularon según dos opciones.

En la Tabla 6 se recogen los resultados del análisis de la capacidad de discriminación de las distintas variables dendrométricas estudiadas. Se presentan los valores del índice para los distintos suelos y el total, que es la media de los tres. Se muestran tanto los valores de la Opción 1 como los de la Opción 2.

Tabla 6. Índice de la capacidad de discriminación observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en la dendrometría.

a) Opción 1

Variable	ICD			
	Laboreo	Cubierta	Cascajo	Total
Crecimiento	2%	2%	2%	2%
Crec. Rela.	3%	0%	6%	3%
Crecimiento 3	13%	5%	9%	9%
Crec. 3 Rela.	13%	2%	10%	8%
Crec. [^] (Crec./Contr.)	6%	5%	0%	3%

Crecimiento, Crecimiento diario; Crec.Rela, Crecimiento diario relativizado; Crecimiento 3, Crecimiento acumulado en tres días; Crec.3.Rela., Crecimiento acumulado en tres días relativizado; Crec.[^](Crec./Contr.), Crecimiento[^](Crecimiento diario/Contracción diaria); ICD, Índice de capacidad de discriminación.

b) Opción 2

Variable	ICD			
	Laboreo	Cubierta	Cascajo	Total
Crecimiento	7%	6%	3%	5%
Crec. Rela.	8%	4%	8%	7%
Crecimiento 3	13%	5%	5%	7%
Crec. 3 Rela.	14%	3%	11%	9%
Crec. [^] (Crec./Contr.)	2%	3%	2%	3%

Crecimiento, Crecimiento diario; Crec.Rela, Crecimiento diario relativizado; Crecimiento 3, Crecimiento acumulado en tres días; Crec.3.Rela., Crecimiento acumulado en tres días relativizado; Crec.[^](Crec./Contr.), Crecimiento[^](Crecimiento diario/Contracción diaria); ICD, Índice de capacidad de discriminación.

Se observa que para todos los parámetros (en ambas opciones de puntuación), el valor de la capacidad de discriminación es bajo, sin embargo, se aprecia que cuando se tenía en cuenta la diferente dinámica de crecimiento antes y después de la parada (Opción 2), se obtenían mejores resultados (excepto en el crecimiento acumulado en 3 días).

La variable que presenta mayores valores de este índice es el crecimiento en tres días, mejorando el relativizado al tener en cuenta la dinámica de crecimiento el índice, pero empeorando el no relativizado al tenerla en cuenta.

Las variables basadas en la contracción dieron resultados muy malos, no llegando a puntuación positiva, por lo que no se incluyen, la variable basada en el crecimiento y la contracción da, igualmente, valores muy bajos.

Según este índice, la variable más representativa del estado hídrico del viñedo sería el crecimiento en tres días, no relativizado puntuado según la opción 1 (no teniendo en cuenta la parada de crecimiento), o relativizado y puntuado teniendo en cuenta la variación de la tendencia de crecimiento.

En la Tabla 7 se muestran los resultados del análisis del índice de errores para los distintos parámetros dendrométricos estudiados. Se presentan los valores del índice para los distintos suelos y el total, que es la media de los tres. Se muestran los valores de las dos opciones de puntuación.

Tabla 7. Índice de errores observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en la dendrometría.

a) Opción 1

Variable	IE			
	Laboreo	Cubierta	Cascajo	Total
Crecimiento	-8%	-6%	-1%	-5%
Crec. Rela.	-10%	-6%	-7%	-7%
Crecimiento 3	-8%	-5%	-1%	-5%
Crec. 3 Rela.	-8%	-1%	-7%	-5%
Crec. ³ (Crec./Contr.)	-2%	-2%	-2%	-2%

Crecimiento, Crecimiento diario; Crec.Rela, Crecimiento diario relativizado; Crecimiento 3, Crecimiento acumulado en tres días; Crec.3.Rela., Crecimiento acumulado en tres días relativizado; Crec.³(Crec./Contr.), Crecimiento³(Crecimiento diario/Contracción diaria); IE, Índice de errores.

b) Opción 2

Variable	IE			
	Laboreo	Cubierta	Cascajo	Total
Crecimiento	-3%	-2%	-1%	-2%
Crec. Rela.	-4%	-2%	-4%	-4%
Crecimiento 3	-5%	-3%	-6%	-5%
Crec. 3 Rela.	-3%	0%	-6%	-3%
Crec. ³ (Crec./Contr.)	-5%	-2%	0%	-2%

Crecimiento, Crecimiento diario; Crec.Rela, Crecimiento diario relativizado; Crecimiento 3, Crecimiento acumulado en tres días; Crec.3.Rela., Crecimiento acumulado en tres días relativizado; Crec.³(Crec./Contr.), Crecimiento³(Crecimiento diario/Contracción diaria); IE, Índice de errores.

Al igual que en el índice de capacidad de discriminación, se observa que el índice de errores tiende a mejorar (a ser menos negativo) al tener en cuenta la parada de crecimiento. No obstante, el índice de errores es elevado (en comparación con el índice de capacidad de discriminación).

En la Tabla 8 se recogen los resultados conjuntos de los dos índices estudiados (Capacidad de discriminación e índice de errores) y el Índice de capacidad de discriminación total.

Tabla 8. Índice de capacidad de discriminación total observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en la dendrometría.

a) Opción 1	Variable	ICD	IE	ICDt
	Crecimiento	2%	-5%	-3%
	Crec. Rela.	3%	-7%	-4%
	Crecimiento 3	9%	-5%	4%
	Crec. 3 Rela.	8%	-5%	3%
	<u>Crec.^(Crec./Contr.)</u>	<u>3%</u>	<u>-2%</u>	<u>1%</u>
	Crecimiento, Crecimiento diario; Crec.Rela, Crecimiento diario relativizado; Crecimiento 3, Crecimiento acumulado en tres días; Crec.3.Rela., Crecimiento acumulado en tres días relativizado; Crec.^(Crec./Contr.), Crecimiento^(Crecimiento diario/Contracción diaria); ÍCD, Índice de capacidad de discriminación; IE, Índice de errores; ICDt, Índice de capacidad de discriminación total.			
b) Opción 2	Variable	ICD	IE	ICDt
	Crecimiento	5%	-2%	3%
	Crec. Rela.	7%	-4%	3%
	Crecimiento 3	7%	-5%	3%
	Crec. 3 Rela.	9%	-3%	6%
	<u>Crec.^(Crec./Contr.)</u>	<u>3%</u>	<u>-2%</u>	<u>0%</u>
	Crecimiento, Crecimiento diario; Crec.Rela, Crecimiento diario relativizado; Crecimiento 3, Crecimiento acumulado en tres días; Crec.3.Rela., Crecimiento acumulado en tres días relativizado; Crec.^(Crec./Contr.), Crecimiento^(Crecimiento diario/Contracción diaria); ÍCD, Índice de capacidad de discriminación; IE, Índice de errores; ICDt, Índice de capacidad de discriminación total.			

Se observa que la suma de los índices da valores más positivos en las variables puntuadas teniendo en cuenta la tendencia de crecimiento, aún así, esta suma de los índices es muy baja y menor que en los casos estudiados anteriormente (potencial hídrico foliar).

Parece necesario un estudio más exhaustivo de los métodos dendrométricos, ya que al menos, en este trabajo, y para las variables estudiadas en él, los resultados no muestran que la dendrometría sea un método que indique el estado hídrico del viñedo de forma lo suficientemente exacta como para poder sustituir a otros métodos. Estos resultados coinciden con los realizados por Intrigliolo & Castel (2007) que concluyeron que el crecimiento del tronco depende de otros factores aparte del estado hídrico, por lo que se complica su uso como indicador de estrés hídrico.

4.3.3. Ratio de discriminación

En la Tabla 9 se muestran los resultados del análisis de capacidad de discriminación de cada variable dendrométrica utilizando el método estadístico “Ratio de Discriminación”.

Tabla 9. Ratio de discriminación observado para las variables de estimación del estrés hídrico analizadas basadas en la dendrometría.

Variable	SD_{INTRA}	$SD_{INTER-DÍA}$	$SD_{INTER-U}$	$SD_{INTER-TOTAL}$	$SD_{INTER-TOTAL-U}$	$DR_{INTER-DÍA}$	$DR_{INTER-TOTAL}$
Contracción	61,15	52,68	42,89	114,09	109,92	0,70	1,80
Contr.Rela.	0,61	0,54	0,44	1,10	1,06	0,72	1,72
Crecimiento	54,75	50,17	42,04	121,28	118,15	0,77	2,16
Crec.Rela.	0,99	0,98	0,85	2,16	2,10	0,86	2,13
Crecimiento 3	94,25	89,95	76,62	181,97	175,76	0,81	1,87
Crec.3.Rela.	0,57	0,59	0,52	1,10	1,06	0,91	1,85
Crec.^(Crec./Contr.)	1,312E+44	1,968E+44	1,856E+44	1,857E+45	1,856E+45	1,414	14,142

Contracción, Contracción diaria máxima; Contr.Rela., Contracción diaria máxima relativizada; Crecimiento, Crecimiento diario; Crec.Rela, Crecimiento diario relativizado; Crecimiento 3, Crecimiento acumulado en tres días; Crec.3.Rela., Crecimiento acumulado en tres días relativizado; Crec.^(Crec./Contr.), Crecimiento^(Crecimiento diario/Contracción diaria); SD_{INTRA} , Desviación típica intra; $SD_{INTER-DÍA}$, Desviación típica inter-día; $SD_{INTER-DÍA-U}$, Desviación típica inter-día underlying; $SD_{INTER-TOTAL}$, Desviación típica inter-total; $SD_{INTER-TOTAL-U}$, Desviación típica inter-total underlying; $DR_{INTER-DÍA}$, Discrimination ratio día; $DR_{INTER-TOTAL}$, Discrimination ratio total.

Los resultados muestran que según el $DR_{INTER-DÍA}$, las mejores variables dendrométricas para estimar el estado hídrico del viñedo serían las basadas en el crecimiento y la contracción conjuntamente; seguidas del el crecimiento acumulado en tres días (mejor el relativizado), el crecimiento diario (mejor el relativizado) y por último las basadas en la contracción diaria máxima.

En cuanto al $DR_{INTER-TOTAL}$, se observa un orden similar, siendo más adecuado el uso de la variable basada en el crecimiento y la contracción conjuntamente, seguido por el crecimiento diario y por el crecimiento acumulado en tres días y por último la contracción.

4.3.4. Valoración global

En el caso de la dendrometría, en el presente TFC, tanto los índices calculados (ICD, IE e ICDt) como los DR han presentado valores bajos en comparación con los otros métodos de estimación del estado hídrico de la planta estudiados. El único valor elevado ha sido el del $DR_{INTER-TOTAL}$ de Crec.^(Crec./Contr.), sin embargo, como se ha visto en los índices, esta variable dendrométrica, no permite distinguir correctamente entre los diferentes tratamientos de riego.

4.4. Discusión general

Con todos los resultados expuestos, se puede decir que los métodos más adecuados para estimar el estado hídrico del viñedo y manejar el riego son el ψ_x^9 y el Phaa ya que son las variables que más altos han dado los índices (ICD, IE e ICDt) y los ratios ($DR_{INTER-DÍA}$ y $DR_{INTER-TOTAL}$).

En cuanto a la termografía se ha visto que, aunque los ratios eran mayores, los índices eran más bajos por lo que no se puede considerar como un método correcto para la estimación del estado hídrico del viñedo, pudiéndose mejorar este método mediante la utilización de superficies de referencia como las utilizadas por Grant *et al.* (2006) y Zia *et al.* (2009).

Los resultados obtenidos por dendrometría, han presentado valores muy bajos tanto para los índices como para los ratios, por lo que no parecen útiles para la estimación del estado hídrico del viñedo. Sería necesario el estudio de otras variables dendrométricas que pudiesen estar relacionadas con el estado hídrico. Los resultados de este trabajo concuerdan con los de Intrigliolo & Castel (2007) que concluyeron que la dendrometría es menos sensible que las medidas de potencial y que depende mucho del estado fenológico y de otros factores a parte del estado hídrico.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente Trabajo Fin de Carrera han permitido extraer las siguientes conclusiones:

- La medida del potencial hídrico foliar antes del amanecer y el potencial xilemático a las 9:00 h han sido los únicos métodos que han permitido, en las condiciones de estudio, valorar el estado hídrico de la vid con suficiente adecuación como para ser considerados como herramientas de toma de decisiones de riego.
- En relación con el resto de métodos evaluados en el presente Trabajo Fin de Carrera, puede concluirse:
 - El potencial xilemático a mediodía puede, al menos en variedades con un comportamiento hídrico similar al de Tempranillo, ser más bajo en plantas con una dotación de agua abundante cuyas hojas estén activas, que en plantas sometidas a un estrés moderado-alto cuyas hojas no estén activas a mediodía.
 - Las variables calculadas a partir de información proporcionada por la cámara termográfica no constituyen, por sí solas, una herramienta válida para el manejo del riego. En este sentido, debería estudiarse cómo la utilización de superficies de referencia podría mejorar la utilidad de esta tecnología de cara a la toma de decisiones de riego.
 - Los índices calculados a partir de las lecturas proporcionadas por los dendrómetros no han permitido cuantificar adecuadamente el estado hídrico del viñedo. Para un más adecuado uso de esta tecnología de cara a la toma de decisiones de riego, habría que profundizar en la interpretación de las tendencias de crecimiento y decrecimiento de la planta.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo-Opazo C., Ortega-Farias S., Fuentes S. (2010) Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 97, págs 956-964.
- Asenjo J.L., Yuste J. (2003) Estimación del estado hídrico del suelo por tensiometría y volumetría y su relación con el estado hídrico del viñedo. *Estudios de la zona no saturada del suelo* Vol.6. Álvarez-Benedí y P. Marinero.
- Baeza, P., Sanchez-De-Miguel, P., Centeno, A., Junquera, P., Linares, R. and Lissarrague, J.R. (2007) Water relations between leaf water potential, photosynthesis and agronomic vine response as a tool for establishing thresholds in irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae* 114, págs 151–158.
- Browning, L.M., Krebs, J.D. and Jebb, S.A. (2004) Discrimination ratio analysis of inflammatory markers: implications for the study of inflammation in chronic disease. *Metabolism-Clinical and Experimental* 53, págs 899–903.
- Carbonneau, A., (1998) Aspects qualitatifs, 258–276. In: Tiercelin, J.R. (Ed.), *Traite d'irrigation*. Tec&Doc. Lavoisier Ed., Paris, p. 1011.
- Centeno A., Baeza P., Lissarrague J.R. (2010) Relationship between Soil and Plant Water Status in Wine Grapes under Various Water Deficit Regimes. *Horttechnology* 20,3, págs. 585-593.
- Chone X., Van Leeuwen C., Dubourdiou D., Gaudillere J. P. (2001) Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* 87, págs 477-483.
- Deloire A., Silva P., Martin-pierrat S. (2003) Terroirs et état hydrique du Grenache noir. Premiers résultats. *Le Progrès Agricole et Viticole*, 17, págs 367 – 373.
- Esteban, M.A., Villanueva, M.J., Lissarrague, J.R. (1999) Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugars, organic acids and mineral elements. *Am. J. Enol. Viticult.* 50, págs 418–439.
- García-Escudero E, Zaballa, O. (1997) Ensayos de riego localizado de viñedos productivos de cv 'Tempranillo'. *Viticultura y enología profesional* 50, págs. 35-47.
- Girona J., Mata M., Del Campo J. (2006) The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation science* 24, págs 115-127.
- Girona J., Marsel J., Mata M., Del Campo J., Basile B. (2009) Phenological sensitivity of berry growth and composition of Tempranillo grapevines (*Vitis vinifera* L.) to water stress. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15, págs 268-277.

- Grant O., Tronina L., Jones H., Chaves M.M. (2006) Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevines under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany* October 10. 11 Págs. 815-825.
- Intrigliolo D.S., Castel J.R. (2007) Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. *Irrigation Science* 26, págs 49-59.
- Intrigliolo D.S., Castel J.R. (2009) Response of grapevine cv. ‘Tempranillo’ to timing and amount of irrigation: water relations, vine growth, yield and berry and wine composition. *Irrigation Science Journal Online*.
- Jones H. (2004) Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* Vol 55, Nº 407, págs 2427–2436.
- Kramer P.J., (1983) *Water relations of plants*. Academic Press, New York. NY. USA. 489 págs.
- Levy, J., Morris, R., Hammersley, M. and Turner, R. (1999) Discrimination, adjusted correlation, and equivalence of imprecise tests: application to glucose tolerance. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism* 276, págs. E365–E375.
- Lovisololo C., Schubert A. (1998) Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. *J. Exp. Bot.* 49, págs 693-700.
- Pellegrino A., Gozé E., Lebon E., Wery J. (2006) A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy* 25, págs 49-59.
- Reynier, A. (1989) *Manual de viticultura*. Ed. Mundi-Prensa.
- Reynolds A.G., Molek T., De Savigny C. (2005) Timing of Shoot Thinning in *Vitis vinifera*: Impacts on Yield and Fruit Composition Variables. *American Journal of Enology and Viticulture* 56,4, págs 343-356.
- Ribéreau-Gayon, J.; Peynaud, E. (1982) *Tratado de ampelología. Ciencias y técnicas de la viña*. Tomo I: Biología de la viña. Ed. Hemisferio Sur.
- Salón, J.L., Chirivella, C., Castell, J.R., (2005) Response of cv. Bobal to timing of deficit irrigation in Requena, Spain: water relations, yield, and wine quality. *Am. J. Enol. Viticult.* 56, págs 1–8.
- Santesteban L.G., Royo J.B. (2006) Water status, leaf area and fruit load influence on berry weight and sugar accumulation of cv. ‘Tempranillo’ under semiarid conditions. *Scientia Horticulturae* 109, págs 60-65.
- Santesteban L.G. (2008-2009) *Apuntes Viticultura Universidad Pública de Navarra*.

-
- Santesteban L.G., Miranda C., Royo J.B. (2009) Effect of water deficit and rewatering on leaf gas Exchange and transpiration decline of excised leaves of four grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae* 121, págs 434-439.
- Santesteban L.G., Miranda C, Royo J.B. (2010) X Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las plantas. Sesión 4.3. págs. 125-128.
- Santesteban L.G., Miranda C, Royo J.B. (2011) Suitability of pre-dawn and stem water potential as indicators of vineyard water status in cv. Tempranillo. Australian Society of Viticulture and Oenology Inc. doi: 10.1111/j.1755-0238.2010.00116.x.
- Silviotti P., Bonetto C., Paladin M., Peterlunger E. (2005) Effect of Soil Moisture Availability on Merlot: From Leaf Water Potential to Grape Composition. *American Journal of Enology and Viticulture* 56,1, págs 9-18.
- Stevens R., Harvey G., Aspinal D. (1995) Grapevine growth of shoots and fruit lineary correlate with water stress indices based on root-weighted soil matric potential. *Australian Journal of Grape and Wine research* I, págs 58-66.
- Van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Jaeck, M.E., Rabusseau, S., Gaudillere, J.-P. (2003) Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bulletin de l'O.I.V.*, págs. 369- 379.
- Van Leeuwen C., Tregoaat O., Choné X., Bois B., Pernet D., Gaudillère J.P. (2009) Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *Journal International des sciences de la vigne et du vin.* 43, 3, págs. 121-134.
- Van Zyl J.L. (1986) Canopy Temperature as a Water Stress Indicator in Vines. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* Vol. 7 n° 2.
- Williams L., Trout T. (2005) Relationships among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines. *American journal Enol. Vitic.* Vol. 58, n°2.
- Zia S., Spohrer K., Merkt N., Wenyong D. He X., Müller J (2009) Non-invasive water status detection in grapevine (*Vitis vinifera* L.) by thermography. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* Vol. 2, n° 4, págs. 46-54.

ANEJOS

ANEJOS

Anejo I: Características generales de vitis vinífera l. cv. tempranillo

Origen y sinonimia:

El tempranillo es la variedad más extendida en España. Recibe este nombre por su pronta maduración respecto a las otras variedades. Está presente en 28 de las 54 Denominaciones de Origen y en 27 de las 49 comarcas productoras «de Vino de la Tierra. También se cultiva en Portugal, Francia, Argentina y Estados Unidos. Podría tener un origen borgoñón por la similitud con el proceso vegetativo de la Pinot Noir. Según esta hipótesis, procedería de los esquejes que los monjes borgoñeses de Cluny dispersaron por los diferentes monasterios castellanos de la orden.

Según la zona presenta distintos nombres, más de 15: Aragonez, Arganda, Cencibel Chinchillana, Escobera, Garnacho, Foño, Jaciuera, Negra de Mesa, Tinta Santiago, Tinta Montereiro, Tinto Fino, Tinto País, Tinto Riojano, Tinto de Toro, Tinto de Madrid, Ull de Liebre, Valdepeñas, Verdiell y Vid de Aranda.

En líneas generales, los mejores vinos de tempranillo se obtienen en zonas con alta insolación y con temperaturas nocturnas muy frías. En estas condiciones se alcanzan graduaciones alcohólicas más altas y una buena acidez, lo que permite obtener vinos de altísima calidad.

Caracteres ampelográficos:

- Cepa: vigorosa, de aspecto semiderecho.
- Sumidad: algodonosa blanca, con rebordes rosados.
- Hojas jóvenes: vellosa, bronceadas, con el envés algodonoso.
- Hojas adultas: grandes, de forma truncada, arrolladas, abarquilladas en el punto recolar y profundamente lobuladas. Senos laterales de fondo agudo; senos superiores, a veces, superpuestos. Dientes ojivales y de tamaño medio. Envés arañoso, con pelos pubescentes en las nervaduras. En otoño, el follaje enrojece prácticamente en su totalidad.
- Brazos: apostillados, verdes, de color pardo- rojizo en el lado opuesto al sol.
- Sarmientos: color amarillo claro, más o menos grisáceo, con nudos oscuros no pruinados.
- Racimo: tamaño medio, compacto, largo y alado.
- Baya: tamaño medio, esféricas, de color negro azulado. Hollejo bastante áspero, pulpa canosa y piel jugosa.

Aptitudes

Es una variedad de desborre medio, florece a finales de primavera, en la primera quincena de Junio. La madurez es temprana.

Se adapta a todo tipo de suelos con preferencia de terrenos orientados al mediodía bien soleados. Las regiones térmicas más adecuadas para su cultivo son la II, III y IV. Es poco sensible a las heladas primaverales pero sí lo es a los vientos cálidos de primavera.

Dependiendo de la zona de cultivo se le practica una poda larga o corta, respetando el equilibrio producción-calidad; y teniendo en cuenta que es una variedad de producción mediana.

Respecto a plagas y enfermedades, es muy sensible al oídio y algo al mildiu y erinosis.



Anejo II: Estación meteorológica Bardenas (El Plano) MARM



ESTACIÓN AUTOMÁTICA

Latitud: 4684074

Longitud: 622302

Altitud: 425 m

Propiedad de: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino

Fecha de instalación: 02/03/2004

Anejo III: Estación meteorológica Traibuenas RN



ESTACIÓN AUTOMÁTICA

Latitud: 4691051

Longitud: 614130

Altitud: 312 m

Propiedad de: Gobierno de Navarra - Riegos

Fecha de instalación: 19/07/1999

Anejo IV: Distribución del diseño del ensayo

Suelo	N° Cepa																																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
Laboreo	1	Sin riego (NR)																														Riego normal (R)																			
	2																Cepa con dendrómetro				Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro				Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro				Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro														
	3	Riego normal (R)															Doble riego (DR)																																		
Cubierta	N° Cepa																																																		
	3	Riego normal (R)															Sin riego (NR)																																		
	2										Cepa con dendrómetro					Cepa con dendrómetro					Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro				Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro																						
1	Doble riego (DR)																														Riego normal (R)																				
Piedra	N° Cepa																																																		
	3	Sin riego (NR)																														Riego normal (R)																			
	2										Cepa con dendrómetro					Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro				Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro				Cepa con dendrómetro		Cepa con dendrómetro																					
1	Riego normal (R)															Doble riego (DR)																																			

Legend:

- Sin riego (NR)
- Riego normal (R)
- Doble riego (DR)
- Cepa con dendrómetro

NOTA: La primera fila de cada tratamiento estará marcada en campo con una marca de spray arriba y abajo del poste inicial y la segunda llevará marcas arriba y en medio. La cepa número uno será la siguiente al poste marcado en su base con spray.