



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
FACULTAD DE AGRONOMIA E INGENIERIA FORESTAL
DIRECCION DE INVESTIGACION Y POSTGRADO
MAGISTER EN FISIOLOGIA Y PRODUCCION VEGETAL

“USO DEL MARGEN DE SEGURIDAD HIDRÁULICA Y PARÁMETROS
FISIOLÓGICOS ASOCIADOS A LA RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO EN LA
CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO CONTRASTANTE DE *Vitis*
vinifera CV. CHARDONNAY Y SAUVIGNON BLANC”

Tesis presentada como requisito para optar al grado de

Magister en Fisiología y Producción Vegetal

por:

Benjamín Velásquez Pizarro

Comité de Tesis

Profesor Guía: Dr. Alonso Gastón Pérez D.

Profesores Informantes:

Dr. José Antonio Alcalde F.

Junio 2022
Santiago-Chile

Agradecimientos

Finalizado este arduo trabajo, quiero agradecer a mi profesor guía Dr. Alonso Pérez Donoso por su entrega y dedicación, por estar siempre disponible, hasta en las horas más increíbles, para contestar mis dudas, ofrecer sus consejos y guiarme en este proceso, entregando siempre una mirada crítica y una excelente disposición a ayudar ante cualquier dificultad que surgiera a lo largo de todo el desarrollo de esta investigación. Agradecer a mi profesor informante Dr. José Antonio Alcalde por ofrecer su tiempo y conocimientos para la elaboración y revisión de esta investigación. Y agradecer a ambos por entregar su motivación y entusiasmo durante los ramos de pregrado y postgrado, que sin duda me impulsaron a seguir este camino.

Agradecer a todo el personal de Viña Santa Ema, por facilitar sus instalaciones para realizar esta investigación, por su excelente disposición a ayudar y por siempre entregar una sonrisa y simpatía, hasta en los momentos más complejos. Y cómo no, agradecer a los perritos del viñedo, que tantas alegrías me entregaron durante la temporada.

Agradecer a Álvaro Donoso, por su gran ayuda en la construcción de los aparatos pneumatrón y por su buena voluntad durante todo el proyecto.

Agradecer profundamente al equipo del laboratorio de fisiología frutal, en especial a Felipe Suarez y Bastián Silva, todos sus consejos, simpatía y ayuda a lo largo de la temporada fueron un apoyo fundamental.

Agradecer de todo corazón a mi familia, mi padre, mi madre y mi hermano por siempre impulsarme a dar lo mejor de mí, por inculcarme desde pequeño las ganas de aprender y por entregarme siempre su apoyo y su amor incondicional. Agradecer a mi Lela, quien a pesar de la distancia siempre me apoyó y acompañó en este proceso. Agradecer a mi novia, por estar siempre ahí para mí, por siempre motivarme a ser mejor y entregarme su amor y consejo en los momentos difíciles. Y agradecer a mi amada Guaquito, que en paz descansa, por acompañarme fielmente en cada una de mis noches de estudio desde el primer día. Sin ustedes nada de esto habría sido posible.

*Dedicado a mi padre,
mi madre, mi hermano,
mi lela, mi novia
y mi Guaco*

Índice

Abstract	5
Introducción	6
Hipótesis	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
Materiales y Métodos	15
Sitio de Estudio	15
Material Vegetal	15
Variables Climáticas	15
Establecimiento del experimento	15
Mediciones	17
Resultados	26
Variables Climáticas	26
Mediciones de Potencial Hídrico	26
Grado de isohidricidad	30
Intercambio gaseoso	31
Punto de pérdida de turgor (Ψ_{tlp})	34
Curvas de vulnerabilidad hidráulica	35
Margen de seguridad hidráulica y sus segmentos	39
Discusión	42
Potencial hídrico	42
Grado de isohidricidad, Intercambio gaseoso y punto de pérdida de turgencia	42
Curvas de vulnerabilidad hidráulica	47
Margen de seguridad hidráulica y sus segmentos	47
Conclusión	56
Resumen	58
Referencias	59
Anexos	64

“USO DEL MARGEN DE SEGURIDAD HIDRÁULICA Y PARÁMETROS FISIOLÓGICOS ASOCIADOS A LA RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO EN LA CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO CONTRASTANTE DE *Vitis vinifera* CV. CHARDONNAY Y SAUVIGNON BLANC”

Benjamín Velásquez Pizarro

Pontificia Universidad Católica de Chile

Abstract

Vitis vinifera is a fruit species of great importance worldwide that has positioned itself as a model species for the study of physiology and fruit production. Under a context of climate change and scarcity of water resources on a global scale, it is important understand the behavior of the main commercial varieties under drought conditions and promote the development of methodologies that allow discriminating between more or less vulnerable varieties in order to sustain viticultural production in risk areas in the long term. The objective of this research was to evaluate the use of the hydraulic safety margin and its segmentation by means of physiological parameters associated with the response to water stress in the characterization of the contrasting behavior of *Vitis vinifera* cv. Chardonnay and Sauvignon blanc. Water status was evaluated under different treatments of water replacement and fruit load, stomatal conductivity, degree of isohydricity, hydraulic vulnerability of the stem and cellular physiological parameters such as the point of loss of turgor in both varieties under field conditions. The results showed a contrasting behavior in the physiological parameters associated with the response to water stress between both varieties, which could be successfully characterized by using the hydraulic safety margin and the proposed segments, indicating a greater susceptibility of the Sauvignon blanc variety. It was concluded that the methodology proposed in this research is potentially useful for characterizing the behavior of *Vitis vinifera* varieties under water stress conditions.

Key words: Water stress, hydraulic safety margin, hydraulic vulnerability, stomatal conductance, degree of isohydricity, *Vitis vinifera*, point of loss of turgor.

Introducción

La vid (*Vitis vinifera*), es uno de los frutales de mayor importancia a nivel mundial en términos tanto económicos como culturales (Gambetta et al., 2020), con una superficie mundial total de 7,4 millones de hectáreas dedicadas a la producción de uva tanto para mesa como para vino y otros productos, generando una producción total de 77,8 millones de toneladas (OIV, 2019). El cultivo de la vid posee un gran impacto en el comercio internacional debido, en parte, a que presenta un volumen de exportación que para la temporada 2020/21 rondaba los 3,4 millones toneladas de uva (Fresh fruit portal, 2021) y 108,4 millones de hectolitros de vino, valuados en aproximadamente 35,4 billones de dólares (OIV, 2019).

A nivel nacional, Chile se posiciona como el cuarto mayor exportador a nivel mundial de vino (OIV, 2019), y como el segundo exportador a nivel mundial de uva de mesa para la temporada 2021 generando un total de 928 millones de dólares, lo cual representa un 10% de las exportaciones totales a nivel mundial (Portal Fruticola, 2020; Redagricola, 2022), por lo cual el cultivo de la vid presenta una importante participación en la economía del país.

Dado lo mencionado anteriormente, sumado al hecho de que la vid se ha posicionado como una especie frutícola modelo para el estudio de la fisiología y producción frutal (Gambetta et al., 2020), es que resulta de gran importancia comprender como los distintos escenarios de cambio climático impactaran en el desarrollo futuro de esta especie.

El cambio climático es uno de los tópicos más importantes en la actualidad, siendo de especial importancia dentro de sus efectos el fenómeno de la escasez hídrica, el cual afecta enormemente todas las áreas de la agricultura, entre ellas la viticultura. Se estima que en el año 2025, 1.800 millones de personas vivirán en países o regiones con escasez absoluta de agua; bajo este contexto, se proyecta que en el año 2030, casi la mitad de la población mundial vivirá en áreas de estrés hídrico (ONU, 2014). En términos nacionales, Chile es un país con abundantes recursos hídricos; sin embargo, hay un fuerte desequilibrio geográfico entre la localización de los recursos y la población, donde

la región central y norte, deficitaria en agua, concentra el 65% de la población del país (Quezada, 2018).

En Chile las zonas vitivinícolas se distribuyen de norte a sur, desde el Valle del Aconcagua hasta el Valle del Bio Bio, sin embargo, es justamente en las zonas Central y Norte, mencionadas en el párrafo anterior, donde se concentra la mayor producción vitivinícola (Hernández, 1997). Al ser estas zonas las más afectadas, tanto por la escasez del recurso hídrico como por la competencia con el uso de agua doméstico, será cada vez más necesario disminuir o incluso eliminar el uso de riego, dado que los viñedos pueden representar un consumo de agua de entre 6.000 y 10.000 metros cúbicos por hectárea al año, dependiendo de la variedad y de la situación productiva (Campos, 2016).

En la vid, así como en las distintas especies vegetales, el déficit del recurso hídrico tiene un gran impacto a nivel fisiológico, esto debido a la gran cantidad de procesos y componentes celulares en los que se requiere de agua, y al mecanismo que las plantas evolutivamente fueron desarrollando para abastecerse y hacer frente a la reducción del recurso hídrico tan esencial. Así, a medida que el agua del suelo se va agotando, la planta debe generar potenciales hídricos cada vez más negativos en cada uno de sus componentes. Lo cual tiene como consecuencia un aumento en la tensión sobre el xilema, que permite que el potencial hídrico en las raíces sea menor que en la matriz de suelo, facilitando el flujo de agua hacia el interior de la planta y manteniendo la turgencia. Dependiendo de la especie esto se puede lograr de distintas maneras, como por ejemplo sintetizando solutos para la regulación osmótica (Turner, 2018).

Al ir quedando sin agua el suelo, el flujo de agua hacia la planta será menor que el flujo desde los estomas a la atmósfera, por lo cual la planta comenzará a deshidratarse rápidamente, y una vez que los potenciales hídricos de la planta pasen por un umbral de estrés determinado, ésta cerrará sus estomas (Charrier et al., 2018). Si esto no ocurre, o si la tensión producida en la columna de agua es aun así excesiva (por sobre la tensión crítica) para el diámetro de los vasos, entonces se romperá la cohesión de la columna de agua, produciendo cavitación y la consecuente embolia y pérdida de funcionalidad de los elementos de vaso (Gambetta et al., 2020).

A nivel fisiológico, lo primero que ocurrirá en la planta a medida que el agua del suelo se agota es que disminuirá el turgor de las células, lo cual está directamente relacionado con la capacidad de extensibilidad de la pared celular y por ende se detendrá o disminuirá el crecimiento o elongación de las células (Cosgrove, 2016). Seguido de esto, ocurrirá un bloqueo de la síntesis de proteínas y ADN lo que imposibilitará la formación de nuevas membranas y paredes (Taiz, 2015). Posteriormente, caerá la tasa fotosintética, debido a la disminución de la asimilación de CO₂ (Taiz, 2015). Finalmente, desde que los estomas se cierran la planta dependerá de las reservas de agua dentro de ella y una vez que el suelo alcance potenciales hídricos de “punto de marchitez permanente” la planta ya no será capaz de generar una tensión suficiente como para restaurar el suministro de agua y se alcanza el umbral de mortalidad.

La embolia es uno de los parámetros que se pueden utilizar para la interpretación de la resistencia a estrés hídrico, donde distintas especies difieren en su vulnerabilidad a la embolia (Lambers et al., 2008). El parámetro comúnmente utilizado para su comparación es el potencial hídrico en el cual se produce un 50% de pérdida de la conductividad hidráulica (P50) (Dayer et al., 2020), dado que investigaciones como Charrier et al. (2018) reportan que en condiciones de estrés hídrico en las que se alcanzan niveles iguales o superiores al P50, la transpiración o conductancia estomática no logra volver a valores normales (no se recupera) incluso hasta después de un año posterior a la normalización de la reposición hídrica. Así mismo, una vez alcanzados niveles cercanos al P50, se reporta en la misma investigación una pérdida del 83,6% de la superficie foliar.

Para la cuantificación del P50 se utilizan las llamadas “curvas de vulnerabilidad”, donde se describe la relación entre la formación de embolismo xilemático y la presión negativa ejercida en el xilema, mediante la interacción entre la pérdida de conductancia hidráulica y el potencial hídrico xilemático de una sección de tallo u otro órgano vegetal (Pereira et al., 2016).

La conductancia hidráulica del tallo (K) se determina comúnmente midiendo el flujo de agua a diferentes presiones a través de un segmento del tallo (Sperry et al., 1988 citado por Pereira et al. (2016)). A su vez, las embolias se cuantifican generalmente como el porcentaje de pérdida de conductancia (PLC), a partir de la relación entre la

conductancia de un segmento de tallo embolizado (K_{min}) y la conductancia de un segmento de tallo no embolizado (K_{max}) (Pereira et al., 2016).

Existen diversos métodos para la medición de la vulnerabilidad hidráulica, entre ellos el método de deshidratación de banco, centrifugación, inyección de aire, emisiones acústicas, vulnerabilidad óptica, X-ray-computed microtomography (MicroCT), imágenes de resonancia magnética, etc. (Trabi et al., 2021). Sin embargo, en su mayoría son métodos costosos y consumen una gran cantidad de tiempo (Pereira et al., 2020; Trabi et al., 2021).

Recientemente Pereira et al. (2016) presentaron el método neumático para la medición de la vulnerabilidad hidráulica, que se basa en leyes de la física tales como la ley de Fick para la difusión, la ley de Henry para la partición de la concentración de gas entre las fases líquida y gaseosa en equilibrio, y la ley de los gases ideales (Pereira et al., 2020), donde se aplica un vacío parcial a la base cortada de una rama para medir la cantidad de gas extraído del tejido de la planta, especialmente del xilema. La extracción de gas es monitoreada en el tiempo, mientras el tejido de la planta se deseca (Pereira et al., 2020). El porcentaje de aire extraído del tejido vegetal es proporcional a la embolia producida en los conductos xilemáticos así como con el PLC (Paligi et al., 2021; Pereira et al., 2020; Pereira et al., 2016; Trabi et al., 2021) lo que permite el desarrollo de curvas de vulnerabilidad de forma exitosa.

Una de las principales ventajas del método neumático es que se basa en el método de deshidratación de banco para inducir la embolia, por lo que no se sabe que cause errores potenciales como los reportados en los métodos de inyección de aire y de centrifugación (Pereira et al., 2020). Además, el método neumático demostró ser más rápido, requerir de menos material vegetal, requerimiento de una mínima manipulación de las muestras (lo que disminuye los errores potenciales) y un bajo costo (Pereira et al., 2020; Pereira et al., 2016; Trabi et al., 2021). Por otro lado, este método obtuvo resultados consistentes en especies de poro difuso y, según indican Trabi et al. (2021), es aplicable en lianas y especies de vasos xilemáticos largos, donde de hecho, la difusión del gas sería incluso más precisa debido al mayor diámetro de los vasos xilemáticos, tal como es el caso de la vid.

Sin embargo, en condiciones de estrés hídrico no extremas, el estatus hídrico es en gran parte modulado por la regulación estomática (Dayer et al., 2020), lo cual influye en el P50, por ende el margen de seguridad hidráulica (HSM), entendido como la diferencia entre el potencial hídrico en el que se produce el cierre estomático y el potencial hídrico en el que se produce el 50% de la pérdida de conductividad hidráulica (P50) (Dayer et al., 2020), podría ser más apropiado para evaluar la mortalidad de las plantas bajo sequía. Por ejemplo, Anderegg et al. (2016), informan que una vez realizado un meta análisis de 33 estudios que abarcaron 760.000 árboles individuales y 475 especies diferentes, el HSM (específicamente en base al P50) resultó ser el parámetro que mejor predecía la mortalidad ante la sequía entre todas las especies combinadas ($p = 0,01$).

Distintas investigaciones han utilizado el HSM para explorar el comportamiento de *Vitis vinífera* ante la sequía. Charrier et al. (2018) reportaron un comportamiento dinámico del HSM en distintas variedades. Dayer et al. (2020) evaluaron el HSM definiendo comportamientos contrastantes entre las variedades Syrah y Garnacha. Sorek et al. (2021) reportaron la existencia de una variabilidad estacional en el HSM durante la temporada en Cabernet Sauvignon. A pesar de esto, un estudio realizado por Choat & Way (2013) determinaron que en especies angiospermas, al llegar al P50 (límite inferior o más negativo del HSM) se generan daños irreparables a nivel hidráulico y de intercambio gaseoso, pero es en realidad a potenciales hídricos cercanos al 88% de embolia (P88) en donde estas especies mueren o llegan al punto de no retorno fisiológico, resultados que concuerdan con los expuestos por Urli et al. (2013) en un estudio realizado en especies del género *Quercus*. Por otro lado, en la mayoría de las investigaciones consultadas, se menciona que en condiciones de campo no se alcanzan niveles de potencial hídrico cercanos al P50 o P88, lo que limitaría la relevancia de la información extraída del HSM solo a condiciones extremas.

A partir de lo expuesto anteriormente, surge la inquietud de explorar la relevancia de incorporar dos parámetros más al análisis del HSM, los cuales son el potencial hídrico en el cual se genera la pérdida de la turgencia (Ψ_{tlp}), lo que se ha planteado en cierta forma en investigaciones como Sorek et al. (2021) (aunque de forma indirecta) y el anteriormente mencionado P88. El Ψ_{tlp} sería un indicador útil ya que la pérdida de la turgencia celular implica o se relaciona con una limitación o cese en la capacidad de

crecimiento plástico (Cosgrove, 2015). Asimismo, Dayer et al. (2020) mencionan que el cierre estomático antes del Ψ_{tlp} se considera un mecanismo de tolerancia a la sequía que permite a la planta sobrevivir con el agua almacenada, que se perdería lentamente considerando una conductancia estomática mínima.

Al incorporar el Ψ_{tlp} al análisis del HSM y utilizar el P88 además del P50 y no en vez de él, se obtendría información relevante y complementaria al HSM que permitiría analizar un panorama más completo con relación a la respuesta al estrés hídrico, dado que se generaría una segmentación del HSM en tres secciones. La primera sección (en orden descendiente de potencial hídrico), estaría contenida por el potencial hídrico de cierre estomático (donde se generan limitaciones al intercambio gaseoso afectando la concentración de CO_2 en la cavidad subestomática y la asimilación de CO_2) y el Ψ_{tlp} (donde se vería limitada la capacidad de crecimiento plástico), la segunda sección estaría entre el Ψ_{tlp} y el P50 (donde se generarían daños a nivel hidráulico y de intercambio gaseoso) y la tercera y última sección estaría delimitada por el P50 y el P88 (donde se generaría la mortalidad de las plantas) (Figura 1).

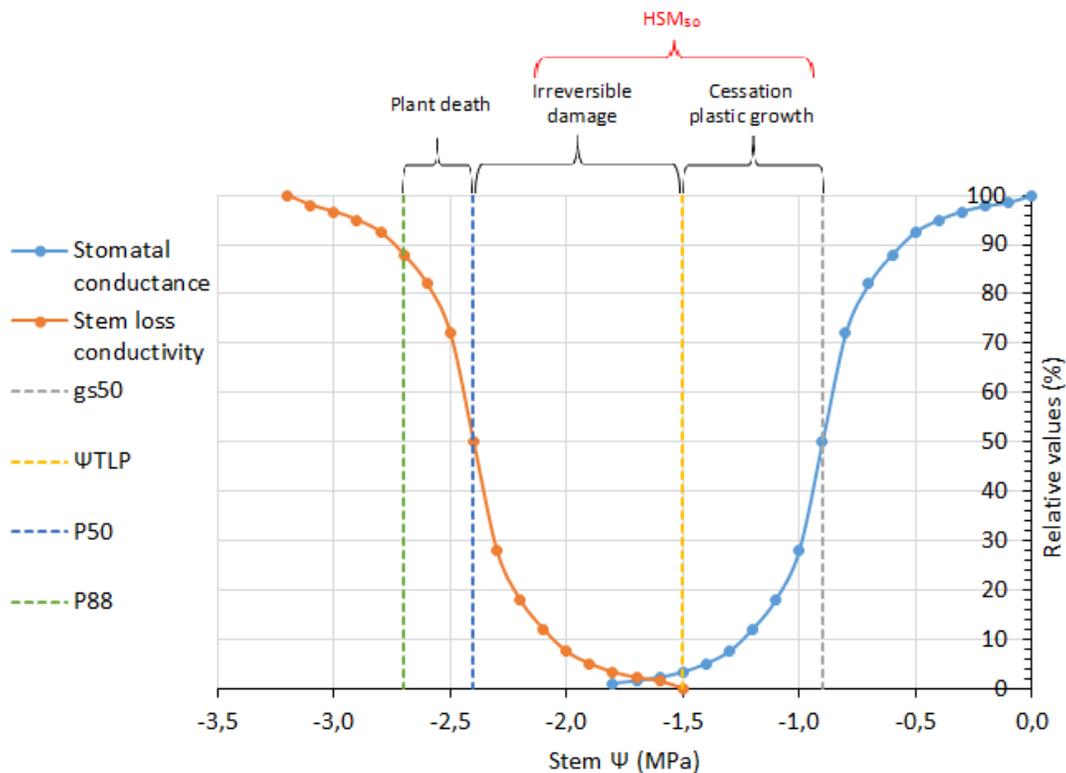


Figura 1: Representación gráfica de los indicadores fisiológicos conductancia estomática, pérdida de conductividad del tallo, 50% de cierre estomático (gs50), punto de pérdida de turgencia (Ψ TLP), 50% y 88% de pérdida de conductividad de tallo (P50 y P88 respectivamente) en función de la disminución del potencial hídrico de tallo.

La importancia de lo expuesto y propuesto en los párrafos anteriores es que al analizar estos parámetros y correlacionarlos con otros que otorguen mayor solidez conceptual como por ejemplo la capacitancia (en el caso del primer segmento), el primer segmento del gráfico podría relacionarse con el rango de potenciales en el cual se producen principalmente limitaciones en la producción. El segundo segmento del gráfico se podría relacionar con el rango de potenciales en el cual la planta promueve su supervivencia mediante mecanismos como la defoliación por segmentación de la vulnerabilidad hidráulica descrita en la vid (Gambetta et al. 2020), dada la pérdida de hojas de un 83,6% reportada por Charrier et al. (2018). Mientras que el tercer segmento se podría relacionar con el rango de potenciales en el cual se producirán daños irreversibles y la muerte de

la planta. De esta forma, el análisis propuesto otorga una representación gráfica e información relevante para la selección y manejo de especies y variedades bajo condiciones de déficit del recurso hídrico que se prevén para el futuro y que ya se manifiestan en diversos lugares del mundo. Por lo tanto, surge como finalidad de esta tesis evaluar el uso del margen de seguridad hidráulico y su segmentación a partir de parámetros fisiológicos asociados a la respuesta al estrés hídrico como indicadores para el manejo de especies vegetales bajo condiciones de sequía.

Hipótesis

Incorporar indicadores fisiológicos como el potencial hídrico en el punto de pérdida de turgencia y el 88% de pérdida de conductancia hidráulica al margen de seguridad hidráulica, generará distintos segmentos en su representación gráfica asociados a comportamientos diferentes en el manejo del estatus hídrico, permitiendo una mejor caracterización de *Vitis vinifera* cv. Chardonnay y Sauvignon blanc ante condiciones de sequía.

Objetivo general

Estudiar la utilidad del margen de seguridad hidráulica y su segmentación, mediante la incorporación de parámetros fisiológicos involucrados al estatus hídrico de la vid, como un indicador del comportamiento de esta especie ante condiciones de estrés hídrico.

Objetivos específicos

1. Evaluar y comprobar el comportamiento contrastante en el estatus hídrico e indicadores fisiológicos asociados al estrés hídrico de *Vitis vinifera* cv. Chardonnay y Sauvignon blanc mediante la imposición de tratamientos de restricción hídrica y carga frutal.
2. Elaborar el margen de seguridad hidráulica y su segmentación en variedades de *Vitis vinifera* (cv. Chardonnay y Sauvignon blanc) con comportamiento contrastante frente al manejo del estrés hídrico.
3. Comprobar el comportamiento de los segmentos del margen de seguridad hidráulica y parámetros fisiológicos asociados al estrés hídrico frente a variedades con comportamiento contrastante.
4. Evaluar la utilidad de la segmentación del margen de seguridad hidráulica en la caracterización del comportamiento contrastante de las variedades de *Vitis vinifera* Chardonnay y Sauvignon blanc.

Materiales y Métodos

Sitio de Estudio

El estudio se desarrolló durante la temporada 2021-2022, en los cuarteles 21 y 22 (Sauvignon blanc y Chardonnay, respectivamente) de los viñedos de Viña Santa Ema, ubicada en la comuna de Isla de Maipo de la Región Metropolitana, Chile (33°45' 28.083"S 70°52' 33.054"W).

Material Vegetal

El material vegetal utilizado corresponde a plantas de aproximadamente 8 años de edad de la especie *Vitis vinífera*, variedad Chardonnay y Sauvignon blanc, ambas variedades de uva blanca, establecidas el año 2015. Los cuarteles seleccionados presentaban buen estado fitosanitario y se establecieron sobre portainjerto 5BB. El marco de plantación utilizado es de 2 x 1,3 metros, con un sistema de conducción en espaldera vertical con orientación Norte – Sur, cuyos manejos de fertilización y fitosanitarios fueron determinados y suministrados por Viña Santa Ema según su programa habitual.

Variables Climáticas

Se accedió a la información climática a partir de la estación meteorológica “Talagante” perteneciente a la Red Agrometeorológica de INIA ubicada aproximadamente a 10 Km de Viña Santa Ema. A partir de esta estación se obtuvo la información pertinente a temperatura, humedad relativa y radiación solar, precipitaciones acumuladas. El déficit de presión de vapor (DPV) se determinó a partir de la ecuación de Penman-Monteith según FAO (2006).

Establecimiento del experimento

El experimento se estableció el día 22 de diciembre del año 2021, momento en el cual las vides se encontraban en el estado fenológico “77 – Las bayas comienzan a tocarse” según la escala BBCH (Bleholder et al., 1998). Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas (Split plot), comprendido por 13 parcelas aleatorias por variedad y dos factores. El factor principal (main plot) fue el riego, con tres niveles, 100% (R100), 50% (R50) y 0% (R0) de reposición hídrica en base a la evapotranspiración de referencia en donde los niveles R100 fueron regados con normalidad según la programación de riego

elaborada por Viña Santa Ema (Tabla 1) cuyas líneas de riego presentaban goteros con un caudal de 2 L/h, para los niveles R50 se sustituyeron las líneas de riego por líneas con goteros cuyo caudal corresponde a la mitad del original, es decir 1 L/h y finalmente a los niveles R0 se les reemplazó la línea de riego por líneas “ciegas”, es decir, sin goteros. El segundo factor (sub-plot) fue la carga frutal, con dos niveles, 100% (C100) y 0% (C0) de carga frutal. Cada nivel de riego tuvo 4 repeticiones (excepto R50 el cual contó con 5 repeticiones) por variedad repartidos aleatoriamente entre las parcelas y a su vez cada parcela contó con ambos niveles de carga frutal (Figura 2).

Tabla 1: Programa de riego Viña Santa Ema.

Programa de riego Viña Santa Ema	
Fecha	Riego
15-dic	12 horas de riego
22-dic	4 horas de fertirriego
28-dic	4 horas de fertirriego
05-ene	12 horas de riego
13-ene	12 horas de riego
20-ene	4 horas de fertirriego
27-ene	12 horas de riego

Hilera	Variedad: Sauvignon Blanc									
3	10 R100 C100 C0		11 R50 C100 C0		12 R0 C0 C100		13 R50 C0 C100			
2	6 R100 C0 C100		7 R0 C100 C0		8 R0 C0 C100		9 R50 C100 C0			
1	1 R50 C0 C100		2 R50 C100 C0		3 R0 C100 C0		4 R100 C0 C100		5 R100 C0 C100	
Hilera	Variedad: Chardonnay									
3	10 R100 C100 C0		11 R50 C100 C0		12 R0 C0 C100		13 R50 C0 C100			
2	6 R100 C0 C100		7 R0 C100 C0		8 R0 C0 C100		9 R50 C100 C0			
1	1 R50 C0 C100		2 R50 C100 C0		3 R0 C100 C0		4 R100 C0 C100		5 R100 C0 C100	

Figura 2: Representación gráfica del establecimiento de los tratamientos en el sitio de estudio.

Mediciones

- Potencial hídrico:

Las mediciones de potencial hídrico en terreno se realizaron en prealba (entre las 5:00 am y las 7:00 am) y medio día (entre las 12:00 pm y las 14:00 pm) en los días 3 de enero, 11 de enero y 1 de febrero para la variedad Sauvignon blanc y en los días 4, 12 y 31 de enero para la variedad Chardonnay. Se utilizaron hojas completamente expandidas con la lámina en buen estado ubicadas a partir del nudo número 10 (los días 3 y 4 de enero sólo se midió potencial hídrico de prealba y de tallo).

Para la medición de potencial hídrico de hoja a medio día (Ψ_{LWP}) las hojas se introdujeron dentro de una bolsa de polietileno cerrada de forma hermética y se cortaron en la zona del pecíolo con una navaja bien afilada de manera de obtener un corte limpio. El corte se refrescó previo a la medición y luego se introdujo la muestra en una cámara de presión portátil (Pump-Up Chamber, PMS Instrument Company, USA) o bien una cámara de presión conectada a un cilindro de gas nitrógeno (1505D-EXP Pressure Chamber, PMS Instrument Company, USA) según la disponibilidad de los instrumentos, para obtener la lectura de potencial hídrico correspondiente.

Para la medición de potencial hídrico de tallo a medio día (Ψ_{SWP}) las hojas se introdujeron dentro de una bolsa de plástico cubierta de papel metálico cerrada de forma hermética, se dejaron acondicionar durante un periodo de 30 minutos y luego se cortaron en la zona del pecíolo con una navaja bien afilada de manera de obtener un corte limpio. El corte se refrescó previo a la medición y luego se introdujo la muestra en una cámara de presión portátil (Pump-Up Chamber, PMS Instrument Company, USA) o bien una cámara de presión conectada a un cilindro de gas nitrógeno (1505D-EXP Pressure Chamber, PMS Instrument Company, USA) según la disponibilidad de los instrumentos, para obtener la lectura de potencial hídrico correspondiente.

- Grado de isohidricidad:

El grado de isohidricidad fue desarrollado en base al protocolo elaborado por Martínez-Vilalta et al. (2014), generando una regresión lineal a partir de la relación entre el potencial hídrico de prealba (Ψ_{Pa}) y el potencial hídrico de hoja en medio día (Ψ_{LWP}). La significancia de esta relación se sustenta, a priori, en que la caída de potencial hídrico

en la planta aumentará si la conductancia hidráulica disminuye más rápidamente que la tasa de transpiración a medida que el recurso hídrico se vuelve más limitante en el suelo, mientras que se reducirá si la tasa de transpiración disminuye más rápidamente que la conductancia hidráulica de la planta (Martínez-Vilalta et al., 2014). En función de esto, Martínez-Vilalta et al. (2014) propone 4 rangos de iso/anisohidricidad: Si la pendiente de la relación $\Psi_{Pa}-\Psi_{LWP}$ es igual a 0 entonces se le reconoce como un comportamiento estrictamente isohídrico, si es igual a 1 entonces se le reconoce como un comportamiento estrictamente anisohídrico, si se encuentra entre 0 y 1 se le reconoce como un comportamiento parcialmente isohídrico y si es mayor a 1 se le reconoce como un comportamiento extremadamente anisohídrico.

- Intercambio Gaseoso:

El parámetro fisiológico denominado conductancia estomática ($gs - \text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), fue medido mediante un sistema portátil de fotosíntesis LICOR, modelo LI-6400XT conocido como analizador de gases infrarrojo (iRGA). Las mediciones se realizaron los días 11 de enero, 1 y 15 de febrero para la variedad Sauvignon blanc y 12 y 31 de enero para la variedad Chardonnay, en dos momentos del día: Durante la mañana (entre las 9:00 am y las 13:30 pm) y durante la tarde (entre las 14:30 pm y las 19:00 pm). Previo a cada medición se realizó una calibración del instrumento respetando los siguientes parámetros: Radiación PAR de $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, una concentración de $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$, temperatura y humedad ambiente y un Flow rate de $500 \mu\text{mol s}^{-1}$.

Para cada variedad se realizaron mediciones de plantas bajo los distintos tratamientos de irrigación y carga frutal, de manera de generar una curva con la mayor cantidad de puntos posibles bajo distintas condiciones de potencial hídrico por variedad. Finalmente, para generar la curva de respuesta estomática, gs fue expresada en términos de porcentaje del máximo valor obtenido y se graficó frente al potencial hídrico de tallo (SWP) según indica la metodología elaborada por Sorek et al. (2021), utilizando el siguiente modelo de regresión logística:

$$gs = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$$

Donde a corresponde al 100% de conductancia estomática (valor más alto obtenido en las mediciones de campo), $1/b$ corresponde a la pendiente, x al potencial hídrico asociado a la conductancia estomática correspondiente y x_0 corresponde al potencial hídrico en el que la conductancia estomática se reduce al 50%.

- Curvas de Presión-Volumen (P-V):

La elaboración de curvas de presión-volumen se realizó en base al protocolo elaborado por Silva (2021) a partir del protocolo descrito por Bartlett et al. (2012) y Sack et al. (2010) en donde:

La medición de potencial hídrico de las hojas se realizó con una cámara de presión conectada a un cilindro de gas nitrógeno (1505D-EXP Pressure Chamber, PMS Instrument Company, USA) para obtener una mayor precisión en la lectura. Las mediciones del peso de las hojas se realizaron con una balanza digital (Radwag, WTB 200, PL) previamente calibrada. Para la rehidratación de las muestras de hoja se utilizó una solución de KCl (15 mmol) conservada a 4°C.

La recolección de hojas se realizó temprano en la mañana, manteniendo el peciolo de las hojas en la solución de KCl en todo momento y depositándolas dentro de una nevera con bloques de hielo durante su traslado al laboratorio en donde las muestras fueron almacenadas en un refrigerador y se mantuvieron en hidratación durante 24 horas. Posteriormente, las muestras fueron fotografiadas para realizar el cálculo de área foliar utilizando el software ImageJ 1.53K (Wayne Rasband and Contributors National Institute of Health, USA). Se realizó la medición de potencial hídrico de cada hoja en conjunto con la obtención de su peso medido con una balanza digital y se utilizó el método de deshidratación de banco para permitir la deshidratación de las hojas, repitiendo el procedimiento cada 10 minutos hasta obtener potenciales hídricos menores a -2 MPa. Finalmente, las muestras de hoja fueron depositadas en un horno a 70°C hasta obtener su peso seco.

Los datos de cada muestra fueron procesados en la planilla Excel (Microsoft Office, USA) publicada por Sack et al. (2010), con la que se obtuvo el dato de interés, Punto de pérdida de turgor (Ψ_{tlp}), entendido como el punto en el que el potencial de turgencia es 0 y, por

tanto, el potencial hídrico de la hoja es igual al potencial osmótico (Sack et al., 2010) y la información adicional asociada a las curvas de presión-volumen.

Gráficamente, el Punto de pérdida de turgor (Ψ_{TLP}) se observa como el punto de transición entre las porciones lineales y no lineales de la relación presión-volumen (Sack et al., 2010) (Figura 3).

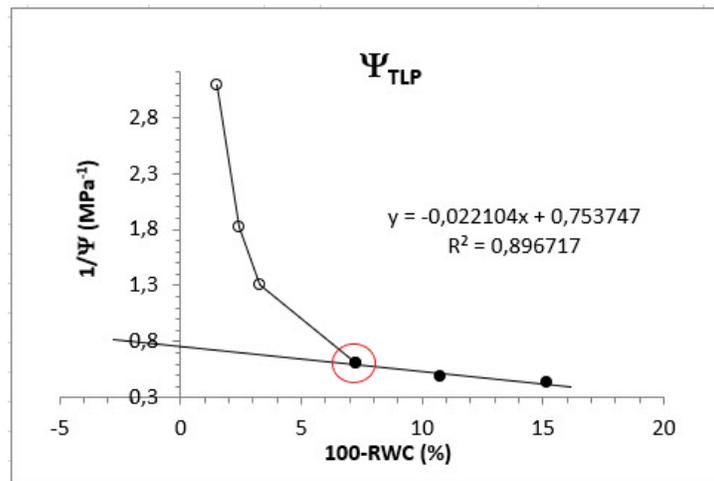


Figura 3: Ejemplo de curva Presión-Volumen tratamiento SB2R50C100, el círculo rojo representa el Punto de pérdida de turgor (Ψ_{TLP}).

- Curvas de vulnerabilidad hidráulica:

Las curvas de vulnerabilidad hidráulica se elaboraron según la metodología establecida por Trabi et al. (2021), utilizando el método desarrollado por Pereira et al. (2016). Este método se denomina “método neumático” y se basa en leyes de la física tales como la ley de Fick para la difusión, la ley de Henry para la partición de la concentración de gas entre las fases líquida y gaseosa en equilibrio, y la ley de los gases ideales (Pereira, et al., 2020), en donde se aplica un vacío parcial a la base cortada de una rama para medir la cantidad de gas extraído del tejido de la planta, especialmente del xilema, la extracción de gas es monitoreada en el tiempo, mientras el tejido de la planta se deseca (Pereira, et al., 2020). El porcentaje de gas extraído del tejido vegetal es proporcional a la embolia producida en los conductos xilemáticos así como al porcentaje de pérdida de conductancia hidráulica (PLC) (Paligi et al., 2021; Pereira, et al., 2020; Pereira et al., 2016; Trabi et al., 2021), lo que permite el desarrollo de curvas de vulnerabilidad.

Para llevar a cabo este método se utilizó un aparato pneumatrón automático de elaboración propia basado en las indicaciones desarrolladas por Pereira et al. (2020) y Trabi et al. (2021) (Figura 5), el cual mide el gas descargado del tejido de la planta en forma de diferencial de presión en kilopascales (kPa). Este se compone principalmente de una bomba de vacío, una válvula solenoide, un sensor de presión, un data logger y un microcontrolador marca Arduino (Figura 4), adicionalmente se les agregó una cubierta de esponja tanto a la bomba de vacío como a la válvula solenoide para evitar el ingreso de partículas de polvo en los componentes.

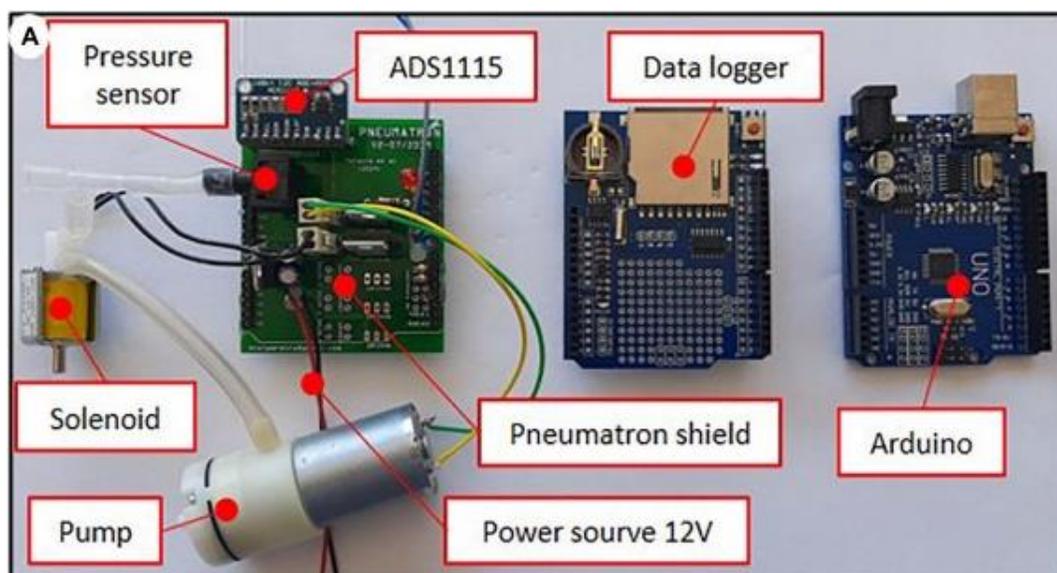


Figura 4: Componentes del aparato pneumatrón (Trabi et al., 2021).



Figura 5: Aparatos pneumatrón de elaboración propia.

La calibración de los aparatos pneumatrón se llevó a cabo mediante el método de la columna de agua presentado por Trabi et al. (2021), el protocolo de detección de fugas se determinó según lo establecido en la información complementaria del artículo elaborado por Trabi et al. (2021), utilizando film plástico y pegamento a base de látex para mejorar el ajuste y evitar las fugas a través de la conexión pneumatrón-rama (Pereira et al., 2016), además de silicona caliente para sellar las fugas generadas en el material vegetal por efecto de cortes o lesiones. Para calcular el volumen del tubo de descarga de cada variedad se utilizó un brote de similares dimensiones que los brotes utilizados para las mediciones, completamente deshidratado, se hicieron varias mediciones de aire descargado (AD) hasta obtener una meseta final constante, luego el valor máximo de gas descargado obtenido en microlitros dividió por 510.2 para obtener el volumen ideal de tubo de descarga para las muestras de esas características (Pereira et al., 2020; Trabi et al., 2021). La deshidratación del material vegetal se hizo con el método de deshidratación de banco por un periodo de al menos 24 horas en cada medición.

El material vegetal utilizado corresponde a 3 brotes en buen estado fitosanitario de los tratamientos R100C0 tanto de la variedad Sauvignon blanc como Chardonnay, el diámetro de los brotes utilizados no se registró, pero según información recopilada previamente por Suarez et al. (n.d.) (información no publicada) corresponden en promedio a $7,6 \pm 1,3$ mm para la variedad Chardonnay y $8,1 \pm 0,7$ mm para la variedad Sauvignon blanc. Los brotes fueron seleccionados y etiquetados aproximadamente a las 7:00 am de cada día de medición durante días principalmente nublados según recomiendan Paligi et al. (2021), Pereira et al. (2020) y Trabi et al. (2021), luego se embolsaron individualmente 4 hojas en bolsas de papel aluminio para equilibrar el potencial hídrico de la hoja con el tallo y posteriormente se embolsaron los brotes completos en bolsas de plástico negra con paños húmedos en su interior, según indica Zhang et al. (2018), para evitar la deshidratación, y se sellaron dejando únicamente los dos primeros nudos fuera de la bolsa. Los brotes se cortaron con tijeras de podar bien afiladas y se introdujeron rápidamente en solución de KCl (10 mmol) siendo rápidamente trasladados a la zona donde se realizó la medición (galpón ubicado aproximadamente a 3 minutos de las plantas). El método elaborado por Pereira et al. (2016) permite realizar los cortes en el aire ya que los vasos cortados que se llenan de aire se consideran parte del volumen del tubo de descarga, sin embargo, previo a conectar cada brote en un aparato pneumatrón utilizando el tubo de descarga correspondiente para cada individuo, se refrescó el corte extrayendo los primeros tres entrenudos de cada brote bajo el agua ya que en pruebas previas se dio que los tallos de *Vitis vinífera* de las variedades utilizadas cortados en aire cavitaban muy rápidamente. Finalmente se comenzó con la medición de aire descargado (AD) cada 15 minutos durante al menos 24 horas con potenciales hídricos decrecientes a medida que los brotes se deshidrataban hasta obtener mediciones de AD constantes.

Las mediciones de potencial hídrico de tallo (SWP) se realizaron 6 veces, las primeras cuatro inmediatamente luego de comenzar con la medición de AD con intervalos de aproximadamente 30 minutos y las últimas dos al final del ciclo de medición de AD (día 2) con un intervalo de aproximadamente una hora, posteriormente se realizó una regresión lineal para obtener el mejor ajuste entre potencial hídrico y tiempo, asumiendo un comportamiento lineal del potencial hídrico en el tiempo (Pereira, comunicación

personal, 2022). Se utilizó una cámara de presión portátil (Pump-Up Chamber, PMS Instrument Company, USA) para las primeras cuatro mediciones y para las últimas dos una cámara de presión conectada a un cilindro de gas nitrógeno (1505D-EXP Pressure Chamber, PMS Instrument Company, USA).

Para construir las curvas de vulnerabilidad, se utilizó la planilla denominada e “data_example_pneumatron.xlsx” entregada por Trabi et al. (2021) en el “Material suplementario 2”, en donde la ley de los gases ideales se aplica para calcular el volumen de aire descargado en forma de moles de gas (Δn):

$$AD = \Delta n = \frac{P_i V_r}{RT} - \frac{P_f V_r}{RT}$$

Donde V_r es el volumen del tubo de descarga (mL), que corresponde al volumen del tubo desde el sensor de presión hasta la conexión con la muestra; T es la temperatura absoluta del gas en grados Kelvin, y R es la constante de los gases ideales ($8,3144621 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$). Luego, se calcula el porcentaje de gas descargado (PAD) según la siguiente ecuación:

$$PAD = 100 \left(\frac{GD - GD_{min}}{GD_{max} - GD_{min}} \right)$$

Y, finalmente se ajusta la curva PAD al siguiente modelo sigmoidal para obtener la curva de vulnerabilidad hidráulica final:

$$PAD = \frac{100}{1 + e^{\left(\left(\frac{S}{25} \right) (\Psi_x - \Psi_{50}) \right)}}$$

Donde, Ψ_x es el potencial hídrico medido para un PAD determinado, Ψ_{50} es el potencial hídrico cuando el PAD es igual al 50%, y S es la pendiente de la curva.

- Margen de seguridad hidráulica y sus segmentaciones:

Para mantener la integridad de su sistema hidráulico las plantas, en este caso la vid, mantiene su potencial hídrico dentro de un “margen de seguridad hidráulico” (MSH) (Sorek et al., 2021), este MSH es usualmente definido como la diferencia entre el potencial hídrico de cierre estomático (gs_{90}) y el potencial hídrico en el cual ocurre un

50% de pérdida de la conductancia hidráulica (Ψ_{50}) (Charrier et al., 2018; Dayer et al., 2020; Meinzer et al., 2009; Sorek et al., 2021).

Para elaborar el MSH de las variedades Sauvignon blanc y Chardonnay, se siguió la metodología propuesta por Sorek et al. (2021) para graficar la respuesta de la conductancia estomática y la vulnerabilidad hidráulica en términos de porcentaje frente al potencial hídrico de tallo (SWP) expresado en megapascales (MPa) sobre un sólo gráfico, posicionando sobre la curva de vulnerabilidad hidráulica el parámetro de Ψ_{50} , al mismo tiempo y siguiendo la metodología presentada por Dayer et al. (2020), se posicionó sobre la curva de vulnerabilidad hidráulica el parámetro de Ψ_{88} (potencial hídrico en el cual se genera un 88% de pérdida de la conductancia hidráulica). En cuanto a la curva de conductancia estomática, se posicionó sobre ella el parámetro de gs_{50} , entendido como el potencial hídrico indicativo de cierre estomático (Dayer et al., 2020) y el parámetro de Ψ_{tlp} , entendido como el potencial hídrico en el cual el potencial de turgencia es 0, para obtener un gráfico con tres segmentos demarcados: (1) $gs_{50} - \Psi_{tlp}$ (2) $\Psi_{tlp} - \Psi_{50}$ (3) $\Psi_{50} - \Psi_{88}$.

- Análisis estadístico:

El análisis estadístico y procesamiento de los datos fue generado mediante el uso del software JMP 16 (JMP 16 TRIAL), con el que también se realizó la eliminación de datos fuera de tipo y la transformación de datos (para esto se utilizó la herramienta Box Cox y una transformación de datos de raíz cuadrada). La elaboración de la representación gráfica de los datos fue desarrollada mediante el uso del software Sigmaplot 11.0, apoyado por la herramienta grafica de JMP 16.

Resultados

Variables Climáticas

Las distintas variables climáticas se comportaron de manera similar durante los tres días de medición en ambas variedades. Como era de esperarse el DPV se mantenía bajo durante las horas de la madrugada, aumentando progresivamente a partir de la mañana y disminuyendo durante la tarde, el momento de mayor DPV de todas las mediciones ocurrió entre las 14:00 y las 16:00 horas (Figura A1). El promedio de temperatura durante los días de medición fue de 18°C en la mañana (9:00 hrs.), 25,2°C al medio día (12:00 hrs) y 29,6°C durante la tarde (15:00 hrs.), la humedad relativa promedio durante los días de medición fue de 50% en la mañana (9:00 hrs.), 37,8% durante el medio día (12:00 hrs.) y 29,4% durante la tarde (15:00 hrs.) y el DPV promedio de los días de medición fue de 1,04 kPa durante la mañana (9:00 hrs.), 2,02 kPa al medio día (12:00 hrs.) y 2,95 durante la tarde (15:00 hrs.). No hubo precipitaciones durante las fechas de mediciones que pudieran interferir los resultados. La información en detalle se encuentra en la Figura A1 de los anexos.

Mediciones de Potencial Hídrico

- Diferencias entre tratamientos dentro de cada variedad:

En el caso de la variedad de *Vitis vinifera* Sauvignon blanc, la primera medición se realizó el día 3 de enero de 2022, aproximadamente dos semanas posterior al establecimiento de los tratamientos de estrés hídrico y carga frutal. En esta primera fecha se manifestaron efectos significativos en la medición de prealba (Ψ_{Pa}) y potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_{SWP}) producidos por el factor riego, donde los potenciales hídricos más negativos, como era de esperarse, se manifestaron en las mediciones de Ψ_{SWP} para los tratamientos de R0 y R50 (Tabla 2a). Para la segunda fecha de medición, realizada el día 11 de enero de 2022, aproximadamente tres semanas posterior a la imposición de los tratamientos, se manifestaron efectos significativos producidos por el factor riego en las mediciones de Ψ_{SWP} y potencial hídrico de hoja a mediodía (Ψ_{LWP}), y efectos significativos tanto del factor riego como carga en la medición de Ψ_{Pa} , observándose los valores de potencial hídrico más negativos nuevamente en los tratamientos de R0 y R50 (en las tres mediciones) y de C100 en el caso de Ψ_{Pa} .

Finalmente, en la medición del día 01 de febrero de 2022, aproximadamente seis semanas posterior a la imposición de los tratamientos, se manifestó un efecto significativo en la medición de Ψ_{Pa} y Ψ_{LWP} producidos por el factor riego y en la medición de Ψ_{SWP} producidos tanto por el factor riego como el factor carga, observándose los valores más negativos de potencial hídrico para el tratamientos C100 (en las tres mediciones) y R50 en el caso de Ψ_{SWP} . La información en detalle se encuentra en la Tabla 2a.

En el caso de la variedad de *Vitis vinifera* Chardonnay, la primera medición se realizó el día 04 de enero de 2022, aproximadamente dos semanas posterior al establecimiento de los tratamientos de estrés hídrico y carga frutal. En esta primera fecha se manifestaron efectos significativos en la medición de Ψ_{Pa} producidos por el factor carga, en tanto para la medición de Ψ_{SWP} no hubo efecto significativo, los valores de potencial hídrico más negativos los presentó el tratamiento C100 en el caso de Ψ_{Pa} y, aunque el efecto del factor riego no fue significativo, ambas mediciones exhibieron potenciales más negativos para el tratamiento R0 y R50. Para la segunda fecha de medición, realizada el día 12 de enero de 2022, aproximadamente tres semanas posterior a la imposición de los tratamientos, se manifestaron efectos significativos producidos por el factor carga en la medición de Ψ_{Pa} y un efecto significativo producido por el factor riego en las mediciones de Ψ_{SWP} y Ψ_{LWP} , donde los potenciales hídricos más negativos fueron nuevamente los tratamiento R0 y R50, y C100 para el caso de Ψ_{Pa} . Finalmente, en la medición del día 31 de enero de 2022, aproximadamente seis semanas posterior a la imposición de los tratamientos, se manifestó un efecto significativo en la medición de Ψ_{SWP} producido por el factor carga y un efecto significativo producido por el factor riego en la medición de Ψ_{LWP} , sin embargo la medición de Ψ_{Pa} no presentó efecto significativo. Los potenciales hídricos más negativos los presentaron los tratamientos R0 y R50 para Ψ_{LWP} (también en Ψ_{SWP} , aunque no de forma significativa) y C100 en el caso de Ψ_{SWP} . La información en detalle se encuentra en la Tabla 2b.

Tabla 2a: Media y error estándar de los potenciales hídricos de prealba, potencial hídrico de tallo a medio día (MD SWP) y potencial hídrico de hoja a medio día (MD LWP) en megapascales (Mpa) para los tratamientos correspondientes a la variedad Sauvignon blanc registrados los días 03/01/2022, 11/01/2022 y 01/02/2022. Valores acompañados de letras diferentes son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Potencial Hidrico - cv. Sauvignon Blanc									
Medicion	Prealba (Mpa)	Std Err (Prealba)	Ψ SWP (Mpa)	Std Err (Ψ SWP)	Ψ LWP (Mpa)	Std Err (Ψ LWP)			
Riego									
	R100	-0,275	A	0,0267	-0,781	A	0,0266	No data	No data
	R50	-0,4	B	0,0258	-0,96	B	0,0371	No data	No data
	R0	-0,437	B	0,0497	-0,95	AB	0,0443	No data	No data
Carga									
03-01-2022	C100	-0,396		0,0337	-0,915		0,0346	No data	No data
	C0	-0,35		0,0325	-0,888		0,04	No data	No data
Significancia (Pr>F)									
	Riego	0,016	*		0,034	*		No data	No data
	Carga	0,308			0,512			No data	No data
	Riego x Carga	0,879			0,955			No data	No data
Riego									
	R100	-0,143	A	0,0113	-0,682	A	0,0232	-0,819	A
	R50	-0,26	B	0,0166	-1,056	B	0,0765	-1,132	AB
	R0	-0,241	B	0,02	-1,18	B	0,0889	-1,463	B
Carga									
11-01-2022	C100	-0,23	A	0,0213	-0,972		0,0928	-1,156	0,1167
	C0	-0,19	B	0,0208	-0,916		0,0823	-1,056	0,1176
Significancia (Pr>F)									
	Riego	0,0017	*		0,0046	*		0,0393	*
	Carga	0,0095	*		0,2312			0,1026	
	Riego x Carga	0,808			0,3044			0,6397	
Riego									
	R100	-0,203		0,0202	-0,612	A	0,0253	-0,753	0,0325
	R50	-0,249		0,0269	-0,964	B	0,0861	-0,97	0,0642
	R0	-0,227		0,019	-0,933	AB	0,1072	-0,895	0,1168
Carga									
01-02-2022	C100	-0,272	A	0,0168	-0,977	A	0,0869	-1,018	A
	C0	-0,184	B	0,0124	-0,715	B	0,0481	-0,752	B
Significancia (Pr>F)									
	Riego	0,1294			0,0207	*		0,1437	
	Carga	0,0018	*		0,0008	*		0,0001	*
	Riego x Carga	0,099			0,1317			0,1362	

Tabla 2b: Media de los cuadrados medios mínimos de los potenciales hídricos de prealba, potencial hídrico de tallo a medio día (MD SWP) y potencial hídrico de hoja a medio día (MD LWP) en megapascales (Mpa) para los tratamientos correspondientes a la variedad Chardonnay registrados los días 04/01/2022, 12/01/2022 y 31/01/2022. Valores acompañados de letras diferentes son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Potencial Hídrico - cv. Chardonnay								
Medicion	Prealba (Mpa)	Std Err (Prealba)	Ψ SWP (Mpa)	Std Err (Ψ SWP)	Ψ LWP (Mpa)	Std Err (Ψ LWP)		
Riego								
	R100	-0,312	0,0205	-0,75	0,0633	No data		No data
	R50	-0,415	0,0387	-0,92	0,0856	No data		No data
	R0	-0,425	0,04	-1,081	0,0388	No data		No data
Carga								
04-01-2022	C100	-0,423	A 0,0269	-0,934	0,0656	No data		No data
	C0	-0,35	B 0,0325	-0,9	0,0684	No data		No data
Significancia (Pr>F)								
	Riego	0,1546		0,1214		No data		No data
	Carga	0,0271	*	0,4218		No data		No data
	Riego x Carga	0,8609		0,4411		No data		No data
Riego								
	R100	-0,238	0,0179	-0,674	A 0,0769	-0,989	A	0,0706
	R50	-0,335	0,0327	-0,997	B 0,0614	-1,284	B	0,0748
	R0	-0,297	0,0419	-1,269	B 0,0489	-1,48	B	0,0486
Carga								
12-01-2022	C100	-0,33	A 0,0266	-0,99	0,0915	-1,275		0,0721
	C0	-0,256	B 0,0263	-0,964	0,0764	-1,23		0,0829
Significancia (Pr>F)								
	Riego	0,273		0,0019	*	0,0038	*	
	Carga	0,0028	*	0,5176		0,5357		
	Riego x Carga	0,7107		0,6933		0,5056		
Riego								
	R100	-0,404	0,0504	-0,748	0,054	-0,927	A	0,048
	R50	-0,304	0,0388	-0,889	0,0722	-1,026	AB	0,0715
	R0	-0,345	0,0385	-0,972	0,0572	-1,148	B	0,0516
Carga								
31-01-2022	C100	-0,36	0,0297	-0,959	A 0,0631	-1,111		0,0548
	C0	-0,32	0,0407	-0,783	B 0,0357	-0,952		0,046
Significancia (Pr>F)								
	Riego	0,4239		0,0729		0,0346	*	
	Carga	0,3515		0,0179	*	0,0519		
	Riego x Carga	0,7322		0,1908		0,7314		

- Diferencias entre variedades:

Ambas variedades presentaron un comportamiento contrastante en relación con la mantención de sus potenciales hídricos, exhibiendo diferencias significativas ($p>0,05$) tanto para las mediciones de Ψ Pa como para las mediciones de Ψ LWP, donde la variedad Chardonnay presentó valores más negativos de potencial hídrico a lo largo de las mediciones realizadas entre enero y febrero de 2022. Para el caso de las mediciones de Ψ SWP no se manifestaron diferencias estadísticamente significativas. La información en detalle se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3: Diferencias de potencial hídrico entre las variedades Chardonnay y Sauvignon blanc para las mediciones de prealba (ΨPa), potencial hídrico de tallo a medio día (ΨSWP) y potencial hídrico de hoja a medio día (ΨLWP) entre la fechas 03 de enero de 2022 y 01 de febrero de 2022.

Potencial Hidrico - Diferencia entre variedades								
Variedad	Prealba (Mpa)	Std Err (Prealba)	MD SWP (Mpa)	Std Err (ΨSWP)	MD LWP (Mpa)	Std Err (ΨLWP)		
Ch	-0,3427	A	0,0134	-0,9236	0,0283	-1,1436	A	0,0366
Sb	-0,2756	B	0,0136	-0,8936	0,0277	-0,9808	B	0,0466
Significancia (Pr>F)		0,0002 *		0,4523		0,0073 *		

Grado de isohidricidad

Los resultados del grado de isohidricidad de cada variedad se generaron a partir de dos de las tres fechas de medición de potencial hídrico realizadas en la temporada, esto debido a que el parámetro de potencial hídrico de hoja de medio día (ΨLWP) no fue medido durante las mediciones del día 03 de enero de 2022 para la variedad Sauvignon blanc y 04 de enero de 2022 para la variedad Chardonnay.

En el caso de la variedad Chardonnay, la regresión lineal generada para relación entre ΨPa y ΨLWP arrojó, para la fecha 12 de enero de 2022 la función $\Psi LWP = -0,912456 + 1,1627375*\Psi Pa$ con una pendiente de 1,16 y para la fecha 31 de enero de 2022 la función $\Psi LWP = -1,063644 - 0,0994521*\Psi Pa$, con una pendiente de -0,09. Lo cual indica en el primer caso un comportamiento anisohídrico extremo y en el segundo caso dicha función resultó ser estadísticamente no significativa, la pendiente es cercana a cero indicando un comportamiento principalmente isohídrico. En cuanto a la tendencia general de la variedad Chardonnay a lo largo de las dos mediciones, la función arrojada fue $\Psi LWP = -1,101173 + 0,1318178*\Psi Pa$, con una pendiente de 0,13 lo que indicaría un comportamiento parcialmente isohídrico.

Para la variedad Sauvignon blanc, la regresión lineal generada para relación entre ΨPa y ΨLWP arrojó, para la fecha 11 de enero de 2022 la función $\Psi LWP = -0,695534 + 1,9584091*\Psi Pa$ con una pendiente de 1,96 y para la fecha 01 de febrero de 2022 la función $\Psi LWP = -0,377945 + 2,1921727*\Psi Pa$ con una pendiente de 2,19, lo que indicaría en ambos casos un comportamiento anisohídrico extremo. Para el caso de la tendencia general de la variedad Sauvignon blanc a lo largo de las dos mediciones, la función arrojada fue $\Psi LWP = -0,578364 + 1,8245652*\Psi Pa$ con una pendiente de 1,82,

lo cual nuevamente indica un comportamiento anisohídrico extremo. La información en detalle para ambas variedades se encuentra en la Tabla 4.

Tabla 4: Grado de isohidricidad para las variedades Chardonnay y Sauvignon blanc calculado entre las fechas 11 de enero de 2022 y 01 de febrero de 2022 (tendencia para cada una de las fechas y tendencia general). El recuadro rojo indica un valor estadísticamente no significativo ($p > 0,05$).

CH	12/01/22 Slp	12/01/22 F(x)	31/01/22 Slp	31/01/22 F(x)
Tendencia CH	1,1627375	$\Psi_{LWP} = -0,912456 + 1,1627375 * \Psi_{Pa}$	-0,0994521	$\Psi_{LWP} = -1,063644 - 0,0994521 * \Psi_{Pa}$
Tendencia general CH (sin separar por fecha): $\Psi_{LWP} = -1,101173 + 0,1318178 * \Psi_{Pa}$				
SB	11/01/22 1 Slp	11/01/22 F(x)	01/02/22 2 Slp	01/02/22 2 F(x)
Tendencia SB	1,9584091	$\Psi_{LWP} = -0,695534 + 1,9584091 * \Psi_{Pa}$	2,1921727	$\Psi_{LWP} = -0,377945 + 2,1921727 * \Psi_{Pa}$
Tendencia general SB (sin separar por fecha): $\Psi_{LWP} = -0,578364 + 1,8245652 * \Psi_{Pa}$				

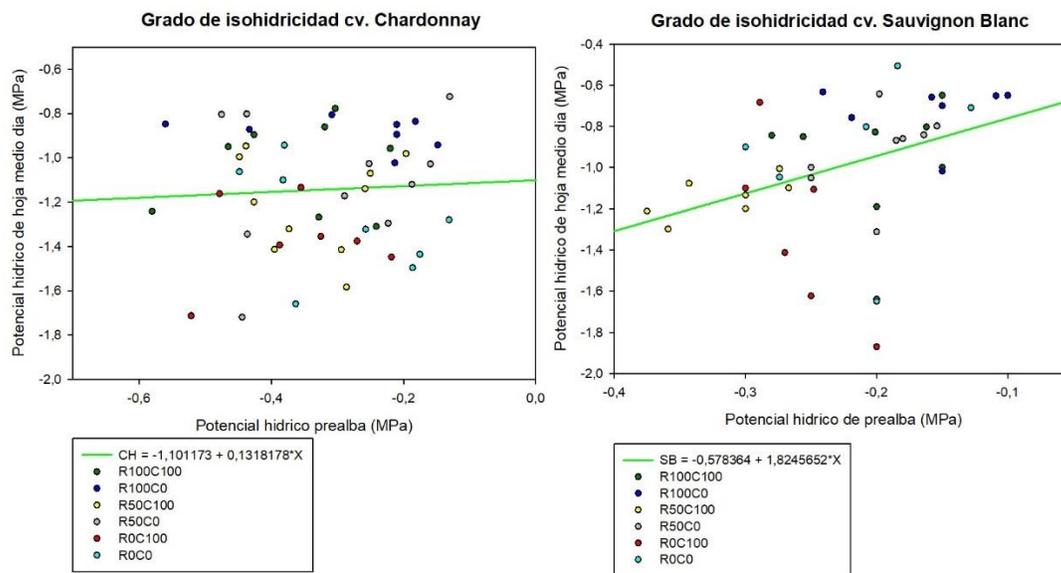


Figura 6: Tendencia general del grado de isohidricidad para las variedades de *Vitis vinífera* Chardonnay (izquierda) y Sauvignon blanc (derecha) calculado a partir de los datos obtenidos en las mediciones 12 y 31 de enero de 2022 para Chardonnay y 11 de enero y 01 de febrero para la variedad Sauvignon blanc, ambas regresiones son estadísticamente significativas con un $p < 0,05$.

Intercambio gaseoso

Se generó una curva de respuesta estomática para cada variedad en función de todas las mediciones de conductancia estomática ($gs - mol H_2O m^{-2} s^{-1}$) efectuadas durante la temporada (entre el 11 de enero y el 15 de febrero de 2022), a partir de las cuales se

determinó el gs50 y gs90 para cada variedad, es decir, el potencial hídrico en el cual se genera la reducción del 50 y 90% de la conductancia estomática respectivamente.

En el caso de la variedad Sauvignon blanc, el gs50 se generó a los -0,95 MPa de potencial hídrico y para la variedad Chardonnay, este se generó a los -0,9 MPa de potencial hídrico, manifestándose una diferencia de 0,05 MPa entre ambas magnitudes. Para el parámetro gs90, en la variedad Sauvignon blanc se generó a los -2,05 MPa y para la variedad Chardonnay, este se generó a los -1,69 MPa, manifestándose una diferencia de 0,36 MPa. La información anterior se puede visualizar en las Figuras 7 y 8.

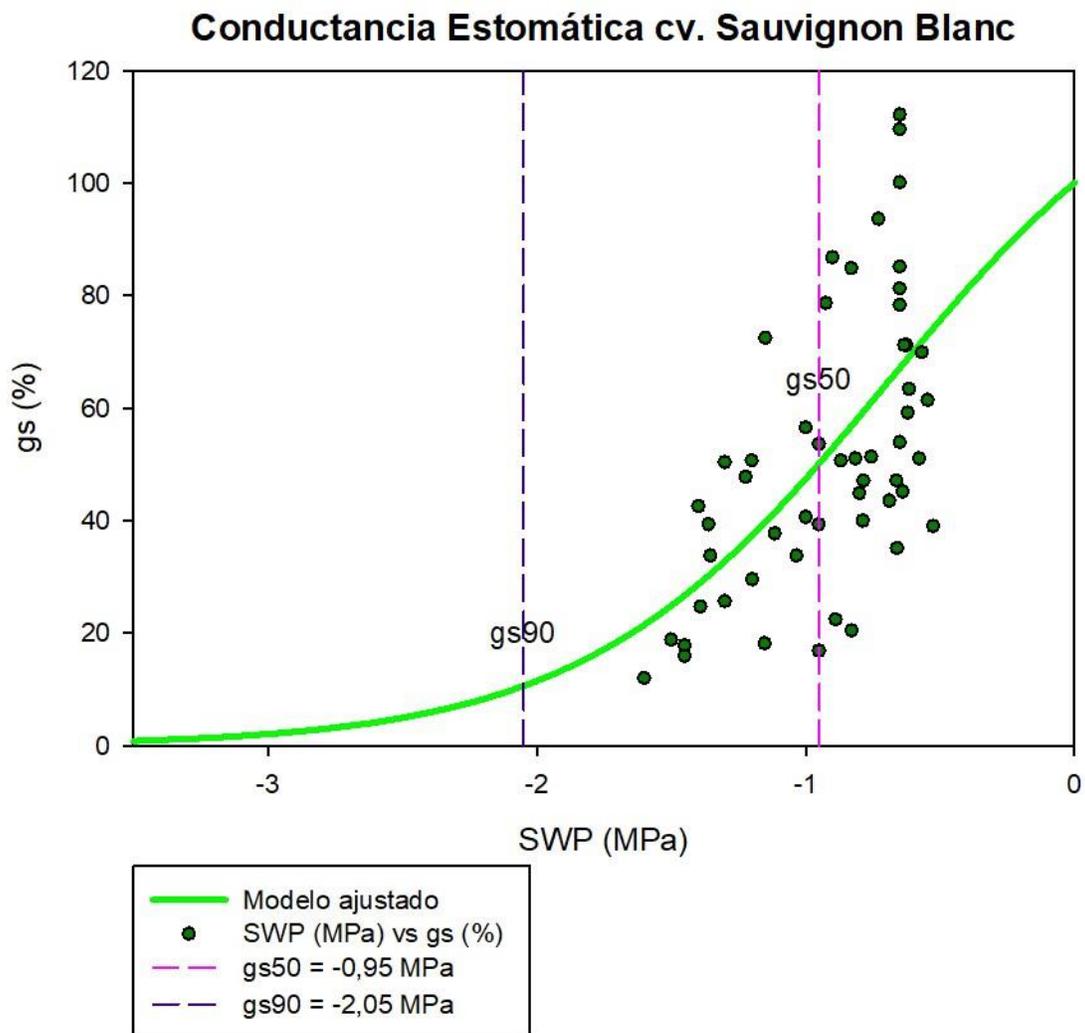


Figura 7: Curva de respuesta estomática generada a partir de la relación entre la conductancia estomática relativa (gs) y el potencial hídrico de tallo (SWP) en megapascales (MPa) para la variedad Sauvignon blanc.

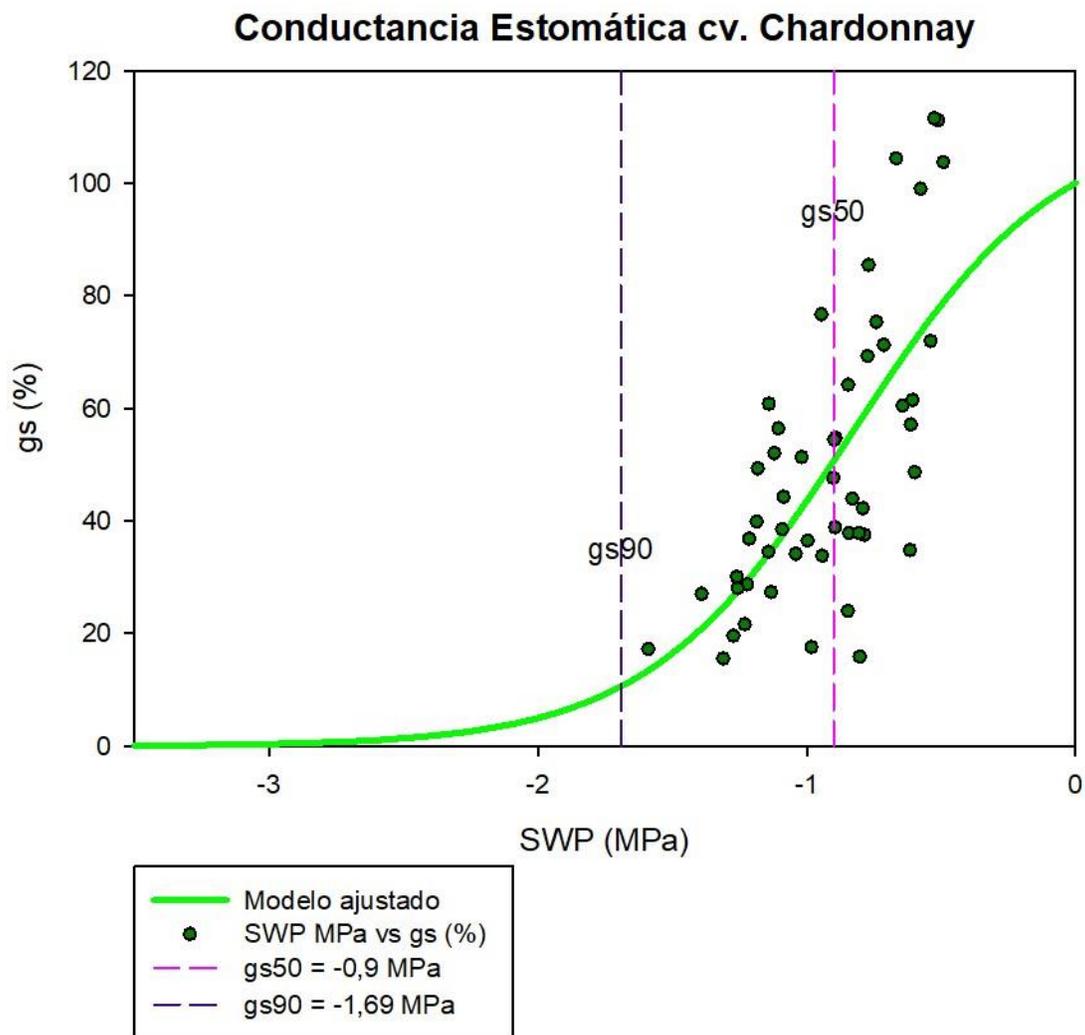


Figura 8: Curva de respuesta estomática generada a partir de la relación entre la conductancia estomática relativa (gs) y el potencial hídrico de tallo (SWP) en megapascales (MPa) para la variedad Chardonnay.

Punto de pérdida de turgor (Ψ_{tlp})

- Diferencias entre tratamientos dentro de cada variedad:

En el caso de la variedad Sauvignon blanc, el punto de pérdida de turgor (Ψ_{tlp}) no presentó un efecto estadísticamente significativo producido por los factores de riego y carga frutal o la interacción entre ambos factores. Teniendo esto en cuenta, el potencial hídrico de punto de pérdida de turgor más negativo se encontró en el nivel R50 del factor riego con -1,77 MPa y en el nivel C0 del factor carga con -1,68 MPa.

En el caso de la variedad Chardonnay, el punto de pérdida de turgor (Ψ_{tlp}) tampoco presentó un efecto estadísticamente significativo producido por los factores de riego y carga frutal o la interacción entre ambos factores. Nuevamente, teniendo esto en cuenta, el potencial hídrico de punto de pérdida de turgor más negativo se encontró en el nivel R100 del factor riego con -1,93 MPa y en el nivel C100 del factor carga con -1,81 MPa.

- Diferencias entre variedades:

Al evaluar las diferencias entre variedades en el punto de pérdida de turgencia (Ψ_{tlp}), se encontró que es un parámetro que no presenta diferencias estadísticamente significativas, sin embargo y teniendo esto en cuenta, se puede apreciar que el punto de pérdida de turgencia en la variedad Chardonnay tiende a una media más negativa de -1,78 MPa y la variedad Sauvignon blanc a un Ψ_{tlp} más alto de -1,66 MPa, con una diferencia de 0,12 MPa. La información en detalle se encuentra en la Tabla 5.

Tabla 5: Media y error estándar de los potenciales hídricos de pérdida de turgencia (Ψ_{tlp}) en megapascales (MPa) correspondientes a los tratamientos en la variedad Sauvignon blanc (lado izquierdo) y a la variedad Chardonnay (lado derecho). Diferencias de potencial hídrico de pérdida de turgencia (Ψ_{tlp}) entre las variedades Chardonnay y Sauvignon blanc en megapascales (MPa) (parte inferior).

Ψ_{tlp} - Diferencias entre tratamientos dentro de cada variedad					
Variedad	Ψ_{tlp} (Mpa)	Std Err	Variedad	Ψ_{tlp} (Mpa)	Std Err
Riego			Riego		
R100	-1,55	0,1752	R100	-1,93	0,148
R50	-1,77	0,0745	R50	-1,74	0,084
R0	-1,61	0,1005	R0	-1,71	0,1619
Carga			Carga		
SB C100	-1,63	0,1326	CH C100	-1,81	0,113
CO	-1,68	0,0398	CO	-1,74	0,1081
Significancia (Pr>F)			Significancia (Pr>F)		
Riego	0,5088		Riego	0,7076	
Carga	0,9946		Carga	0,4886	
Riego x Carga	0,44		Riego x Carga	0,4891	
Ψ_{tlp} - Diferencia entre variedades					
		Prealba (Mpa)	Std Err		
Variedad					
Ch	-1,78	0,0784			
Sb	-1,66	0,068			
Significancia (Pr>F)					
		0,2305			

Curvas de vulnerabilidad hidráulica

Las curvas de vulnerabilidad hidráulica elaboradas mediante el método neumático se generaron inicialmente para cada uno de los tratamientos de restricción hídrica y carga frutal, sin embargo debido a diversas complicaciones en la construcción de los aparatos neumatrón, a la metodología asociada a estos aparatos y al reducido tiempo con el que se disponía para realizar las mediciones, es que se decidió acotar la mediciones para elaborar curvas de vulnerabilidad hidráulica para los tratamientos R100C0 de cada una de las variedades, es decir, aquellos tratamientos que se encontraban bajo menores condiciones de estrés con la intención de evaluar el comportamiento de cada variedad.

En el caso de la variedad Sauvignon blanc, se logró obtener tres repeticiones para la curva de vulnerabilidad hidráulica correspondiente al tratamiento R100C0. Las mediciones se realizaron entre el día 10 y 28 de marzo de 2022, una de estas tres curvas (elaborada el día 17) obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 1 con respecto al

modelo propuesto por Pereira et al. (2020) y Trabi et al. (2021), posicionándose como la curva mejor desarrollada de las tres. De esta curva se desprende un P50 correspondiente al 50% de pérdida de conductividad hidráulica de -1,67 MPa y un P88 correspondiente al 88% de pérdida de conductividad hidráulica de -2,38 MPa (Figura 9). A partir nuevamente de la medición realizada el 17 de marzo se obtuvo una segunda repetición exitosa con un P50 de -1,60 MPa y un P88 de -1,94 MPa y finalmente la tercera repetición exitosa se realizó el día 28 de marzo, a partir de cuya curva se obtuvo un P50 de -1,44 MPa y un P88 de -1,66 MPa.

En el caso de la variedad Chardonnay, las mediciones también se realizaron entre los días 10 y 18 de marzo, sin embargo solo se logró obtener una repetición exitosa. Dicha curva se elaboró mediante mediciones desarrolladas el día 10 de marzo y de ella se obtuvo un P50 de -2,09 MPa y un P88 de -2,34 MPa (Figura 9).

Para generar una curva representativa del comportamiento de la variedad, se utilizaron los parámetros de P50 y la pendiente de la curva modelo para elaborar una curva media según la siguiente ecuación:

$$PGD = \frac{100}{1 + e^{\left(\left(\frac{S}{25}\right)(\Psi x - \Psi_{50})\right)}}$$

En el caso de la variedad Sauvignon blanc, el P50 obtenido fue de -1,57 MPa y el P88 fue de -1,91 MPa. Para el caso de la variedad Chardonnay, como se mencionó antes, solo se generó una curva exitosa, por lo cual esta fue utilizada para representar el comportamiento de la variedad (Figura 10). Según lo anterior, el P50 de la variedad Chardonnay es 0,52 MPa más negativo que el de Sauvignon blanc, mientras que el P88 es también 0,43 MPa más negativo que el de Sauvignon blanc indicando, a priori, una mayor vulnerabilidad al fallo hidráulico de la variedad Sauvignon blanc.

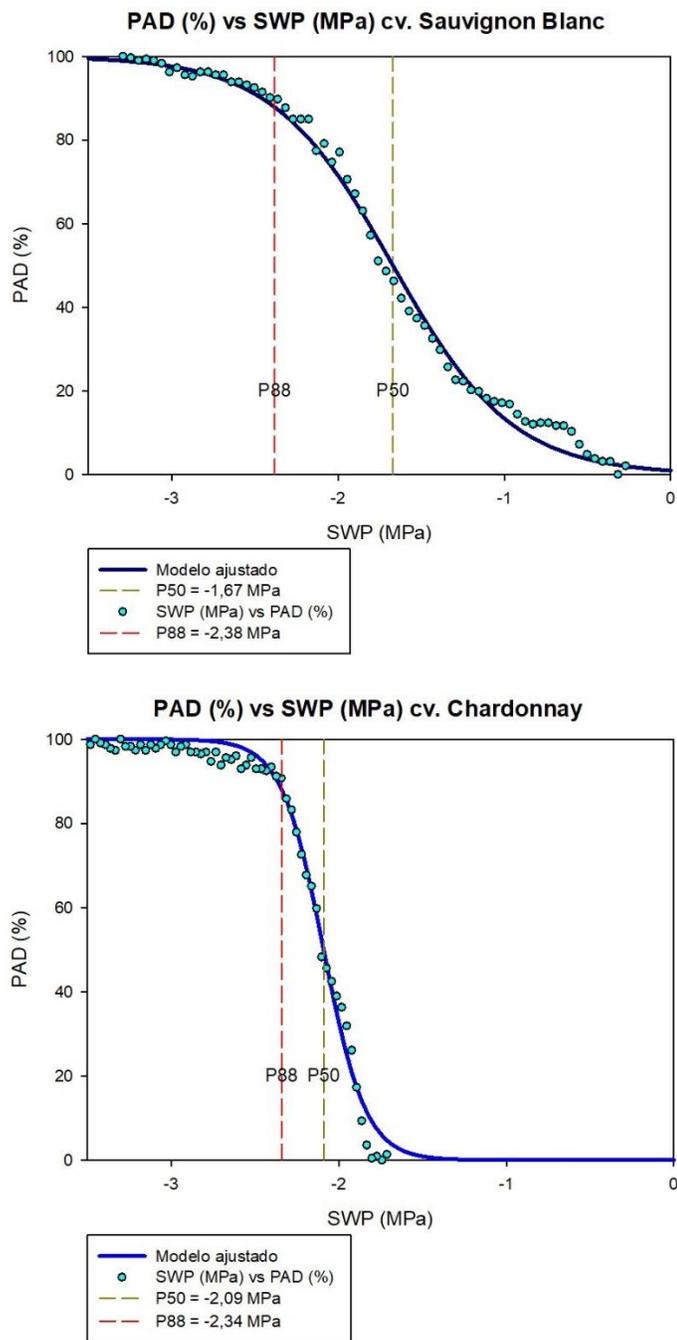


Figura 9: Porcentaje de aire descargado (PAD) en función del potencial hídrico de tallo (SWP), potencial hídrico de pérdida de 50% de conductividad hidráulica (P55) y potencial hídrico de pérdida de 88% de conductividad hidráulica (P88) en megapascales correspondiente a la medición realizada el día 17/03/2022 y 10/03/2022 para la variedad Sauvignon blanc (Parte superior) y Chardonnay (Parte inferior), respectivamente.

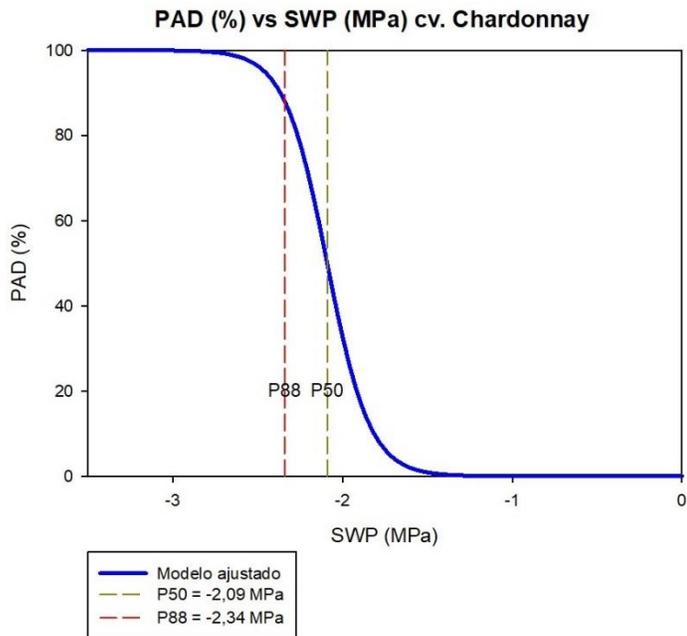
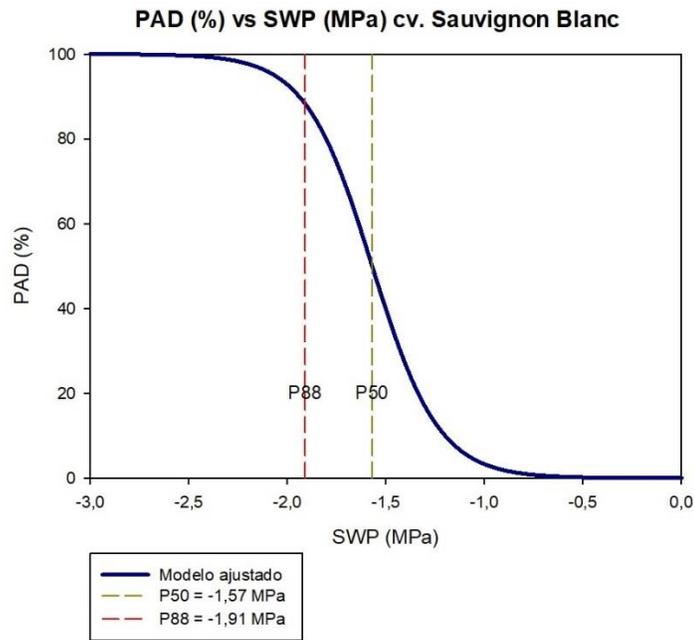


Figura 10: Porcentaje de aire descargado (PAD) en función del potencial hídrico de tallo (SWP), potencial hídrico de pérdida de 50% de conductividad hidráulica (P55) y potencial hídrico de pérdida de 88% de conductividad hidráulica (P88) en megapascales correspondiente a la media de la variedad Sauvignon blanc (parte superior) y Chardonnay (parte inferior).

Margen de seguridad hidráulico y sus segmentos

El margen de seguridad hidráulico (MSH) corresponde a la diferencia entre el potencial hídrico en cierre estomático (gs50) y el potencial hídrico en el que se produce un 50% de pérdida de conductividad hidráulica (P50). Para la variedad Sauvignon blanc, este MSH está comprendido entre los -0,95 MPa (gs50) y los -1,57 MPa (P50), lo cual implica un rango de 0,62 MPa (Figura 11). Para el caso de la variedad Chardonnay, el MSH está comprendido entre los -0,90 MPa (gs50) y los -2,09 MPa (P50), lo cual implica un rango de 1,19 MPa (Figura 12).

En cuanto a los segmentos propuestos, el primer segmento está comprendido entre el gs50 y el potencial hídrico de pérdida de turgencia (Ψ_{tlp}), el cual en la variedad Sauvignon blanc se enmarca entre los -0,95 MPa (gs50) y -1,66 MPa (Ψ_{tlp}), lo cual implica un rango de 0,71 MPa, sin embargo en este caso el Ψ_{tlp} ocurre a un potencial hídrico más negativo que P50 (Figura 11). Para la variedad Chardonnay, se enmarca entre los -0,9 MPa y los -1,78 MPa (Ψ_{tlp}), lo cual implica un rango de 0,88 MPa, estando esta vez el Ψ_{tlp} en un potencial hídrico menos negativo que P50 (Figura 12).

El segundo segmento está comprendido entre el Ψ_{tlp} y el P50, el cual en la variedad Sauvignon blanc se enmarca entre los -1,66 MPa (Ψ_{tlp}) y los -1,57 MPa (P50), estando en este caso el P50 previo (menos negativo) que el (Ψ_{tlp}), por lo que se representara este rango como una magnitud negativa de -0,09 MPa (Figura 11). Para la variedad Chardonnay, se enmarca entre los -1,78 MPa (Ψ_{tlp}) y los -2,09 MPa (P50), lo cual implica un rango de 0,31 MPa (Figura 12).

El tercer y último segmento está comprendido entre el P50 y el potencial hídrico en el que se produce un 88% de pérdida de conductividad hidráulica (P88), el cual en la variedad Sauvignon blanc se enmarca entre los -1,57 MPa (P50) y los -1,91 MPa (P88), lo cual implica un rango de 0,34 MPa (Figura 11). Para la variedad Chardonnay, este segmento se enmarca entre los -2,09 MPa (P50) y los -2,34 MPa (P88), lo cual implica un rango de 0,25 MPa (Figura 12).

La información resumida se encuentra en la tabla A1 adjunta en los anexos.

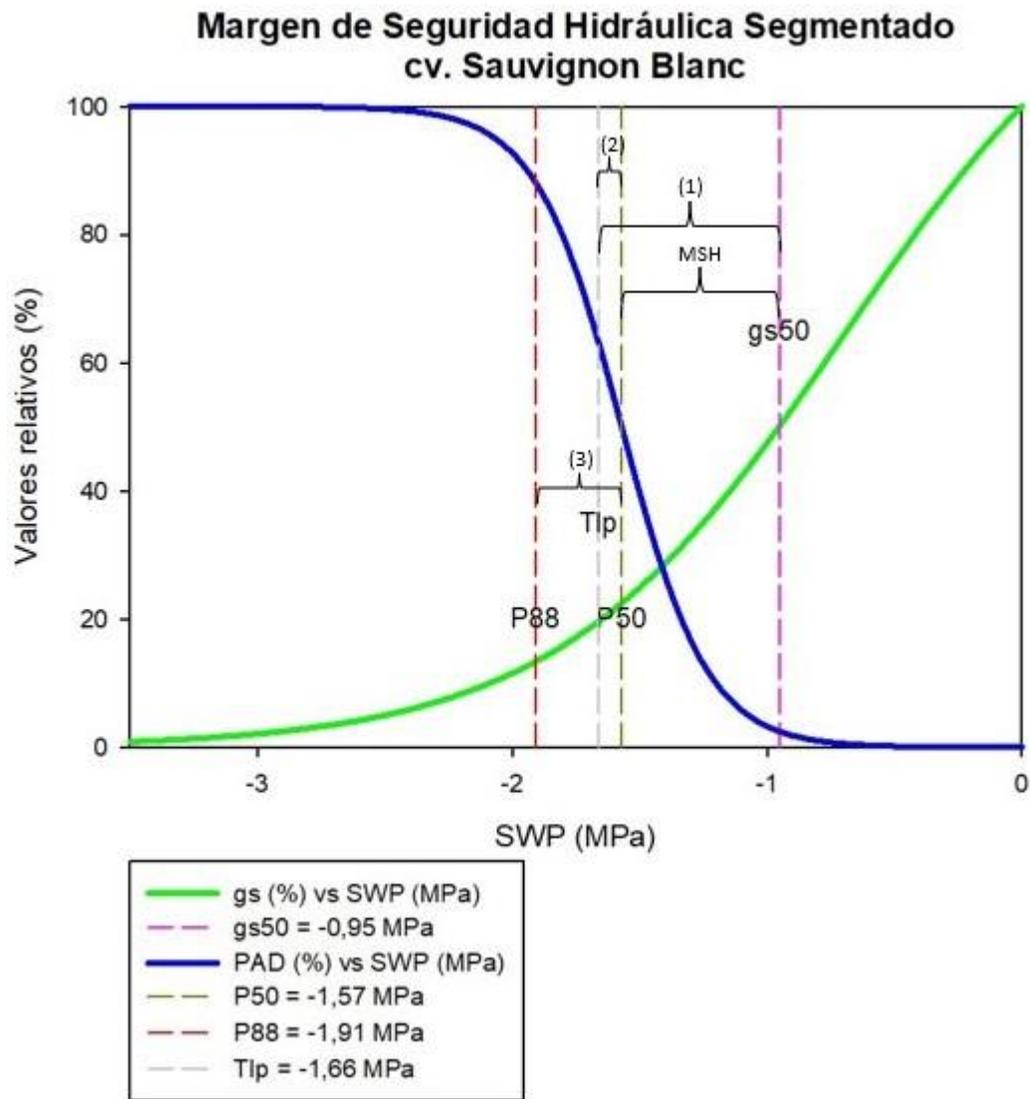


Figura 11: Margen de Seguridad Hidráulica (MSH) y los segmentos propuestos para la variedad Sauvignon blanc: (1) $gs50 - \Psi_{tlp}$ (2) $\Psi_{tlp} - P50$ (3) $P50 - P88$.

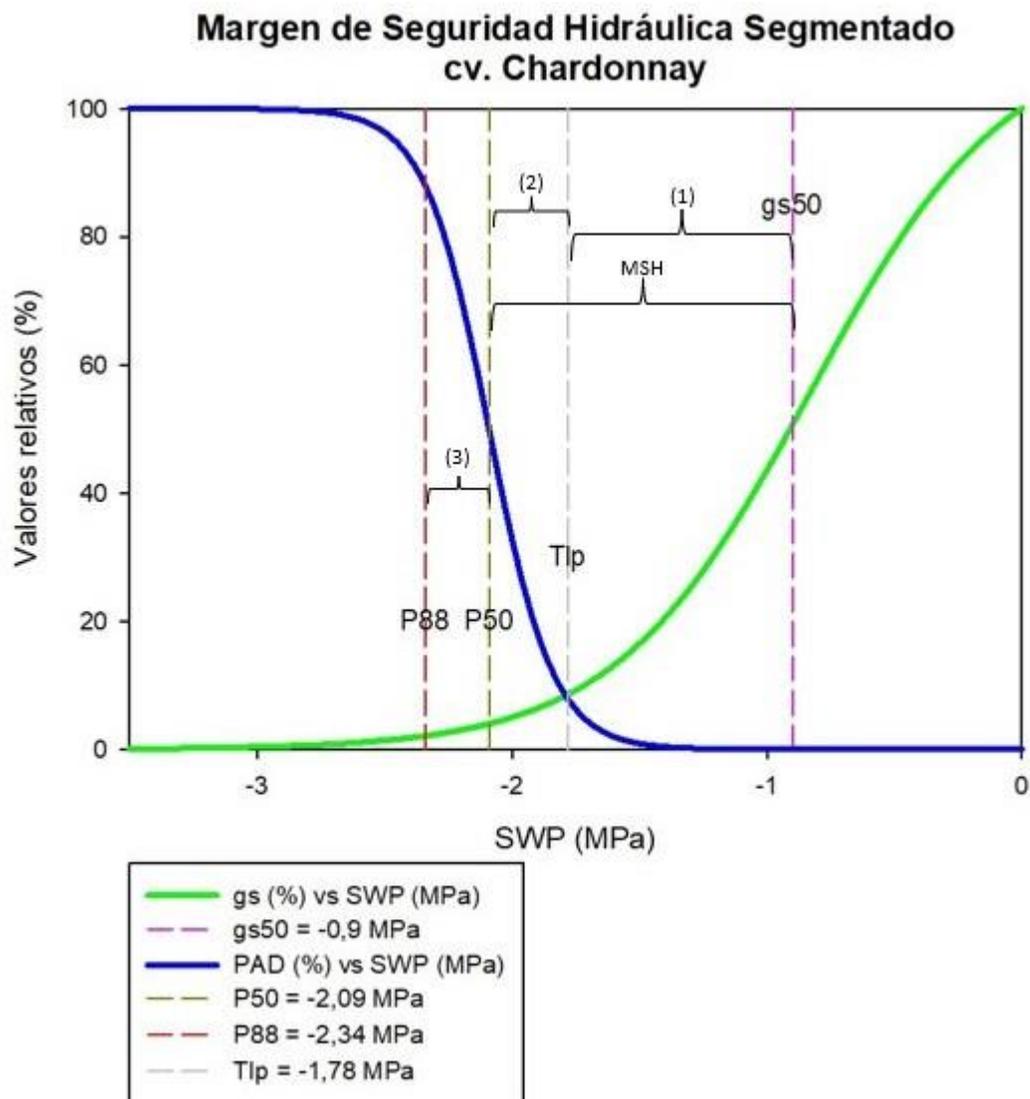


Figura 12: Margen de Seguridad Hidráulica (MSH) y los segmentos propuestos para la variedad Chardonnay: (1) gs50 – Ψ_{tip} (2) Ψ_{tip} - P50 (3) P50 - P88.

Discusión

Potencial hídrico

El potencial hídrico resulta ser un parámetro sumamente práctico al momento de evaluar y caracterizar el comportamiento de las especies frutales ante condiciones medioambientales cambiantes, lo cual es especialmente importante bajo un contexto de sequía mundial y cambio climático ampliamente reconocido, debido a que es un parámetro ecofisiológico de fácil medición en el terreno, ampliamente estudiado y uno de los más frecuentemente utilizados (Martínez-Vilalta et al., 2014).

El objetivo principal de la medición del potencial hídrico en esta investigación era comprobar o respaldar un comportamiento contrastante entre las variedades de *Vitis vinífera* Sauvignon blanc y Chardonnay y además evaluar este comportamiento contrastante dentro de los tratamientos de restricción hídrica y carga frutal en cada variedad.

Si nos enfocamos en las mediciones efectuadas en la variedad Sauvignon blanc (Tabla 2a), se puede ver que el factor que generó una mayor cantidad de diferencias estadísticamente significativas tanto en la primera como segunda fecha fue el riego. En ambos casos los tratamientos que exhibieron potenciales hídricos más negativos fueron R0 y R50 para los tres tipos de potencial hídrico medidos (Ψ_{Pa} , Ψ_{SWP} y Ψ_{LWP}), en el caso de la tercera fecha de medición, el factor riego genera diferencias estadísticamente significativas solo en la medición de Ψ_{SWP} . Sin embargo, en los tres tipos de potencial se manifiesta la misma tendencia, en donde el tratamiento R0 y R50 presentan potenciales hídricos más negativos. Esto es de esperarse, en función del aumento en la resistencia que impone el suelo al flujo de agua debido a su pérdida gradual de contenido de agua y considerando que el potencial hídrico de la atmósfera es siempre más negativo que el potencial de la cavidad subestomática, lo que ocurre es que el flujo de agua desde las hojas hacia la atmosfera será mayor que el flujo de agua desde el suelo a la planta, por ende a medida que este proceso avanza, la planta se irá deshidratando rápidamente y la tensión a la que se someterá la columna de agua presente en el xilema se irá haciendo cada vez mayor, tendiendo aquellos tratamientos de mayor restricción hídrica a potenciales hídricos más negativos (UBA, n.d.).

En cuanto al factor carga, éste género una mayor cantidad de diferencias estadísticamente significativas solo en la tercera fecha de medición, siendo el nivel C100 el que exhibía potenciales hídricos más negativos, sin embargo esta misma tendencia se repitió en todas las fechas de medición para los tres tipos de potencial hídrico evaluados. Si se considera la variabilidad estacional del margen de seguridad hidráulico (MSH) descrito por Sorek et al. (2021), donde el potencial hídrico es un parámetro directamente relacionado, tiene sentido que el riego pierda la dominancia en cuanto al factor que expresa una mayor cantidad de diferencias estadísticamente significativas en la última fecha, debido a factores como el tamaño de los vasos xilemáticos o el grosor de la membrana de los pit, Sorek et al. (2021) concluyen que la vid puede modificar sus rasgos hidráulicos a lo largo de una temporada de crecimiento para permitir un menor potencial hídrico del xilema, por lo que el factor carga podría pasar a ser el responsable de una mayor cantidad de diferencias significativas que el riego en este punto. Con relación a la predominancia del nivel C100 en el factor carga para los potenciales hídricos más negativos, esto podría explicarse debido a que una mayor carga frutal implica un mayor requerimiento de fotoasimilados, para lo cual se requiere la absorción de carbono desde la atmósfera y su posterior asimilación. Esta demanda de carbono se suple mediante el intercambio gaseoso a nivel estomático, sin embargo, la pérdida de agua asociada a este proceso podría resultar ser nociva en condiciones de déficit del recurso hídrico y, según muestran los resultados, podría ser más prominente en condiciones de más carga frutal, ya que es sabido que por cada molécula de carbono absorbida por los estomas se pierden alrededor de 400 moléculas de agua (McElrone et al., 2013), generando una mayor tensión en la columna de agua del xilema en aquellas plantas con C100 que con C0, esto concuerda con los resultados presentados por Naor et al. (1997), donde la variedad Sauvignon blanc presenta una mayor conductancia estomática en condiciones de mayor carga frutal. Asimismo Kaneko et al. (2022) menciona que en especies frutales tales como manzanos, olivos, duraznos, paltos y vides el consumo de agua aumenta con el aumento de la carga frutal.

Para el caso de la variedad Chardonnay (Tabla 2b), el factor que presenta una mayor cantidad de diferencias estadísticamente significativas es también el riego, sin embargo estas diferencias son significativas solo en Ψ_{SWP} y Ψ_{LWP} de la primera fecha y Ψ_{LWP}

de la tercera fecha. Esta variedad, al igual que Sauvignon blanc, comparte la tendencia de presentar valores de potencial hídrico más negativo en los niveles R0 y R50 del factor riego. En cuanto al factor carga, este presenta diferencias significativas solo en Ψ_{Pa} de la primera y segunda fecha y Ψ_{SWP} de la tercera fecha. Al igual que Sauvignon blanc, también comparte la tendencia de potenciales hídricos más negativos en el nivel C100 de carga frutal. Una primera diferencia en la comparación de variedades sería que la variedad Chardonnay es levemente menos sensible a los tratamientos de riego deficitario y carga frutal que la variedad Sauvignon blanc.

Cabe destacar, que el tratamiento R0 y R50 no presentaron diferencias entre sí, lo cual puede explicarse debido a que el día 13 de enero de 2022, aproximadamente tres semanas y media posterior a la imposición de los tratamientos, se nos solicitó colocar goteros iguales a las líneas de riego usadas para el tratamiento R50 en las plantas R0, ya que la investigación se llevó a cabo en un huerto comercial, donde no se podía incurrir en el riesgo de que las plantas murieran por deshidratación.

Finalmente, las diferencias entre variedades (Tabla 3) permiten visualizar que la variedad Chardonnay exhibe potenciales hídricos más negativos que la variedad Sauvignon blanc durante la temporada. Estos resultados son opuestos a los reportados por Silva (2021), donde la variedad Sauvignon blanc presentó los potenciales más negativos, lo cual podría explicarse por el efecto de las lluvias presentes en la temporada de medición y periodos de riego fuera de la programación habitual durante la investigación reportados por Silva (2021). Sin embargo, los resultados de otra investigación realizada por Pérez (2020), son mayoritariamente concordantes con los de este trabajo.

Grado de isohidricidad, Intercambio gaseoso y punto de pérdida de turgencia

Si se analiza el grado de isohidricidad evaluado en este estudio (Tabla 4), se puede ver que la variedad Chardonnay presenta en la primera fecha de medición un comportamiento predominantemente anisohídrico extremo y para la segunda fecha presenta un comportamiento predominantemente isohídrico. Si se analiza el grado de isohidricidad de la variedad Sauvignon blanc, se puede ver que presenta un comportamiento anisohídrico extremo en ambas fechas de medición. Estos resultados no se corresponden con los presentados por Pérez (2020) y Silva (2021) quienes

reportan un comportamiento para ambas variedades que van de isohídrico a anisohídrico a medida que avanza la temporada. Cabe destacar que las mediciones realizadas en las investigaciones de Pérez (2020) y Silva (2021) para la elaboración del grado de isohidricidad fueron diferentes a las fechas en las que se realizó la medición en esta investigación. Así mismo, ambos autores reportan la existencia de inconsistencias en la utilización del parámetro de grado de isohidricidad para la determinación del comportamiento de las variedades desde el punto de vista de que distintas fechas de medición, etapa fenológica y condiciones edafoclimáticas pueden derivar en una clasificación iso/anisohídrica diferente, reportando Pérez (2020) también, que en condiciones de diferente carga frutal y reposición hídrica hubo plantas que no presentaron un comportamiento anisohídrico. Esta idea de que la iso/anisohidricidad suele ser inconsistente al momento de definir el comportamiento de una especie o variedad es también reportada por autores como Hartmann et al. (2021), Hochberg et al. (2018), Ratzmann et al. (2019) y Hugalde & Vila (2014) donde la dependencia de los factores asociados al concepto de iso/anisohidricidad con el medio ambiente tienden a generar resultados distintos dentro de las especies, los genotipos e incluso dentro de individuos.

Si comparamos ahora las tendencias generales durante la temporada de ambas variedades (Figura 6), se puede ver que para el caso de la variedad Chardonnay, se sigue un comportamiento que es “parcialmente” isohídrico. Por el contrario, la variedad Sauvignon blanc, presentó una tendencia general de comportamiento durante la temporada anisohídrico extremo. Estos resultados son concordantes si se comparan con los obtenidos por Silva (2021), donde evaluó las áreas de hidroescape definidas como el área en el cual la planta es capaz de sostener su asimilación de CO₂ a medida que el contenido de agua del suelo se reduce (Meinzer et al., 2016). Sus resultados indican que la variedad Sauvignon blanc presenta una mayor área de hidroescape ($0,9797 MPa^2$) que la variedad Chardonnay ($0,6235 MPa^2$), lo cual es indicativo de un comportamiento más anisohídrico para la variedad Sauvignon blanc. Investigaciones previas como Hugalde & Vila (2014) reportan un comportamiento mayoritariamente isohídrico también por la variedad Chardonnay, sin embargo otras investigaciones reportan un comportamiento más bien anisohídrico (Sade et al., 2012), lo que nuevamente recae en

la problemática derivada del uso del concepto de iso/anisohidricidad. En cuanto a la variedad Sauvignon blanc, tal como reportan investigaciones pasadas, no presenta una clasificación definida (Pérez, 2020; Silva Gutiérrez, 2021), sin embargo se le reconoce como una variedad con baja eficiencia de uso de agua y vigorosa (Lavoie-Lamoureux et al., 2017), por lo que tiene sentido que presente un comportamiento más anisohídrico.

Por otro lado, al relacionar los resultados obtenidos a partir del grado de isohidricidad elaborados en este estudio con las curvas de conductividad estomática (gs) se puede apreciar que el comportamiento estomático de cada variedad tiene coherencia con los grados de isohidricidad, en donde la variedad Chardonnay posee un gs50 muy similar que la variedad Sauvignon blanc (-0,9 MPa y -0,95 MPa respectivamente) (Figura 7 y 8), pero la variedad Sauvignon blanc posee un gs90 más negativo que la variedad Chardonnay (-2,05 MPa y -1,69 MPa respectivamente) (Figura 7 y 8), lo cual podría explicarse por el hecho de que la variedad Chardonnay parte (primera fecha de medición) con un comportamiento anisohídrico extremo manteniendo sus estomas abiertos ante la desecación del suelo al igual que la variedad Sauvignon blanc, pero con el progreso de la temporada (segunda fecha de medición) la variedad Chardonnay cambia su dinámica a un comportamiento parcialmente isohídrico, cerrando en mayor medida esta vez sus estomas en función del desecamiento del suelo, mientras que la variedad Sauvignon blanc se mantiene con un comportamiento anisohídrico extremo, llegando así a un gs90 más negativo que la variedad Chardonnay. Así mismo, Silva (2021) reporta un potencial hídrico de cierre estomático de -2,19 MPa para la variedad Sauvignon blanc y de -1,72 MPa para la variedad Chardonnay, lo cual concuerda con la tendencia observada en esta investigación.

En cuanto al parámetro fisiológico denominado punto de pérdida de turgencia (Ψ_{tlp}) entendido como el potencial hídrico en el cual se pierde la turgencia celular, este resulta ser un parámetro de gran importancia al momento de estudiar el comportamiento de las plantas, en este caso frutales, debido a su participación en la capacidad de extensibilidad de la pared celular, interactuando de forma directa con la capacidad de crecimiento plástico de las células vegetales (Cosgrove, 2016) y su interacción directa con el control de la conductancia estomática, influyendo en el control de la pérdida de agua a la atmósfera y absorción de CO_2 (Ratzmann et al., 2019), lo cual ha llevado a autores como

Bartlett et al. (2012), Dayer et al. (2020), Gambetta et al. (2020), Hartmann et al. (2021), Ratzmann et al. (2019) y Sorek et al. (2021) a considerar este parámetro como importante al momento de estudiar el comportamiento de distintas especies bajo condiciones de estrés hídrico. Para el caso de esta investigación, el punto de pérdida de turgencia no mostró diferencias significativas entre ambas variedades, lamentablemente esto no es particularmente interesante para evidenciar aún más el comportamiento contrastante entre la variedad Chardonnay y Sauvignon blanc bajo condiciones de déficit del recurso hídrico, sin embargo no deja de ser un parámetro que entrega información relevante al momento de evaluar el comportamiento de estas variedades.

En el caso de la variedad Sauvignon blanc, el punto de pérdida de turgencia ocurre a -1,66 MPa (Tabla 4), en tanto para la variedad Chardonnay ocurre a -1,78 MPa (Tabla 4), lo cual podría indicar un mayor ajuste osmótico por parte de la variedad Chardonnay (Bartlett et al., 2014), lo que le permitiría llegar a su punto de pérdida de turgencia a un potencial hídrico más negativo o igual de negativo que Sauvignon blanc, considerando que Sauvignon blanc sigue un comportamiento (según se reporta en los resultados) más anisohídrico que Chardonnay. Según Bartlett et al. (2014), el punto de pérdida de turgencia representa el potencial hídrico por debajo del cual la planta ya no es capaz de captar suficiente agua como para recuperarse de la marchitez, por lo que, según el mecanismo descrito por Cosgrove (2016), en dicho punto la planta ya no es capaz de generar crecimiento, lo cual es sumamente relevante para el contexto de un huerto con interés productivo. Dado esto, si nos referimos a las magnitudes solamente, la variedad Sauvignon blanc perdería su capacidad de crecimiento a un potencial hídrico menos negativo que Chardonnay (-1,66 MPa y -1,78 MPa respectivamente), lo que podría indicar una mayor adaptación de la variedad Chardonnay respecto a la variedad Sauvignon blanc ante condiciones de estrés hídrico en un contexto productivo.

Curvas de vulnerabilidad hidráulica

El método neumático propuesto por Pereira et al. (2016) resulta ser particularmente ventajoso en condiciones de laboratorio y mediciones controladas, dado su relativa rapidez, bajo costo de implementación, bajo requerimiento de material vegetal y requerimiento de una mínima manipulación de las muestras (Pereira, et al., 2020; Pereira et al., 2016; Trabi et al., 2021). Sin embargo, al momento de implementar esta

metodología en condiciones más complejas, como condiciones de campo, y al trabajar con la especie *Vitis vinifera*, requiere de ciertas consideraciones que para el caso de esta investigación resultaron cruciales.

La primera complejidad enfrentada fue probablemente inherente a la especie con la que se trabajó y a las condiciones edafoclimáticas y relativas a cada variedad (Chardonnay y Sauvignon blanc), en donde se encontró que la deshidratación de los brotes seleccionados ocurría de forma particularmente acelerada una vez que se realizaba el corte basal. Lo anterior y considerando el hecho de que el laboratorio se encontraba a aproximadamente una hora del campo en donde se encontraban las plantas utilizadas para esta investigación no permitió que las metodologías para la obtención de muestras descritas por Paligi et al. (2021), Pereira et al. (2020) y Trabi et al. (2021) fueran suficientes para asegurar la correcta hidratación de las muestras para realizar las mediciones de vulnerabilidad hidráulica, llegando a presentar potenciales hídricos de hasta -3 MPa, por lo que se optó por instalar una estación de medición en un galpón que nos facilitó Viña Santa Ema en las cercanías de los cuarteles para intentar solucionar este problema. Una vez implementados los cambios, se logró mantener la hidratación de las muestras de forma exitosa siguiendo las metodologías de los autores previamente mencionados.

Una segunda complejidad resultó ser el hecho de realizar el corte basal del brote seleccionado en el aire. Según Trabi et al. (2021), el método neumático permite realizar el corte de la muestra a utilizar en el aire dado que los conductos abiertos producto del corte que se rellenan con aire pasan a ser considerados parte del volumen del tubo de descarga del mismo aparato pneumatrón, sin embargo, al seguir este procedimiento los brotes, a pesar de presentar potenciales hídricos indicativos de una correcta hidratación, presentaban porcentajes de aire descargado (PAD) muy elevados entregando resultados incoherentes, por lo cual al realizar distintos ensayos de prueba y error se determinó que al refrescar el corte bajo el agua eliminando los primeros 2-3 nudos basales de cada brote completo, las lecturas de porcentaje de aire descargado correspondían de forma coherente con el estado de deshidratación del brote.

Al momento de implementar las mediciones de campo (no en un laboratorio) hubo algunos componentes de los aparatos pneumatrón, tales como las válvulas solenoides, tarjetas SD y data logger (Figura 4) que presentaron algunas complejidades que derivaron en consideraciones y recomendaciones para futuras investigaciones que utilicen estos aparatos en condiciones de campo. En el caso de las válvulas solenoides, estas funcionan con partes móviles que en condiciones de campo se ven expuestas a partículas de polvo, pelusas o cualquier tipo de suciedad que pueden alojarse entre las partes móviles impidiendo el correcto funcionamiento de estas válvulas y generando fugas de presión en el sistema que terminan por arrojar datos erróneos o a la detención del ciclo de medición de curvas de vulnerabilidad, además de estropear las válvulas generando pérdida de material. Para contrarrestar este problema se determinó que al recubrir las válvulas solenoides con trozos de esponja común (esponjas para lavar loza, por ejemplo) e ir cambiando estas esponjas con cada medición, las fugas de presión asociadas a este problema se reducían considerablemente. En cuanto a las tarjetas SD y data logger responsables de recopilar y almacenar los datos, estos componentes también sufrían daños derivados de las partículas de polvo y suciedad del ambiente así como por el desgaste generado al sacar y volver a poner las tarjetas para monitorear los datos, esto generaba pérdidas parciales e incluso masivas de datos de forma frecuente, por lo cual se optó por mantener cubiertos los aparatos pneumatrón en todo momento con cubiertas de plástico para evitar el contacto de estas piezas con la suciedad y se optó por minimizar la extracción de las tarjetas SD lo más posible, por lo que una posible mejora para los aparatos pneumatrón sería incorporar un sistema que permita monitorear los datos en tiempo real.

A pesar de haber sobrellevado las problemáticas anteriormente mencionadas, la progresiva deshidratación de los brotes utilizados para la realización de las curvas de vulnerabilidad hidráulica terminaba por generar contracciones en el tejido conectado al aparato pneumatrón que con el pasar de las horas requería de ir re apretando y re sellando las uniones del sistema pneumatrón-brote para evitar las fugas de presión, donde al trabajar con varios brotes a la vez (4 a 6 en el caso de esta investigación) hacía muy complejo obtener mediciones ausentes de fugas de presión que afectan los resultados finales, esta problemática es también reportada por investigaciones como la

de Chen et al. (2021), donde reportan que incertidumbres en las estimaciones del volumen máximo de aire, los efectos de la longitud de la muestra, las grietas en el tejido y la contracción de los brotes pueden dificultar la fiabilidad del método PAD. A lo anterior también se suma el hecho de que el viñedo donde se encontraban las vides utilizadas para la extracción de brotes, realizó su cosecha de forma mecánica deteriorando los brotes, por lo que la selección de las muestras fue minuciosa para elegir aquellos brotes que no presentaran ningún daño visible. Sin embargo, los brotes pueden haberse sometido a torceduras o curvaturas que generaran grietas en los tejidos, los que posteriormente generarían zonas de fugas de presión.

La suma de las situaciones ya detalladas impuso la necesidad de acotar las mediciones, realizando curvas de vulnerabilidad hidráulica solo para los tratamientos R100C0 de cada variedad tal como se explica en la sección de resultados.

En el caso de la variedad Sauvignon blanc, esta presentó una curva de vulnerabilidad hidráulica con una pendiente de -148,5, en tanto Chardonnay presentó una pendiente de -199,20, lo que indica un progreso más acelerado de la pérdida de conductancia hidráulica por efecto de la cavitación por parte de la variedad Chardonnay, sin embargo, la variedad Sauvignon blanc presentó un P50 de -1,57 y un P88 de -1,93 MPa (Figura 10), en tanto Chardonnay presentó un P50 de -2,09 y un P88 de -2,34 MPa (Figura 10), indicando que, a pesar de que el progreso de la cavitación es más acelerado en la variedad Chardonnay que en la variedad Sauvignon blanc, este proceso ocurre en un rango de potenciales hídricos más negativos que en la variedad Sauvignon blanc. Estos resultados concuerdan parcialmente con los resultados previamente reportados por Alsina et al. (2007), en donde se refieren a las variedades Chardonnay y Sauvignon blanc como variedades poco vulnerables en comparación con otras variedades, en este estudio reportan un P50 de -2,63 MPa para la variedad Chardonnay y -2,27 MPa para Sauvignon blanc, donde la diferencia entre ambas variedades no fue estadísticamente significativa, y los potenciales hídricos corresponden a potencial de hoja (más negativos). Además según menciona Chen et al. (2021), el método neumático generó sistemáticamente curvas más vulnerables que las realizadas con otros métodos, como es el caso de las realizadas por Alsina et al. (2007), por lo que los resultados obtenidos tienen coherencia. Asimismo, Hochberg et al. (2017) presentaron un rango de potencial

hídrico en el cual se genera la pérdida de conductancia hidráulica producto de la cavitación en hojas de la variedad Chardonnay que parte en los -1,5 MPa y llega a 60-90% a los -2,2 MPa, considerando que las hojas de *Vitis vinífera* son más vulnerables a la cavitación por efecto de la segmentación hidráulica (Gambetta et al., 2020) y que tal como se comentó, el método neumático podría estar generando curvas en las que la conductividad hidráulica se reduce a potenciales hídricos menos negativos que con otros métodos, este rango de potenciales también tiene sentido en relación a los resultados obtenidos.

En cuanto a resultados previos publicados para otras variedades de *Vitis vinífera*, los resultados obtenidos en esta investigación presentaron una curva sigmoide, tendencias y rangos de potencial hídrico que se relacionan bastante bien con los resultados presentados por investigaciones como Charrier et al. (2018), Dayer et al. (2020) y Sorek et al. (2021). Sin embargo, autores como Gambetta et al. (2020) presentan curvas de vulnerabilidad que si bien presentan igual forma y tendencia, se encuentran en potenciales hídricos más negativos, lo cual vuelve a poner de manifiesto la posibilidad de que el método neumático esté subestimando la medición de vulnerabilidad hidráulica. Debe considerarse además, que para el caso de la variedad Chardonnay solo se obtuvo una repetición, lo que podría haber sub o sobrestimado los resultados para esta variedad.

Margen de seguridad hidráulica y sus segmentos

El margen de seguridad hidráulica ha sido considerado como un rasgo particularmente útil al momento de evaluar el comportamiento de las especies ante condiciones de sequía o estrés hídrico, debido a que no solo integra aspectos de la vulnerabilidad del xilema a la falla hidráulica sino que también incorpora elementos de la respuesta estomática ante el déficit del recurso hídrico, captando así una serie de componentes clave en la respuesta integrada de la planta a la sequía (Anderegg et al., 2016). En este sentido, mientras más pequeño sea este margen, más susceptible será la planta al fallo hidráulico (Charrier et al., 2018). El rango abarcado por el margen de seguridad hidráulico ha sido relacionado con diferencias en la mortalidad inducida por sequía en árboles (Anderegg et al., 2016) y en cultivos perennes, se le reconoce como un

parámetro que podría ser importante para la longevidad y productividad a largo plazo bajo condiciones de sequía (Charrier et al., 2018).

En el caso de esta investigación, la variedad Sauvignon blanc presentó un margen de seguridad hidráulico (MSH) de 0,62 MPa (Figura 11), en tanto la variedad Chardonnay presentó un MSH de 1,19 MPa (Figura 12). Lo anterior sería indicativo de que la variedad Sauvignon blanc presenta una mayor vulnerabilidad al fallo hidráulico y una mayor sensibilidad a las condiciones de estrés hídrico que la variedad Chardonnay. Los rangos presentados tienen coherencia con relación a rangos de MSH presentados por investigaciones como Charrier et al. (2018), Dayer et al. (2020), Gambetta et al. (2020) y Sorek et al. (2021) para otras variedades de *Vitis vinífera*. Como se mencionó con anterioridad, el MSH resulta un parámetro importante, donde estudios como Anderegg et al. (2016), lo han definido como el parámetro que mejor predecía la mortalidad ante la sequía entre más de 475 especies, sin embargo, difícilmente se llegue a potenciales hídricos cercanos al P50 en condiciones de campo con objetivos productivos, por lo que resulta importante complementar esta información con otros parámetros fisiológicos asociados a la respuesta al estrés hídrico para caracterizar el comportamiento de los individuos.

El primer segmento propuesto en esta investigación es entre gs_{50} y Ψ_{tlp} , donde la variedad Chardonnay presenta un rango de 0,88 MPa (Figura 12) y la variedad Sauvignon blanc presenta un rango de 0,71 MPa (Figura 11). Ya se mencionó previamente la importancia del Ψ_{tlp} en el proceso de crecimiento plástico de la planta (Cosgrove, 2016), se le reconoce además como un mecanismo de tolerancia a la sequía dado que manifiesta la capacidad de la planta de sobrevivir con el agua almacenada considerando un mínimo de conductancia posterior al cierre estomático (Dayer et al., 2020). Por otro lado, el gs_{50} incide directamente en la capacidad de intercambio gaseoso y por ende en la absorción y asimilación de CO_2 . Por lo tanto, este rango entrega información respecto a la magnitud de los potenciales hídricos en los que la planta será capaz de sobrevivir manifestando limitaciones en la producción de biomasa. En este sentido, la variedad Chardonnay posee un margen de seguridad productiva más amplio que la variedad Sauvignon blanc, por lo que nuevamente la variedad Sauvignon blanc estaría manifestando una mayor sensibilidad a las condiciones de estrés hídrico. Se

debe considerar también, que el Ψ_{tlp} para la variedad Sauvignon blanc ocurre posterior al P50, por lo que en los potenciales hídricos más negativos de este margen, la variedad Sauvignon blanc estará además lidiando con los problemas asociados a la pérdida de conductividad hidráulica.

El segundo segmento ilustra la diferencia entre el Ψ_{tlp} y el P50, donde la variedad Chardonnay presenta un rango de 0,31 MPa (Figura 12) y la variedad Sauvignon blanc presenta un rango de -0,09 MPa (Figura 11). En este rango la planta ya habría detenido su crecimiento y capacidad productiva, donde ya se ha reportado con anterioridad que la detención del crecimiento es la respuesta más temprana a las condiciones de estrés hídrico (Dayer et al., 2020). Según la segmentación hidráulica ya descrita en la vid, las hojas y pecíolos son más susceptibles a la falla hidráulica (Gambetta et al., 2020), por lo que en potenciales hídricos cercanos al P50 ya se habría manifestado en mayor medida la embolia foliar y gran pérdida o muerte del área foliar tal como reporta Charrier et al. (2018), donde potenciales hídricos cercanos a P50 gatillaron una senescencia de más del 80% de las hojas de la vid, aunque otros estudios reportan que la pérdida foliar es más reducida, pero aun así existente (Dayer et al., 2020). También en este punto se reportan daños en el intercambio gaseoso, donde plantas cuyo potencial hídrico de prealba fue cercano al P50 no recuperaron sus niveles normales de conductancia estomática una vez rehidratadas (Charrier et al., 2018). Este es un rango de potenciales hídricos en el cual la planta ya podría estar sufriendo daños y expresando mecanismos de respuesta a la sequía, aunque siendo aún capaz de recuperarse. Por ejemplo, mediante la capacidad de rellenar conductos xilemáticos embolizados en angiospermas una vez reincorporado el recurso hídrico (Anderegg et al., 2016), lo cual es bien reconocido en vides, pero con probables consecuencias en la longevidad de los individuos y su productividad a largo plazo. En este caso la variedad Chardonnay presenta un segmento pequeño, pero que puede servir de transición entre el margen de productividad y el de mortalidad (discutido más adelante). Para el caso de la variedad Sauvignon blanc, este segmento se encuentra invertido, dado que el Ψ_{tlp} ocurre posterior al P50. El fundamento para interpretar este margen de daño potencial es la ubicación relativa y la distancia entre Ψ_{tlp} (valor máximo del margen de productividad) y P50. Si P50 se encuentra previo al Ψ_{tlp} , quiere decir que ya nos encontramos en el

margen de mortalidad potencial (explicado más adelante), por lo tanto en este caso el margen de daño potencial es inexistente, indicando una mayor susceptibilidad de la variedad Sauvignon blanc, dado que pasa directamente del margen de seguridad productiva al margen de mortalidad potencial, incluso traslapándose. La información entregada por este segmento sería potencialmente útil para definir el orden de prioridad de riego de variedades o cuarteles, o para concentrar el riego en situaciones extremas de emergencia para evitar la muerte de los viñedos. Si se considera la relación anteriormente descrita entre carga frutal y potenciales hídricos más negativos, se podría decir, a priori, que la información entregada por este segmento podría ser útil también para determinar si resulta conveniente reducir la carga frutal de una variedad en condiciones de sequía para evitar que se generen daños en las plantas, dado que a mayor carga frutal los potenciales hídricos manifestados por la planta serían más negativos, acercándose más a los potenciales hídricos de este segmento. Sin embargo, esto se debe analizar investigando esta metodología bajo distintos tratamientos de carga frutal, ya que también es posible que los indicadores fisiológicos que generan estos segmentos se desplacen hacia potenciales hídricos más o menos negativos por efecto de la carga frutal.

El último segmento está comprendido por el rango entre P50 y P88. Ya se mencionó anteriormente las implicancias de llegar a potenciales hídricos de P50, sin embargo, investigaciones como Anderegg et al. (2016), Charrier et al. (2018) y Urli et al. (2013) expresan que es en realidad en potenciales hídricos cercanos al P88 donde realmente ocurre el fallo hidráulico, punto de no retorno fisiológico (para parámetros como conductancia estomática, transpiración, asimilación de CO₂, pérdida de agua y potencial hídrico foliar) y muerte de las plantas en especies angiospermas, lo cual se condice con los potenciales hídricos y secuencias de sucesos descritos en vid (Gambetta et al., 2020). Dado lo anterior, resulta importante cuantificar este margen de mortalidad potencial, donde para el caso de esta investigación la variedad Chardonnay presentó un rango de 0,25 MPa (Figura 12), en tanto la variedad Sauvignon blanc presentó un rango de 0,34 MPa (Figura 11). Indicando que una vez alcanzado el potencial hídrico de P50, la variedad Chardonnay comienza a manifestar daños irreversibles y muerte de individuos en un rango más acotado de potenciales hídricos que la variedad Sauvignon

blanc. Sin embargo, se debe considerar que los potenciales hídricos de P50 y P88 son menos negativos en la variedad Sauvignon blanc y que el margen de mortalidad potencial de esta variedad no se traslapa con el de Chardonnay. Por lo tanto, a pesar de que Sauvignon blanc tiene un margen de mortalidad potencial más amplio, la magnitud de su valor máximo y mínimo indican que la variedad Sauvignon blanc es más susceptible a estos daños irreversibles y muerte de individuos.

En suma, según los resultados obtenidos en esta investigación, se puede ver que la variedad Chardonnay se posiciona como una variedad más tolerante a las condiciones de estrés hídrico, debido a su menor susceptibilidad al fallo hidráulico determinado por el margen de seguridad hidráulico mayor, su mayor margen de seguridad productiva, su mayor margen de daño potencial y su margen de mortalidad potencial, que a pesar de ser menor, se encuentra en su totalidad en un rango de potenciales hídricos más negativos que el margen de mortalidad potencial de Sauvignon blanc.

Sin embargo, la variedad Sauvignon blanc podría exhibir un comportamiento más productivo que la variedad Chardonnay bajo condiciones de estrés hídrico no elevado dado su conductancia estomática mayor (Figura 7) y su tendencia a un comportamiento más anisohídrico, lo que limitaría en menor medida el intercambio gaseoso y la absorción de CO₂.

Conclusión

Los tratamientos de estrés hídrico y carga frutal si generaron diferencias en el estatus hídrico de *Vitis vinifera* cv. Chardonnay y Sauvignon blanc, tal como se reporta en investigaciones anteriores, donde los tratamientos de menor reposición hídrica y mayor carga frutal fueron responsables de una mayor cantidad de diferencias estadísticamente significativas, generando potenciales hídricos más negativos. La variedad Chardonnay presentó potenciales hídricos en general más negativos que la variedad Sauvignon blanc y se vio levemente menos afectada por los tratamientos.

La clasificación de las variedades dentro del comportamiento iso/anisohídrico, tal como es reportado por diversos autores, resultó problemática, por lo que se hace importante entender la iso/anisohidria como un rasgo dinámico durante la temporada y sujeto a modificaciones tanto por rasgos inherentes al individuo como a su entorno. En este sentido, la variedad Sauvignon blanc demostró seguir una tendencia más anisohídrica que Chardonnay, sosteniendo también una mayor conductividad estomática a medida que las condiciones hídricas se hacen más estresantes. El punto de pérdida de turgencia resultó ser un parámetro que no demostró diferencias estadísticamente significativas dentro de los tratamientos o entre las variedades. A pesar de esto, tal como argumentan diversos autores, es un parámetro con el potencial de entregar información clave para la comprensión de la respuesta de las especies al déficit hídrico.

Independiente de todas las ventajas que ofrece el método neumático para la elaboración de curvas de vulnerabilidad hidráulica, requiere tomar consideraciones extra en su implementación metodológica si se requiere de la obtención de múltiples repeticiones dentro de un tiempo y recursos acotados o si se requiere realizar las mediciones en condiciones de campo. La variedad Chardonnay presentó un progreso de la pérdida de conductividad hidráulica más acelerado que la variedad Sauvignon blanc, sin embargo, la variedad Chardonnay presentó cavitación en potenciales hídricos más negativos que Sauvignon blanc. Al comparar los resultados con otras investigaciones realizadas en vides, se debe considerar la posibilidad de que el método neumático esté subestimando las mediciones de vulnerabilidad hidráulica y se debe plantear la

interrogante de que el método realmente está midiendo la vulnerabilidad hidráulica en forma más precisa.

El margen de seguridad hidráulico sí manifestó diferencias entre las variedades Chardonnay y Sauvignon blanc, siendo estas diferencias coherentes con el comportamiento de las variedades asociado a los otros parámetros evaluados en esta investigación, donde la variedad Chardonnay presentó un margen de seguridad hidráulico más amplio.

El margen comprendido entre el gs_{50} y el Ψ_{tlp} (margen de seguridad productiva) sí manifestó diferencias entre las variedades, entregando información valiosa para la caracterización del comportamiento de las variedades bajo condiciones de estrés hídrico no extremo en un contexto productivo y respondiendo a la problemática de que potenciales hídricos de P50 no suelen alcanzarse bajo condiciones productivas de campo. El margen comprendido entre el Ψ_{tlp} y el P50 (margen de daño potencial) manifestó diferencias entre las variedades, por lo que puede ser una herramienta potencial para caracterizar el comportamiento de las variedades bajo condiciones de estrés hídrico. El margen comprendido entre el P50 y P88 (margen de mortalidad potencial) manifestó diferencias entre las variedades, pudiendo también ser una herramienta potencial para la caracterización del comportamiento de las variedades bajo condiciones de déficit hídrico más extremo.

La metodología utilizada en esta investigación para evaluar el comportamiento de las variedades ante condiciones de estrés hídrico presenta una perspectiva novedosa, potencialmente útil dado que entrega una herramienta gráfica que permite entender las distintas respuestas ante el estrés hídrico en base a parámetros fisiológicos ampliamente estudiados, de forma dinámica y dando espacio a interpretaciones que pueden variar en función del objetivo productivo con el que se evalúen. En investigaciones futuras sería interesante evaluar la relación real entre los márgenes implementados y los problemas fisiológicos asociados anteriormente descritos para cada margen.

Resumen

Vitis vinifera es una especie frutal de gran importancia a nivel mundial que se ha posicionado como una especie modelo para el estudio de la fisiología y producción frutal, por lo que bajo un contexto de cambio climático y escasez del recurso hídrico a escala global, resulta importante entender el comportamiento de las principales variedades comerciales bajo condiciones de sequía y promover el desarrollo de metodologías que permitan discriminar entre variedades más o menos vulnerables para poder sustentar la producción vitícola en zonas de riesgo a largo plazo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el uso del margen de seguridad hidráulica y su segmentación mediante parámetros fisiológicos asociados a la respuesta al estrés hídrico en la caracterización del comportamiento contrastante de *Vitis vinifera* cv. Chardonnay y Sauvignon blanc. Se evaluó el estatus hídrico ante distintos tratamientos de reposición hídrica y carga frutal, la conductividad estomática, el grado de isohidricidad, la vulnerabilidad hidráulica de tallo y parámetros fisiológicos celulares como el punto de pérdida de turgencia en ambas variedades en condiciones de campo. Los resultados demostraron un comportamiento contrastante en los parámetros fisiológicos asociados a la respuesta al estrés hídrico entre ambas variedades, lo cual pudo caracterizarse exitosamente mediante el uso del margen de seguridad hidráulica y los segmentos propuestos, indicando una mayor susceptibilidad de la variedad Sauvignon blanc. Se concluyó que la metodología propuesta en esta investigación es potencialmente útil para la caracterización del comportamiento de las variedades de *Vitis vinifera* ante condiciones de estrés hídrico.

Palabras clave: Estrés hídrico, margen de seguridad hidráulica, vulnerabilidad hidráulica, conductancia estomática, grado de isohidricidad, *Vitis vinifera*, punto de pérdida de turgencia.

Referencias

- Alsina, M. M., de Herralde, F., Aranda, X., Savé, R., & Biel, C. (2007). Water relations and vulnerability to embolism are not related: Experiments with eight grapevine cultivars. In *Vitis* (Vol. 46, Issue 1).
- Anderegg, W. R. L., Klein, T., Bartlett, M., Sack, L., Pellegrini, A. F. A., Choat, B., & Jansen, S. (2016). *Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe*. <https://doi.org/10.5061/dryad.116j2>
- Bartlett, M. K., Scoffoni, C., & Sack, L. (2012). The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: A global meta-analysis. *Ecology Letters*, 15(5), 393–405. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01751.x>
- Bartlett, M. K., Zhang, Y., Kreidler, N., Sun, S., Ardy, R., Cao, K., & Sack, L. (2014). Global analysis of plasticity in turgor loss point, a key drought tolerance trait. *Ecology Letters*, 17(12), 1580–1590. <https://doi.org/10.1111/ele.12374>
- Bleiholder, H., Feller, C., Hess, M., Meier, U., van den boom, T., Buhr, L., Hack, H., Klose, R., Stauss, R., & Weber, E. (1998). *Compendio para la identificación de los estadios fenológicos de especies mono-y dicotiledóneas cultivadas*.
- Campos, S. (2016). *Prospección de inicio del consumo de agua en la temporada en 'thompson seedless.'*
- Charrier, G., Delzon, S., Domec, J. C., Zhang, L., Delmas, C. E. L., Merlin, I., Corso, D., King, A., Ojeda, H., Ollat, N., Prieto, J. A., Scholach, T., Skinner, P., van Leeuwen, C., & Gambetta, G. A. (2018). Drought will not leave your glass empty: Low risk of hydraulic failure revealed by long-term drought observations in world's top wine regions. *Science Advances*, 4(1). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao6969>
- Chen, Y. J., Maenpuen, P., Zhang, Y. J., Barai, K., Katabuchi, M., Gao, H., Kaewkamol, S., Tao, L. bin, & Zhang, J. L. (2021). Quantifying vulnerability to embolism in tropical trees and lianas using five methods: can discrepancies be explained by xylem structural traits? *New Phytologist*, 229(2), 805–819. <https://doi.org/10.1111/nph.16927>
- Choat, B., & Way, D. (2013). Predicting thresholds of drought-induced mortality in woody plant species. In *Tree Physiology* (Vol. 33, Issue 7, pp. 669–671). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt046>
- Cosgrove, D. J. (2016). Plant cell wall extensibility: Connecting plant cell growth with cell wall structure, mechanics, and the action of wall-modifying enzymes. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 67, Issue 2, pp. 463–476). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv511>
- Dayer, S., Herrera, J. C., Dai, Z., Burlett, R., Lamarque, L. J., Delzon, S., Bortolami, G., Cochard, H., & Gambetta, G. A. (2020). The sequence and thresholds of leaf hydraulic

- traits underlying grapevine varietal differences in drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 71(14), 4333–4344. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa186>
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56).
- Fresh fruit portal. (2021, June 14). *Global grape trade volume to hit record in 2020-21 as industry clears “multiple hurdles.”* Wwww.Freshfruitportal.Com. <https://www.freshfruitportal.com/news/2021/06/14/global-grape-trade-volume-to-hit-record-in-2020-21-as-industry-clears-multiple-hurdles/>
- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., & Castellarin, S. D. (2020). The physiology of drought stress in grapevine: Towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 71(16), 4658–4676. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa245>
- Hartmann, H., Link, R. M., & Schuldt, B. (2021). A whole-plant perspective of isohydry: Stem-level support for leaf-level plant water regulation. In *Tree Physiology* (Vol. 41, Issue 6, pp. 901–905). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab011>
- Hernandez, M., A. (1997). *Introducción al vino de Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Hochberg, U., Rockwell, F. E., Holbrook, N. M., & Cochard, H. (2018). Iso/Anisohydry: A Plant–Environment Interaction Rather Than a Simple Hydraulic Trait. In *Trends in Plant Science* (Vol. 23, Issue 2, pp. 112–120). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.11.002>
- Hochberg, U., Windt, C. W., Ponomarenko, A., Zhang, Y. J., Gersony, J., Rockwell, F. E., & Holbrook, N. M. (2017). Stomatal closure, basal leaf embolism, and shedding protect the hydraulic integrity of grape stems. *Plant Physiology*, 174(2), 764–775. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01816>
- Hugalde, I. P., & Vila, H. F. (2014). Comportamiento isohídrico o anisohídrico en vides.... ¿Una controversia sin fin? *Revista de Investigaciones Agropecuarias*.
- International Organisation of Vine and Wine. (2019). *Statistical Report on World Vitiviniculture*. <https://www.oiv.int/es/normas-y-documentos-tecnicos/analisis-estadisticos/analisis-anual>
- Kaneko, T., Gould, N., Campbell, D., Snelgar, P., & Clearwater, M. J. (2022). The effect of soil type, fruit load and shaded area on ‘Hass’ avocado (*Persea americana* Mill.) water use and crop coefficients. *Agricultural Water Management*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107519>

- Lambers, H., Chapin III, S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology* (2nd ed.).
- Lavoie-Lamoureux, A., Sacco, D., Risse, P. A., & Lovisolo, C. (2017). Factors influencing stomatal conductance in response to water availability in grapevine: a meta-analysis. *Physiologia Plantarum*, 159(4), 468–482. <https://doi.org/10.1111/ppl.12530>
- Martínez-Vilalta, J., Poyatos, R., Aguadé, D., Retana, J., & Mencuccini, M. (2014). A new look at water transport regulation in plants. *New Phytologist*, 204(1), 105–115. <https://doi.org/10.1111/nph.12912>
- Mcelrone, A. J., Choat, B., Gambetta, G. A., & Brodersen, C. R. (2013). Water Uptake and Transport in Vascular Plants. In *Nature Education Knowledge* (Vol. 4, Issue 5).
- Meinzer, F. C., Johnson, D. M., Lachenbruch, B., McCulloh, K. A., & Woodruff, D. R. (2009). Xylem hydraulic safety margins in woody plants: Coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Functional Ecology*, 23(5), 922–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01577.x>
- Meinzer, F. C., Woodruff, D. R., Marias, D. E., Smith, D. D., McCulloh, K. A., Howard, A. R., & Magedman, A. L. (2016). Mapping 'hydroscares' along the iso- to anisohydric continuum of stomatal regulation of plant water status. In *Ecology Letters* (Vol. 19, Issue 11, pp. 1343–1352). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/ele.12670>
- Naor, A., Gal, Y., & Bravdo, B. (1997). Crop load affects assimilation rate, stomatal conductance, stem water potential and water relations of field-grown Sauvignon blanc grapevines. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 48, Issue 314). <https://academic.oup.com/jxb/article/48/9/1675/629213>
- Organización de las naciones unidas. (2014). *Escasez de agua, decenio Internacional para la Acción "El agua, fuente de vida" 2005-2015*. [Www.Un.Org/Spanish/Waterforlifedecade/Scarcity.Shtml](http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml).
- Paligi, S. S., Link, R. M., Isasa, E., Bittencourt, P., Cabral, J. S., Jansen, S., Oliveira, R. S., Pereira, L., & Schuldt, B. (2021). *Accuracy of the pneumatic method for estimating xylem vulnerability to embolism in temperate diffuse-porous tree species*. <https://doi.org/10.1101/2021.02.15.431295>
- Pereira, L., Bittencourt, P. R. L., Oliveira, R. S., Junior, M. B. M., Barros, F. v., Ribeiro, R. v., & Mazzafera, P. (2016). Plant pneumatics: Stem air flow is related to embolism - new perspectives on methods in plant hydraulics. *New Phytologist*, 211(1), 357–370. <https://doi.org/10.1111/nph.13905>
- Pereira, L., Bittencourt, P. R. L., Pacheco, V. S., Miranda, M. T., Zhang, Y., Oliveira, R. S., Groenendijk, P., Machado, E. C., Tyree, M. T., Jansen, S., Rowland, L., & Ribeiro, R. v. (2020). The Pneumatron: An automated pneumatic apparatus for estimating xylem vulnerability to embolism at high temporal resolution. *Plant Cell and Environment*, 43(1), 131–142. <https://doi.org/10.1111/pce.13647>

- Pereira, L., Miranda, M. T., Pires, G. S., Pacheco, V. S., Guan, X., Kaack, L., Karimi, Z., Machado, E. C., Jansen, S., Tyree, M. T., & Ribeiro, R. v. (2020). A semi-automated method for measuring xylem vessel length distribution. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 32(4), 331–340. <https://doi.org/10.1007/s40626-020-00189-4>
- Pérez, F. (2020). *Determinantes del comportamiento an-isohídrico en Vitis vinifera L.: Análisis de los cvs. Chardonnay y Sauvignon blanc bajo distintas condiciones de suministro de agua y carga frutal entre pinta y cosecha.*
- Portal fruticola. (2020). *Perú fue el segundo exportador de uva de mesa más grande del mundo en 2020.* www.Portalfruticola.Com/.
- Quezada, F. (2018). *El cambio climático y los recursos hídricos de Chile, Reflexiones y Desafíos al 2030: Perspectiva de Especialistas Externos.* <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/cambioClim12parte.pdf>
- Ratzmann, G., Meinzer, F. C., & Tietjen, B. (2019). Iso/Anisohydry: Still a Useful Concept. In *Trends in Plant Science* (Vol. 24, Issue 3, pp. 191–194). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.009>
- Redagricola. (2022, February 24). *Perú supera a Chile y se convierte en primer exportador mundial de uva de mesa.* <https://www.redagricola.com/cl/peru-supera-a-chile-y-se-convierte-en-primer-exportador-mundial-de-uva-de-mesa/>
- Sack, L., Pasquet-Kok, J., & Bartlett, M. (2010). *Leaf pressure-volume curve parameters.* <https://Prometheusprotocols.Net/>. <https://prometheusprotocols.net/function/water-relations/pressure-volume-curves/leaf-pressure-volume-curve-parameters/>
- Sade, N., Gebremedhin, A., & Moshelion, M. (2012). Risk-taking plants: anisohydric behavior as a stress-resistance trait. In *Plant signaling & behavior* (Vol. 7, Issue 7, pp. 767–770). <https://doi.org/10.4161/psb.20505>
- Silva Gutiérrez, B. (2021). *“Evaluación del efecto interactivo del déficit hídrico y la carga frutal sobre parámetros fisiológicos de dos cultivares de Vitis vinifera.”*
- Sorek, Y., Greenstein, S., Netzer, Y., Shtein, I., Jansen, S., & Hochberg, U. (2021). An increase in xylem embolism resistance of grapevine leaves during the growing season is coordinated with stomatal regulation, turgor loss point and intervessel pit membranes. *New Phytologist*, 229(4), 1955–1969. <https://doi.org/10.1111/nph.17025>
- Suarez, F., Pereira, J., Vasquez, J., Perez, F., & Perez, A. (n.d.). *Increases in bulk elastic modulus like one of water stress adaptation strategies by Vitis vinifera with different irrigation and CO₂ demand levels.*
- Taiz, L. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.).

- Trabi, C. L., Pereira, L., Guan, X., Miranda, M. T., Bittencourt, P. R. L., Oliveira, R. S., Ribeiro, R. v., & Jansen, S. (2021). A User Manual to Measure Gas Diffusion Kinetics in Plants: Pneumatron Construction, Operation, and Data Analysis. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.633595>
- Turner, N. C. (2018). Turgor maintenance by osmotic adjustment: 40 years of progress. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 69, Issue 13, pp. 3223–3233). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery181>
- UBA. (n.d.). *Las plantas y el agua*. Universidad de Buenos Aires.
- Urli, M., Porté, A. J., Cochard, H., Guengant, Y., Burlett, R., & Delzon, S. (2013). Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. *Tree Physiology*, 33(7), 672–683. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt030>
- Zhang, Y., Lamarque, L. J., Torres-Ruiz, J. M., Schuldt, B., Karimi, Z., Li, S., Qin, D. W., Bittencourt, P., Burlett, R., Cao, K. F., Delzon, S., Oliveira, R., Pereira, L., & Jansen, S. (2018). Testing the plant pneumatic method to estimate xylem embolism resistance in stems of temperate trees. *Tree Physiology*, 38(7), 1016–1025. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy015>

Anexos

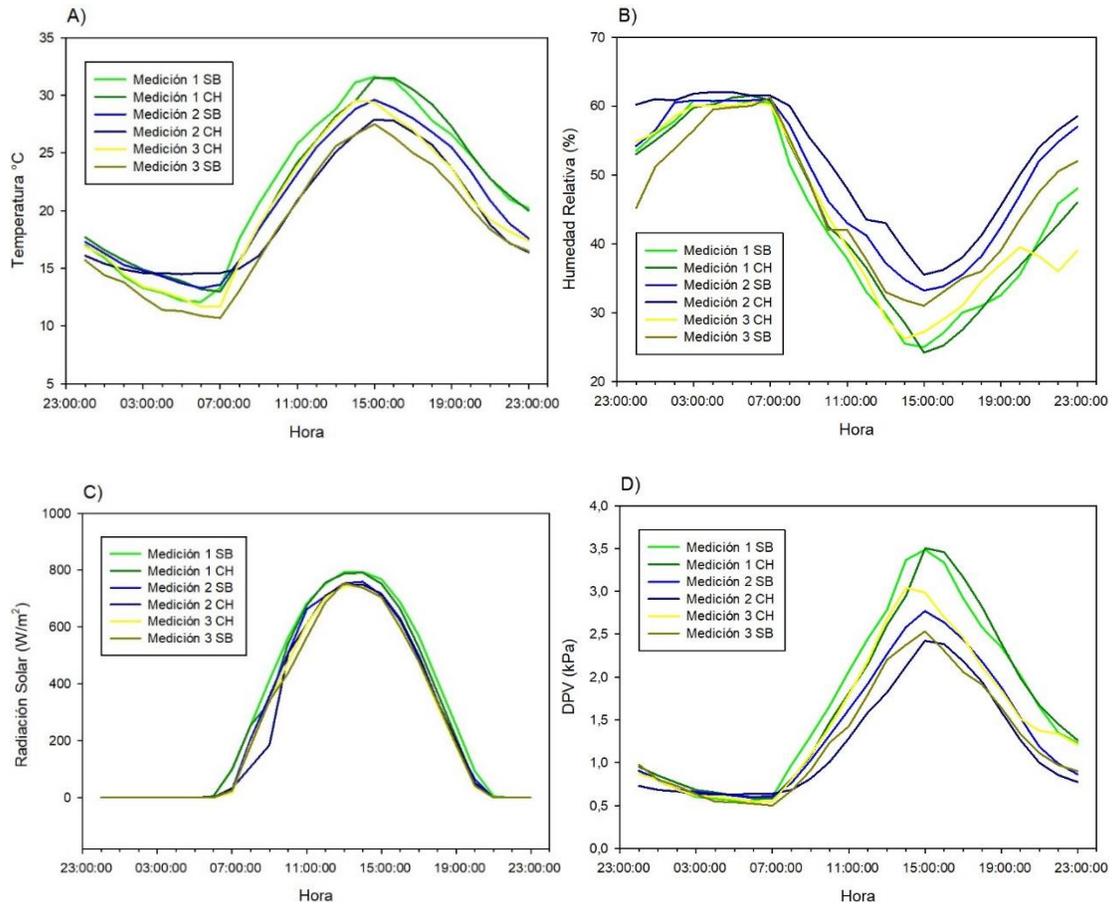


Figura A1: Variables climáticas promedio para las fechas de medición 1 (03 de enero Sauvignon blanc y 04 de enero Chardonnay), medición 2 (11 de enero Sauvignon blanc y 12 de enero Chardonnay) y medición 3 (31 de enero Chardonnay y 01 de febrero Sauvignon blanc). Temperatura (A), Humedad relativa (B), Radiación solar (C) y Déficit de presión de vapor (D).

Tabla A1: Resumen de las magnitudes obtenidas para cada margen calculado en las variedades Sauvignon blanc y Chardonnay. Margen de seguridad hidráulica (MSH), margen de seguridad productiva (MSP), margen de daño potencial (MDP) y margen de mortalidad potencial (MMP).

	SB	CH
MSH	0,62 MPa	1,19 MPa
MSP	0,71 MPa	0,88 MPa
MDP	(-0,09) MPa	0,31 MPa
MMP	0,34 MPa	0,25 MPa

