

RESUMEN EJECUTIVO

Manual Técnico: “Estrategias de gestión del riego para aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas. Experiencias frente al proceso de aridización”.

O. Seguel; Ch. Hardy; F. Alfaro; C. Pastenes

La mayoría de los escenarios de cambio climático sugieren un proceso de aridización (tendencia a la reducción de las precipitación y aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías) en muchas áreas del mundo, el cual afectará de manera significativa la actividad agrícola, lo cual hace cada vez más importantes las investigaciones de las respuestas de las plantas a la sequía. Entre los años 2016 y 2020 se desarrolló el proyecto **PYT 2016-0152 “Estrategias agronómicas de gestión del riego que permitan aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas ante el proceso de aridización”**, con financiamiento de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) y ámbito de acción en la Región de Coquimbo, abarcando los tres principales frutales de la Región: vid, olivo y palto.

El proyecto se estructuró en base a cinco objetivos, los tres primeros referidos a escenarios hídricos, el cuarto relacionado a la rentabilidad del agua y el último objetivo se focalizó en las actividades de difusión y capacitación. Para los diferentes escenarios hídricos se contemplaron los siguientes ensayos:

- Escenario con disponibilidad hídrica adecuada: ensayos de uso de coberturas (de superficie y de canopia) en vid y olivos.
- Escenario con disponibilidad hídrica moderada: ensayos de restricciones hídricas en periodos no críticos del cultivo de olivos y vid.
- Escenario con disponibilidad hídrica baja: ensayos de manejos de podas y enmiendas de suelo, con corte total del riego (simulación de sequía).

A partir de los resultados de los ensayos, se recabó la información que dio origen al presente Manual, previa contextualización de la Región de Coquimbo, la respuesta fisiológica de los cultivos frente al estrés hídrico y los posibles manejos a implementar (capítulos 1 y 2).

Transcurridas tres temporadas (años 2017, 2018 y 2019) desarrollando y validando los manejos, se lograron establecer directrices para optimizar el uso de agua y minimizar los efectos de la escasez hídrica. En función del escenario hídrico específico, se pueden realizar diversos manejos que apunten a la optimización de la eficiencia de uso del agua en los sistemas agrícolas, sin afectar negativamente al cultivo o asegurando su rápida recuperación post estrés hídrico, con una visión de rentabilidad en el uso de los recursos.

Ante una condición de buena disponibilidad hídrica (capítulo3), se deben adoptar manejos que apunten a disminuir las pérdidas de agua por evaporación o por transpiración excesiva, siendo posible implementar mulch superficiales, mallas sobre el dosel o uso de protectores solares. Al respecto, el uso de mulch de alperujo estabilizado presentó resultados promisorios, con aporte de nutrientes y mejorías en las propiedades físicas del suelo, sin

afectar el funcionamiento fisiológico de la planta, por lo que se proyecta el uso de este pasivo ambiental como una enmienda de suelo.

Bajo condiciones de restricción hídrica moderada (capítulo 4), el riego deficitario controlado y el desecamiento parcial de raíces posterior a la división celular en los frutos de vid y olivos contribuyen al ahorro del agua y a mantener un buen rendimiento de los cultivos en la medida que el estrés no sea excesivo, incrementando la eficiencia de uso de agua y manteniendo la calidad del producto comercial.

Finalmente, frente a una expectativa de sequía (capítulo 5), con imposibilidad de riego una vez iniciada la temporada, se presentan los resultados de manejos de podas y enmiendas de suelo, los cuales mostraron resultados que dependen de la especie, siendo el factor clave en paltos la aplicación de podas, en tanto en olivos y vid se presenta una sinergia en la acción conjunta de podas y enmiendas de suelo. La poda es efectiva en reducir la interceptación de la radiación, lo que disminuye de manera efectiva el consumo de agua; por su parte, el uso de enmiendas de suelo genera una condición estructural favorable para la exploración radical, lo que en el caso de la vid generó una mejor recuperación post sequía.

Finalmente, el capítulo 6 desarrolla indicadores de efectividad en el uso del agua, el rendimiento y recuperación de los cultivos una vez repuesto el riego y la rentabilidad económica del agua, permitiendo confirmar la efectividad de los manejos propuestos.

El manual se estructura de manera secuencial, desde manejos del agua con buena disponibilidad hídrica hasta condiciones de ausencia absoluta de agua, a través de un lenguaje de fácil comprensión, pero sin perder las bases técnicas que permiten entender e interpretar los resultados de manera objetiva y con rigidez científica. Sus autores agradecen el apoyo de FIA y hacen un especial reconocimiento al Profesor Dr. Nicolás Franck Berger, gestor intelectual del proyecto, quien falleció inesperadamente durante el desarrollo del mismo.



Estrategias de gestión del riego para aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas

Experiencias frente al proceso de aridización



Oscar Seguel
Charlotte Hardy
Francisco Alfaro
Claudio Pastenes

Estrategias de gestión del riego para aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas

Experiencias frente al proceso de aridización

Resultados del proyecto **PYT 2016-0152 “Estrategias agronómicas de gestión del riego que permitan aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas ante el proceso de aridización”**, desarrollado con el apoyo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA)

ISBN 978-956-328-257-3
Registro de Propiedad Intelectual
Inscripción n° 2020-A-8746
Universidad de Chile
Fundación para la Innovación Agraria
Santiago, septiembre 2020

Autores:
Oscar Seguel
Charlotte Hardy
Francisco Alfaro
Claudio Pastenes

Revisión técnica:
Wanda García Olivares (Fundación para la Innovación Agraria – FIA)

Fotografía:
Oscar Seguel
Charlotte Hardy
Francisco Alfaro
Equipo de trabajo del Centro de Estudios de Zonas Áridas CEZA

Santiago, septiembre 2020

A modo de Prefacio

La mayoría de los escenarios de cambio climático sugieren un proceso de aridización (tendencia a la reducción de las precipitación y aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías) en muchas áreas del mundo, las que afectarán de manera significativa la actividad agrícola, lo cual hace cada vez más importantes las investigaciones de las respuestas de las plantas a la sequía.

A la fecha, la mayoría de los estudios se han centrado en las respuestas de plantas a situaciones puntuales de estrés, en circunstancias que la ocurrencia de sequías es cada vez más frecuente e intensa. Más aún, zonas agrícolas de importancia, como el Norte Chico, llevan casi 10 años de escasez hídrica.

Este problema es relevante para la agricultura en general, sin embargo, es especialmente sensible para sistemas agrícolas de largo plazo basados en cultivos permanentes como frutales y viñas. En dicho caso, el escenario actual plantea desafíos especiales en un clima cambiante, pues áreas actualmente favorables para un cultivo dado, pueden llegar a convertirse en desfavorables durante el ciclo productivo del huerto, y manejos agronómicos que se realizan durante una temporada pueden repercutir en el desempeño del cultivo en las temporadas siguientes. Desde esta perspectiva, se hace cada vez más urgente contar con herramientas de gestión del recurso hídrico con respaldo científico que permitan adaptar la agricultura al nuevo escenario climático y no sólo implementar medidas reactivas ante la emergencia.

Cabe destacar que la naturaleza riesgosa de estas herramientas de manejo, sin la certeza de su impacto en el largo plazo, hace difícil para un agricultor adoptarlas. Es por esto que el principal objetivo de este proyecto fue identificar las estrategias de manejo agronómico que presenten una respuesta positiva y consistente en el tiempo y, por lo tanto, sean técnica y económicamente fáciles de implementar, asegurando la sustentabilidad de la producción en el largo plazo.

Los resultados de nuestro estudio se resumen en el presente manual con el propósito de dejar a disposición de los agricultores, no sólo nuevas herramientas de manejo agronómico que les permitan adaptar su sistema productivo a la variabilidad climática actual, sino también transferirles, mediante las actividades de capacitación que acompañaron la fase experimental, información concreta que les permita ser autónomos en la toma de decisiones.

La presente publicación entrega resultados obtenidos en el marco del proyecto **PYT 2016-0152 “Estrategias agronómicas de gestión del riego que permitan aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas ante el proceso de aridización”**, desarrollado entre los años 2016 y 2020 con el apoyo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA). La idea original fue gestada por el **Prof. Dr. Nicolás Franck Berger (Q.E.P.D.)**, colega y amigo de la Facultad de Ciencias Agronómicas y del Centro de Estudios de Zonas Áridas (CEZA) de la Universidad de Chile, quien repentina e inesperadamente partió de este mundo en octubre de 2017, dejándonos el desafío de continuar

con sus ideas e ideales. No podemos sino agradecer y dedicar este libro a quien con esfuerzo y dedicación formó el equipo de trabajo del CEZA y desarrolló por años estudios en frutales bajo condiciones áridas y semi áridas, aportando con su conocimiento al saber del país.

Así mismo el proyecto permitió la formación de colegas y especialistas en el área, quienes con compromiso y responsabilidad asumieron la labor de llevar adelante aspectos fundamentales del proyecto, a través de trabajos de práctica, memorias y tesis que contribuyeron a la obtención de los resultados generales. A todos/as ellos/as nuestros agradecimientos por su capacidad de asumir arduas jornadas de mediciones y de seguir adelante cuando las condiciones no fueron las esperadas. De hecho, el manual se estructura de manera secuencial, desde manejos del agua con buena disponibilidad hídrica hasta condiciones de ausencia absoluta de agua, a partir del trabajo de todos/as quienes participaron del proyecto. Por lo mismo, cada capítulo varía en la intensidad del análisis estadístico y validación de los resultados en función del avance de cada estudiante y del momento en que comenzaron sus ensayos.

En forma particular queremos también agradecer a los asociados y a quienes participaron de las diversas actividades relacionadas al proyecto, prestando apoyo y dando ideas para los distintos ensayos, aún a riesgo de perder sus plantas por los extensos periodos de sequía aplicados. En particular, queremos agradecer a **AM Ecological SA**, quienes creyeron en nuestra idea y nos apoyaron antes, durante y después del desarrollo del proyecto, a la **Sociedad Agrícola del Norte AG**, cuyo apoyo fue fundamental para la postulación del proyecto, y a las empresas asociadas, **Agrícola Río Negro SA**, de Ovalle, donde se montaron ensayos de sequía, estrés hídrico y manejo del riego en olivos y vid, **Agrícola Las Cañas Ltda**, de Illapel, donde se estableció el ensayo de sequía en paltos, y **Soc. Agrícola Talhuén**, también de Ovalle, donde se realizaron diversos ensayos de manejo del riego y estrés hídrico en vid. A todos ellos y sus respectivos equipos de trabajo, muchas gracias.

Finalmente, no queda más que agradecer a la **Fundación para la Innovación Agraria (FIA)**, quienes durante la ejecución del proyecto apoyaron activamente las diversas instancias, mostrando la mejor disposición para solucionar los problemas e imprevistos, siendo facilitadores activos para la obtención de los resultados finales.

Esperando que a quienes lean este libro les sea fácil de entender, además de práctico y útil en la implementación de los manejos, les dejamos un saludo cordial y la invitación a sumarse a las actividades que buscan desarrollar nuevos conocimientos, en pos de mejorar la calidad de vida de quienes habitamos este largo territorio llamado Chile, pero esta estrecha casa llamada Planeta Tierra.

INDICE

1. El contexto frutícola de la Región de Coquimbo frente al proceso de aridización.....	1
2. Criterios de manejo de frutales frente a la escasez hídrica en la Región de Coquimbo.....	7
3. El riego en condiciones climáticas semiáridas.....	15
4. El riego en condiciones de restricción hídrica.....	29
5. El riego en sequía severa (sobrevivencia del huerto).....	47
6. Indicadores hídricos y económicos de los manejos.....	67
7. Conclusiones del proyecto.....	78
8. Bibliografía.....	79
9. Apéndice.....	87

1. El contexto frutícola de la Región de Coquimbo frente al proceso de aridización



Charlotte Hardy
Francisco Alfaro
Oscar Seguel

El contexto climático de la Región

El territorio chileno está caracterizado por numerosas condiciones climáticas de gran variabilidad en un espacio limitado, como consecuencia de las condiciones gradualmente inducidas por la distancia al mar, la altitud y la extensa presencia latitudinal del país. No obstante, la variabilidad climática parece estar aumentando en todo el territorio, haciéndose más frecuentes los eventos climáticos extremos: sequía, olas de calor y frío, y heladas. En el siglo XX, la temperatura cambió más rápido que en los siglos precedentes, tendencia que ha mostrado una aceleración en décadas recientes (Santibáñez et al., 2014).

La zona de régimen árido y semiárido de Chile se compone de los territorios subdesérticos entre las regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana. Es una zona con una franja costera fresca, húmeda y nubosa, muy diferente de las condiciones climáticas de los valles interiores, donde las temperaturas y la radiación solar aumentan considerablemente (Luebert y Pliscoff, 2006). Los datos históricos indican que las temperaturas máximas están aumentando en valles interiores y zonas precordilleranas, mientras que en la costa ha habido una disminución de éstas. Las precipitaciones a su vez muestran una tendencia al descenso, con una alta variabilidad inter anual (Figura 1.1). En zonas costeras existe una significativa disminución en los montos pluviométricos, mientras que hacia el interior la tendencia es menos marcada. Aun así la mayor variación en las precipitaciones se presenta en la localidad de Ovalle, con una disminución de un 26,1% entre el período 1960-2010 con respecto al periodo 1900-1960 (Souvignet y Heinrich, 2010). En el caso de La Serena, el régimen pluviométrico registra una disminución de un 25,5% (Figura 1.1).

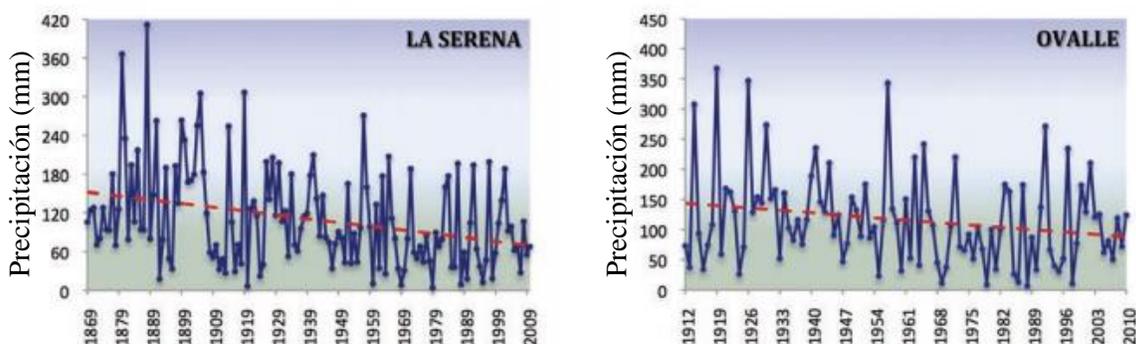


Figura 1.1. Series históricas de precipitación anual en La Serena (periodo 1869-2010) y Ovalle (periodo 1912-2010) según datos de la DMC (Santibáñez et al., 2014).

Por otra parte, las tendencias en el régimen de aridez muestran un avance del límite del desierto hacia el sur, con una disminución del índice de De Martonne en la Región de Coquimbo (Figura 1.2), lo que se interpreta como una disminución de las precipitaciones y/o un aumento de las temperaturas medias anuales. Esto tiene un importante potencial de impacto negativo sobre los ecosistemas áridos y semiáridos, los cuales ya enfrentan una situación creciente de déficit hídrico (Lara, 2019). Un aumento leve de la temperatura (1 a 2°C) en climas templados cálidos, puede provocar caídas en los rendimientos de los cultivos debido al aumento de los niveles de estrés térmico y al acortamiento de los ciclos de vida de las plantas, así como al aumento de la demanda evapotranspirativa del aire. En efecto, la

aridización del régimen pluviométrico, junto a un aumento de la temperatura del orden de 0,5° a 0,6°C, produjo una caída en los rendimientos de los cereales, lo que hizo desaparecer casi por completo su cultivo en la Región de Coquimbo. Similares tendencias sufrieron el anís y el comino, cultivos antiguamente tradicionales de la región. Igualmente, las praderas naturales han visto reducida su productividad, afectando a la crianza de cabras, la más importante fuente de sustento de las comunidades agrícolas de esta región (OPIA, 2016).

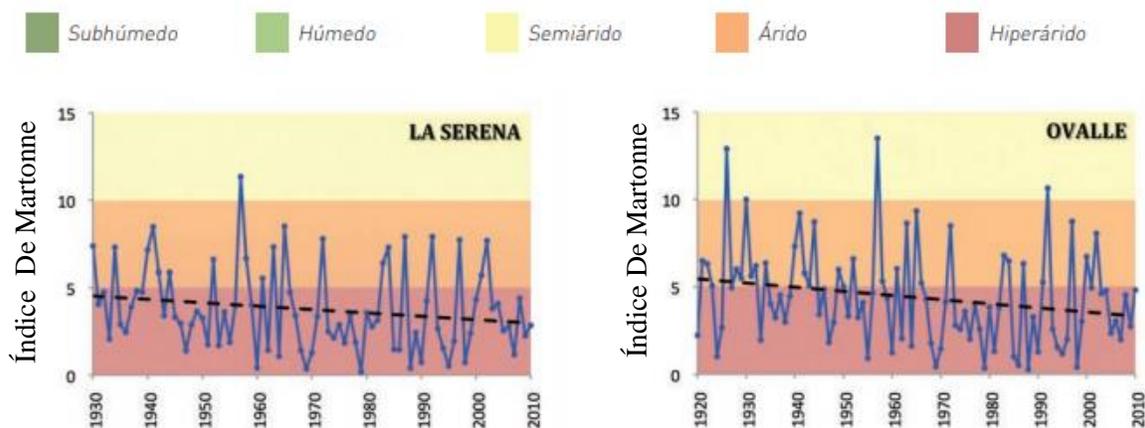


Figura 1.2. Series históricas del índice de aridez de De Martonne en La Serena (periodo 1930-2010) y Ovalle (periodo 1920-2010) según Santibáñez et al. (2014).

La disponibilidad de agua en las regiones áridas y semiáridas de Chile ha alcanzado niveles críticos en relación con las crecientes demandas por parte de la agricultura, la minería y las zonas urbanas. Las demandas han crecido fuertemente en las últimas décadas, frente a una oferta que sólo ha ido disminuyendo como consecuencia de las tendencias pluviométricas (Fundación Chile, 2018). La disponibilidad de agua per cápita en estas regiones está por debajo del nivel crítico considerado de estrés hídrico (1700 m³ /persona año). Adicionalmente, la extrema variabilidad en la disponibilidad de agua está creando un serio problema de abastecimiento, especialmente para la agricultura, que es la actividad más demandante. Durante este siglo las precipitaciones podrían declinar entre 10 y 30%, reduciendo la disponibilidad de agua en las cuencas de las regiones áridas y semiáridas del país (Santibáñez et al., 2014).

El contexto hidrológico

El aumento en la temperatura media debido al cambio climático ha producido un ascenso de la isoterma 0°C de entre 300 y 500 m; como consecuencia, la acumulación de nieve en la cordillera es menor, afectando directamente el caudal de ríos de régimen nivo-pluvial, como el río Limarí (Santibáñez, 2014). Además, la extrema variabilidad interanual de las precipitaciones hace variar igualmente a la cantidad de agua superficial de los ríos (Figura 1.3).

¹ El índice de Aridez De Martonne tiene la expresión siguiente: $IA = P/(T+10)$, donde P es la precipitación anual (mm) y T es la temperatura media anual (°C).

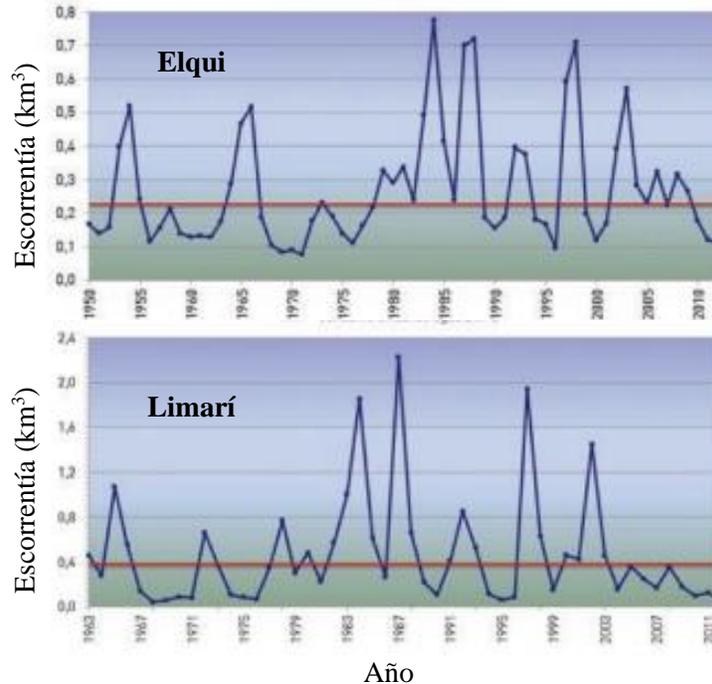


Figura 1.3. Serie histórica de la escorrentía anual del río Elqui (arriba) y del río Limarí (abajo) comparada con el consumo de agua de la cuenca (en línea roja) (Santibáñez et al., 2014).

Es muy frecuente que el agua escurrida total anual sea inferior a la demanda, situación que va empeorando con el tiempo en la medida que la demanda va aumentando. En Elqui, un 52% de los años escurre menos agua que la demandada, generándose condiciones de déficit hídrico. En Limarí, el 56% de los años son deficitarios y en Choapa, un 37% de los años alcanza esta categoría (DGA, 2019). Esta situación puede ser regulada parcialmente por los embalses, pero durante los ciclos secos, en que varios años se presentan deficitarios, ningún sistema de embalses es capaz de conservar el agua demandada, generándose sequías con severas consecuencias sociales y económicas.

El contexto frutícola

La realidad antes descrita se ve reflejada en los valles interiores de la Región de Coquimbo. A pesar de ser una de las zonas con mayor infraestructura para riego, la cuenca del Limarí se ve muy afectada por la mega sequía en la Región. En su potencial, el “sistema Paloma”, con 3 embalses interanuales, permitiría abastecer a la ciudad de Ovalle en agua potable, y sustentar a más de 55.000 ha de cultivos bajo riego. Esta seguridad hídrica permitió incentivar el establecimiento de huertos de frutales con proyectos de alta inversión. Si bien el desarrollo de la fruticultura de exportación permitió el progreso del valle, estos diez últimos años de sequía permitieron que solo 10% de la superficie produzca de forma normal. La “peor sequía de Chile” llevó a un 39,3% de los fruticultores de la Región de Coquimbo a describir la situación como “insostenible”, debiendo limitarse la superficie regada y los futuros proyectos frutícolas (Red Agrícola, 2016, 2019a).

En el caso del valle de Choapa, en septiembre de 2019 el embalse Corrales contaba con un 40% de su capacidad (Figura 1.4), alrededor de 19 millones de m³, afectando fuertemente la actividad frutícola. Los cultivos frutales más afectados son los de ciclo largo: nogales, uva de mesa tardía, uva pisquera, uva vinífera. Los cultivos de paltos y cítricos también se ven muy afectados, dada la necesidad de suministro hídrico permanente a lo largo de todo el año. De estos antecedentes se deriva la necesidad de una correcta gestión del agua en la región, con políticas macro regionales a nivel del manejo de los embalses por parte de las juntas de vigilancia, hasta manejos prediales relacionados con la conducción y sistemas de riego, pero también por la correcta planificación de la temporada y las especies a cultivar (Red Agrícola, 20016, 2019b).

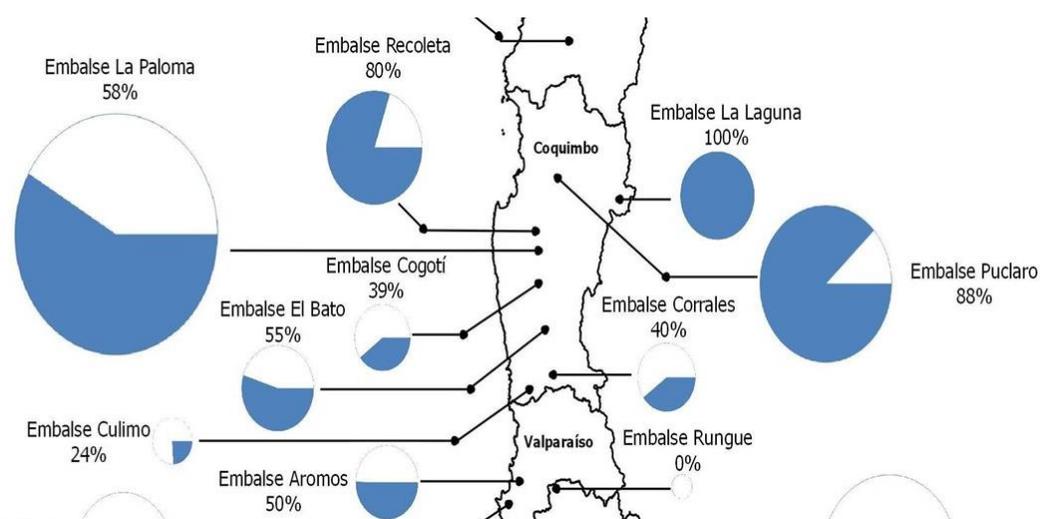


Figura 1.4. Volumen de agua almacenada en los embalses a septiembre de 2019 (DGA, 2019).

La pérdida de huertos y cosechas ha afectado duramente a los valles de la Región de Coquimbo, y estas cifras se ven parcialmente reflejadas en los catastros de frutales más plantados de la Región de Coquimbo (Cuadro 1.1). Al respecto, destaca que la superficie plantada en uva de mesa y paltos está disminuyendo estos últimos 10 años, mientras aumenta la superficie de mandarinos y nogales. Por otra parte, cultivos como el olivo, un frutal altamente resistente a la sequía, se mantiene estable desde 2011.

Cuadro 1.1. Evolución de la superficie frutal (ha) plantada en la Región de Coquimbo.

Especie	Año				
	1999	2005	2011	2015	2018
Vid de Mesa	8.545	9.698	10.597	8.721	8.159
Palto	1.256	3.932	6.291	5.024	3.983
Olivo	230	1.232	3.437	3.719	3.904
Mandarino	763	1.493	2.067	2.630	3.784
Nogal	470	863	1.662	2.466	2.500

Estos cambios, si bien se ven forzados por condiciones de mercado y rentabilidad de los cultivos, se encuentran dentro del contexto regional: una condición de clima árido a semiárido y con menor disponibilidad hídrica y alta variabilidad interanual. Lo anterior sugiere que las acciones para mantener el bienestar de la población deben venir de un análisis conjunto y consensuado entre las diversas instancias de participación. Así mismo, no se debe olvidar que el agua es un recurso limitado, con diversos actores sociales interesados en su utilización, siendo la agricultura una de las actividades que mayor uso y consumo hace del recurso. Esto genera una gran responsabilidad frente a la Región y al país, requiriendo una acuciosa planificación, de manera de evitar pérdidas económicas con impactos sociales y ambientales, como lo ocurrido en la última mega sequía que afectó a la Región (Imagen 1.5).



Imagen 1.5. Abandono de huertos en la Región de Coquimbo como consecuencia de la sequía. Fotografías del año 2014 en Vicuña (izquierda) y Petorca (derecha).

2. Criterios de manejo de frutales frente a la escasez hídrica en la Región de Coquimbo



Francisco Alfaro
Charlotte Hardy
Oscar Seguel

El contexto regional del riego

La condición climática de la Región de Coquimbo, si bien constituye una oportunidad para la producción temprana en la temporada, plantea el desafío de realizar un correcto manejo del riego, con el objeto de plasmar la oportunidad que brinda el clima con productos de calidad de manera sustentable del punto de vista económico, ambiental y social. La fruticultura (incluidas viñas y parrones) representa aproximadamente un 28% de la superficie de los cultivos de la Región (el principal uso lo constituyen las praderas, con cerca de un 55% de la superficie regional); a nivel nacional, la actividad frutícola de la Región representa un 19 a 20% de la superficie cultivada con frutales, viñas y parronales, aportando con el 4,8% de los ingresos de fruta fresca, el 3,0% de fruta procesada y el 0,3% de vinos y alcoholes en relación a los ingresos silvoagropecuarios del país (ODEPA, 2018).

Para el caso del riego, de acuerdo al censo agropecuario del año 2007, del total regional (poco más de 4 millones de hectáreas), menos del 2% de la superficie se encuentra bajo riego, destacando la Provincia de Limarí con la mayor superficie regada (Cuadro 2.1), aunque necesariamente hubo una reducción de la superficie cultivada (y por ende bajo riego) debido a la mega sequía ocurrida entre el 2010 y el 2015 (Garreaud et al., 2017).

Cuadro 2.1. Distribución provincial y regional de los sistemas de riego (datos del censo agrícola 2007).

Sistema	Elqui	Limarí	Choapa	Región
Tendido	1100,4	11691,6	6798,3	19590,3
Surco	6793,5	7778,4	3591,8	18163,7
Otro tradicional	287,1	389,1	111,2	787,4
Aspersión	127,7	93,2	52,1	273,0
Carrete/pivote	434,2	400,0	63,7	897,9
Goteo/cinta	9288,0	23271,5	2448,9	35008,4
Micro aspersión	168,3	485,6	443,9	1097,8
Provincia	18199,2	44109,4	13509,9	

El riego tecnificado representa cerca de un 55% de la superficie regada en las Provincias de Elqui y Limarí, pero tan solo un 22,3% en la Provincia de Choapa. Las cifras indican que aún se deben realizar esfuerzos en aumentar la eficiencia del riego, ya que a nivel regional la tecnificación no alcanza el 50% de la superficie regada. A su vez, se debe realizar un correcto monitoreo de los sistemas de riego y del agua del suelo, ya que aún con sistemas tecnificados, la falta de mantención y las malas prácticas de riego pueden generar eficiencias de riego por goteo cercanas al 50% (Callejas et al., 2014).

La respuesta frente el agua de los principales cultivos de la Región

Como se indicó en el capítulo anterior, las superficies de vides y olivos se han mantenido en los últimos años, en tanto la superficie plantada con paltos disminuyó. Esta situación

responde a las exigencias hídricas de cada cultivo, en función del ambiente en que evolucionaron; así, el olivo es considerado como una especie tolerante a la escasez hídrica, en cambio el palto se ubica en el extremo opuesto, con altas exigencias de agua.

Una vez que estas especies son domesticadas y seleccionadas para la producción agrícola, se busca aplicar riego para expresar su máximo potencial, pero en ambientes semiáridos la adopción de una especie o la adaptación de una variedad pasan por exigir una capacidad productiva con bajos consumos de agua (Trentacoste et al., 2018). Esta exigencia en la selección de especies y variedades da paso al concepto de eficiencia de uso de agua (EUA), que en términos generales corresponde a una producción dividida por el agua aplicada o consumida (Moore et al., 2011), aspecto que se analiza con mayor detalle en los capítulos siguientes. Obviamente, la EUA en sistemas mediterráneos depende fuertemente del riego (como herramienta para maximizar la producción), pero a la vez es necesario aplicar buenas prácticas de fertilización y control de plagas y enfermedades, de manera de asegurar una producción de calidad (Figura 2.1).

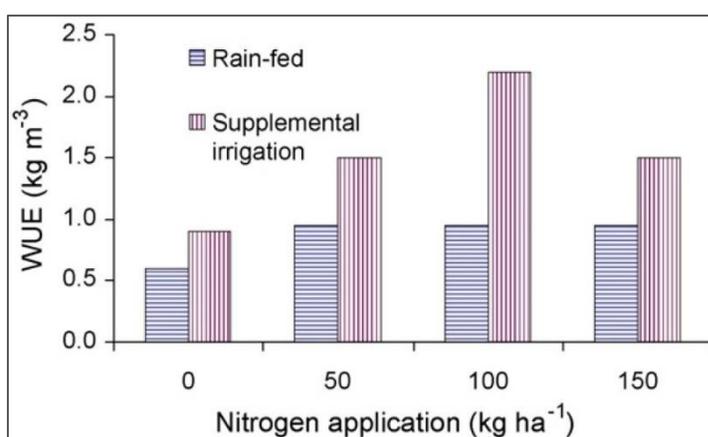


Figura 2.1. Eficiencia de uso de agua (WUE, water use efficiency, en inglés) en función del Nitrógeno aplicado en trigo, bajo una condición de secano (rain-fed) o con riego suplementario (supplemental irrigation) en los momentos críticos (Katerji et al., 2008).

De la Figura 2.1 se desprende que para un sistema mediterráneo, donde la escasez de agua se hace crítica en la época de llenado de grano en el cultivo de trigo, el riego suplementario permite aumentar la EUA como efecto de una mayor producción, pero este efecto se ve acrecentado si a la vez existe una correcta fertilización, equivalente a 100 kg de N por ha en la figura; mayor fertilización, junto con el riego suplementario, promueve un crecimiento vegetativo excesivo, con un mayor consumo de agua, disminuyendo la EUA. Por extensión, este principio podría extenderse a los frutales. Factores complementarios podrían relacionarse a la calidad del agua de riego, donde la salinidad o la presencia de ciertos cationes podrían generar una reducción de la EUA en función de la sensibilidad del cultivo (Katerji et al., 2008).

Para el caso del olivo, el potencial productivo en relación al agua evapotranspirada presenta un comportamiento lineal creciente, pudiendo alcanzarse sobre el 90% del potencial de rendimiento cuando se aplican montos de agua por sobre el 70% de la demanda del cultivo (Figura 2.2).

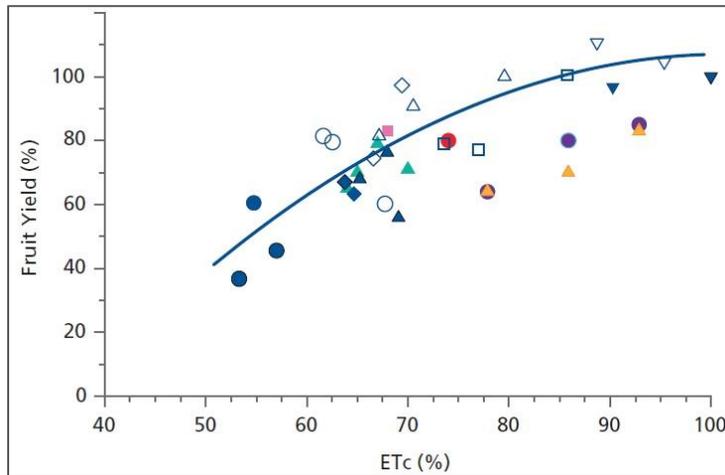


Figura 2.2. Relación entre el porcentaje de rendimiento potencial (Fruit Yield) y el porcentaje de la evapotranspiración de cultivo (ETc) de diferentes cultivares de olivos bajo el clima de España, en una recopilación de Gucci et al. (2012).

Eso significa que es posible hacer restricciones de riego (de hasta un 30% en la Figura 2.2) sin afectar significativamente el rendimiento, tal como lo demostró Goldhamer et al. (1994) aplicando riego deficitario en olivos de manera continua, donde el consumo de 880 mm de agua en un control puede ser reducido a 690 mm (75% de la ETc del control), manteniendo el rendimiento (12,0 y 12,5 ton/ha, respectivamente); incluso restricciones a un 56% de la ETc del control (550 mm) generan un 90% del rendimiento potencial (10,8 ton/ha), aunque con un retorno económico menor. Para el caso de la vid, el comportamiento es similar, pero la caída de rendimiento por efecto del estrés hídrico es más severa (Figura 2.3), por lo que las restricciones debiesen ser acotadas a ciertos momentos fenológicos.

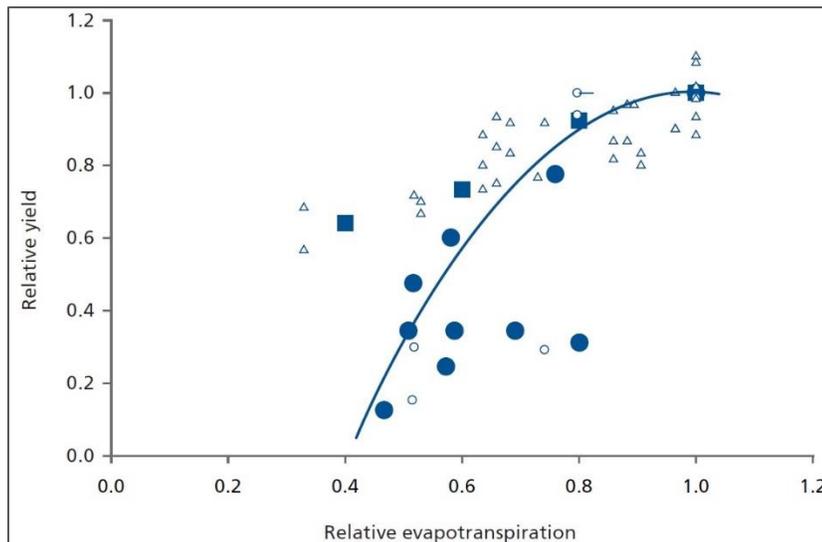


Figura 2.3. Relación entre la proporción de rendimiento potencial (Relative Yield) y la proporción de la evapotranspiración de cultivo (Relative evapotranspiration) de diferentes variedades de vid, en una recopilación de Sadras et al. (2012). Figuras llenas corresponden a variedades viníferas, figuras vacías a variedades de mesa; los triángulos vacíos corresponden a variedad Thompson Seedless.

Al respecto, se han definido diferentes criterios de monitoreo del estrés en vid, además de momentos en que se pueden generar restricciones hídricas sin afectar rendimiento y calidad; el detalle generado de los resultados del proyecto se presenta en el Capítulo 3. Girona et al. (2006), en un manejo de riego deficitario permanente (67 y 39% del agua aplicada a un control), identificaron potenciales de hoja medidos a medio día solar de entre -0,73 a -0,86 MPa en la etapa vegetativa, los que fueron disminuyendo en la temporada hasta valores de -0,93 a -1,20 MPa (respectivamente en el control y el tratamiento más estresado), generando una disminución de rendimiento de un 43% en el tratamiento de riego deficitario extremo, pero con un incremento de la EUA de un 46%. Para el caso de las variedades viníferas, se debe tener en cuenta la relación entre producción y calidad de la baya, ya que el mayor rendimiento en la Figura 2.3 se relaciona a una menor calidad de uva para vinificación (Intrigliolo y Castel, 2008).

Para el caso del palto, es conocida su intolerancia al estrés hídrico, por lo que cualquier déficit genera problemas en la cuaja y reducciones en el tamaño del fruto (Ferreira et al., 2012). La respuesta frente a restricciones hídricas también se traduce en un menor desarrollo vegetativo, tal como se muestra en la Figura 2.4.

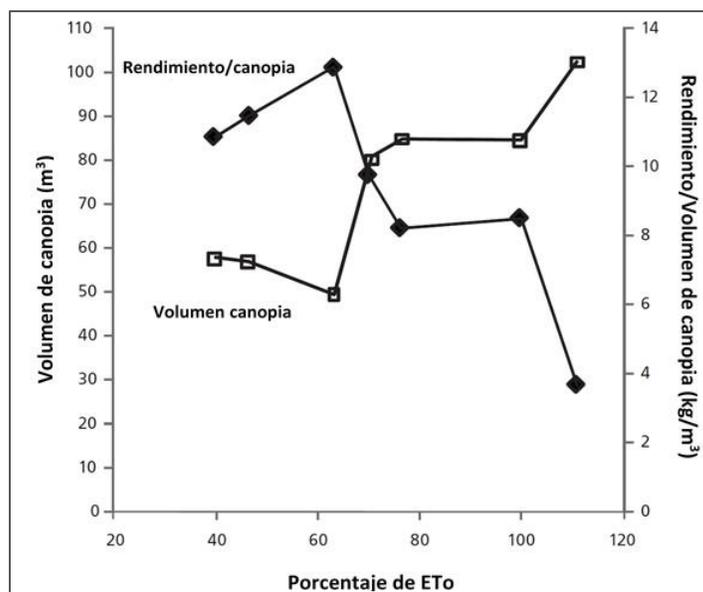


Figura 2.4. Relación entre el porcentaje de la evapotranspiración (ETo) y el desarrollo vegetativo del palto (Volumen de canopia). Se incluye la relación rendimiento/volumen de canopia en función de la ETo (Ferreira et al., 2012).

El riego deficitario no es recomendable en palto, sin embargo, bajo estrés hídrico severo puede llegar a potenciales xilemáticos de -3,0 MPa, recuperándose una vez que se repone el riego. En la Figura 2.4 se observa que reducciones de riego a un nivel equivalente al 65% de la ETo genera una fuerte disminución en el volumen de la canopia, pero incrementa la relación rendimiento/volumen canopia; es decir, restricciones hasta ese nivel permiten mantener una buena relación productiva, aunque es muy probable que se afecte la cuaja y que el árbol entre en añerismo. Por otra parte, excesos de riego también generarán problemas en la planta, dada su baja tolerancia a la falta de oxígeno.

Manejos en condición de sequía

Considerando el balance hídrico del agua en el suelo, donde las entradas se equilibran con las salidas (Figura 2.5), las estrategias de manejo a nivel predial para tratar de asegurar la sobrevivencia del huerto durante una sequía pasan por disminuir las pérdidas y aumentar los aportes.

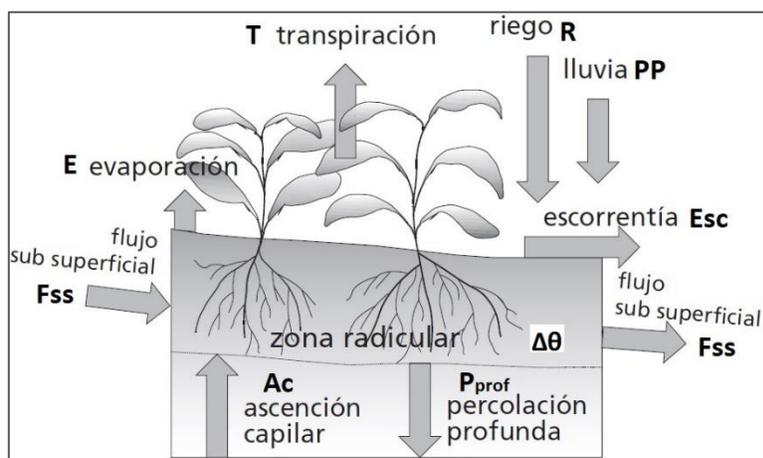


Figura 2.5. El balance hídrico en el suelo, el cual posee entradas y salidas que deben ser consideradas en la zona de raíces del cultivo y que generan una variación $\Delta\theta$ del contenido de agua del suelo (FAO, 2006).

En el balance hídrico de la Figura 2.5, contextualizado en ambientes semi áridos, los flujos superficiales y subsuperficiales no ocurren, salvo si en una ladera ocurren lluvias fuertes en invierno, en cuyo caso las entradas y salidas tienden a anularse; sin embargo, la escorrentía que llega al sitio podría tener un uso potencial si se logra capturar en estructuras de almacenamiento o dentro del mismo suelo. Para eso se construyen estructuras de interceptación (zanjas de desvío, zanjales de infiltración), lo cual puede constituir un aporte importante de agua, ya que en sistemas semi áridos las lluvias, si bien son escasas, tienden a ser concentradas y de alta intensidad (Santibáñez et al., 2014). Algo similar ocurre con el ascenso capilar y la percolación profunda, donde en ambientes semi áridos tienden a ser despreciables, salvo si se sobre riega (en cuyo caso se genera percolación profunda), pero se asume que bajo restricción hídrica no está ocurriendo tal aberración. Así, el balance hídrico se reduce a:

$$PP + R = E + T \pm \Delta\theta$$

Donde las entradas por precipitación (PP) y riego (R) se equilibran con las salidas generadas por la evaporación (E) y la transpiración (T), generando cambios en el contenido de agua del suelo ($\Delta\theta$). Dada la condición de sequía, las precipitaciones naturales son escasas y se generan en una época de baja demanda del cultivo (invierno), pero aun así pueden quedar almacenadas dentro del suelo hasta que el cultivo lo requiera si se generan las condiciones de infiltración y retención; para esto resulta clave el **uso de enmiendas orgánicas**, que favorecen la infiltración y el incremento del agua aprovechable para los cultivos (Abiven et al., 2009). Así, disponiendo de un determinado volumen de agua para riego, sólo queda hacer

una adecuada gestión de éste durante la temporada, a través de la tecnificación y el monitoreo en tiempo real (Callejas et al., 2014), en función de un correcto cálculo de la demanda del cultivo.

Para el caso de las salidas del agua, tal como se mostró en las figuras 2.2; 2.3 y 2.4, la transpiración se relaciona de manera directa con la producción y el rendimiento, por lo que es el camino natural al que se debiese aspirar como recorrido del agua desde el suelo hacia la atmósfera. Sólo la evaporación directa desde el suelo (o la canopia, bajo sistemas de riego por aspersión) constituye una pérdida, ya que el agua no pasa a través de la planta. Por ende, los manejos deben apuntar a evitar las pérdidas de agua por evaporación, en cuyo caso el **sistema de riego por goteo** constituye una buena estrategia, ya que genera un mojamiento parejo en profundidad con una mínima superficie húmeda en superficie, siendo esto uno de los motivos que explica su alta eficiencia (Sneh, 2006). Sin embargo, en suelos de textura fina, la zona húmeda en superficie puede ser amplia, explicando importantes pérdidas por evaporación; en este caso, el uso de un **mulch superficial** es recomendable para generar un microclima que evita la pérdida de agua, pudiendo utilizarse diferentes materiales (Kader et al., 2017). Por otra parte, el contenido de agua del suelo por sí solo no explica la disponibilidad de agua aprovechable para la planta, ya que existen las constantes hídricas de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), que relacionan el estado energético del agua en función del tipo de suelo, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.6, y con cuya diferencia (CC-PMP) se calcula el agua aprovechable para la planta.

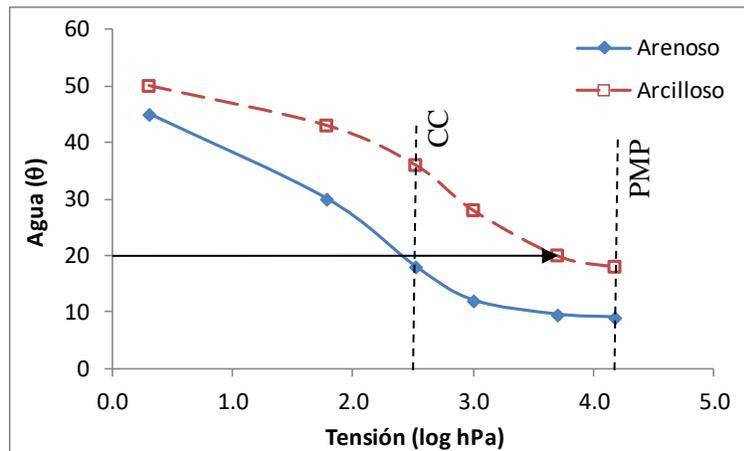


Figura 2.6. Curva característica de suelos arenoso y arcilloso, la cual relaciona el contenido de agua del suelo (θ) con su estado energético, representado como el logaritmo de la tensión. Líneas punteadas negras indican las constantes hídricas de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

Así, un sensor que indique un contenido de agua del 20%, no contextualizado en el tipo de suelo, puede llevar a errores de apreciación, ya que en el suelo arenoso corresponde a un valor cercano a capacidad de campo (luego, no es necesario regar), en cambio en un suelo arcilloso dicho valor es cercano al punto de marchitez permanente (es decir, la planta probablemente se encuentra en un estado de estrés hídrico). Indistintamente del tipo de suelo, los aportes de **enmiendas orgánicas** incrementan el agua aprovechable, ya que favorecen la estructuración del suelo, por lo que también aportan a un $\Delta\theta$ de agua aprovechable dentro del balance hídrico. Las alternativas de enmiendas orgánicas y sus objetivos de uso son

detalladas por Seguel et al. (2020), en tanto en el Capítulo 5 se revisa su uso en condiciones de sequía extrema. Al respecto, el uso de micro organismos y sustancias húmicas se presenta con un gran potencial para disminuir los efectos negativos de los eventos de sequía (Rasaei et al., 2013; Armada et al., 2016), por lo que es una tecnología que en el país comenzará a usarse y estudiarse con mayor atención.

En el contexto de un semiárido con restricciones de agua de riego, el consumo excesivo de agua no genera beneficios productivos, por lo que se pueden aplicar **restricciones hídricas controladas** en cultivos tolerantes al déficit hídrico, a través de diferentes estrategias, las cuales son revisadas en el Capítulo 4. Complementariamente, sabiendo que la zona norte de Chile no presenta limitaciones de radiación solar, muchas veces los cultivos sufren un proceso de fotosaturación (exceso de luz en relación a su capacidad fotosintética), por lo que el uso de **mallas y/o protectores solares** puede constituir una alternativa para disminuir el componente transpirativo del balance hídrico, manteniendo la actividad fotosintética por mayor tiempo (Kim et al., 2005). Estos manejos, junto con el uso de mulch en la superficie del suelo, son revisados en el Capítulo 3.

Finalmente, ante una condición de sequía, sin disponibilidad de agua de riego, los esfuerzos deben orientarse a salvar el huerto, por lo que un manejo recomendado es la **poda severa** (Imagen 2.7), que en el caso de los paltos se lleva a una poda a tocón, ya que se disminuye el componente de transpiración en el balance hídrico (Jiménez-Casas y Zwiazek, 2013). Los resultados de este manejo y su acción sinérgica con las enmiendas de suelo se analizan en el Capítulo 5.



Imagen 2.7. La poda severa, si bien elimina estructuras productivas y fotosintéticas, disminuye la demanda de agua por parte del frutal.

3. El riego en condiciones climáticas semiáridas



Andrés Domínguez
Nicolás Alarcón
Charlotte Hardy
Oscar Seguel
Francisco Alfaro
Claudio Pastenes

Introducción

La escasez hídrica es un problema importante en la producción de cultivos, que resulta de alteraciones en el régimen hidrológico a consecuencia del aumento de la demanda y cambios en el régimen de las precipitaciones (Mancosu et al., 2015). Ante este escenario, es vital encontrar maneras de adaptar los sistemas productivos agrícolas, particularmente en ambientes semiáridos. El factor productivo más importante en estos ambientes corresponde al suministro hídrico, por lo que resulta crucial su correcta estimación en base a las necesidades del cultivo, las variables climáticas y las características edáficas del suelo, adecuándose estratégicamente a las condiciones climáticas actuales y futuras (Santibáñez et al., 2014).

La evapotranspiración (ET) de un cultivo hace referencia a dos procesos separados, que ocurren simultáneamente: la evaporación de agua por parte de la superficie del suelo y la transpiración, que es la vaporización de agua líquida contenida en los tejidos vegetales y su posterior difusión hacia la atmósfera (FAO, 2006). Ambas dependen de la energía que es proporcionada por la radiación solar directa y la temperatura ambiente del aire, que junto con la humedad relativa, determina el gradiente de presión de vapor de agua entre la superficie y la atmósfera circundante; para el caso de la transpiración, que entre otros factores también depende de la turbulencia del viento, existe un control a nivel de la resistencia estomática (Taiz y Zeiger, 2006).

El déficit hídrico resulta de una disponibilidad de agua menor a la evapotranspiración potencial (FAO, 2006) y en el caso de zonas áridas y semiáridas como Ovalle, el déficit hídrico es una condición normal durante el desarrollo de los cultivos, alcanzando los 1.382 mm al año (Santibáñez et al., 2017). La evapotranspiración varía a lo largo de la fenología del cultivo, y es afectada entre otras por las prácticas culturales y los manejos del riego, que pueden favorecer o disminuir los componentes evaporativos y transpirativos. En los Capítulos 4 y 5 se presentan manejos de riego deficitario controlado y estrategias de poda y enmiendas de suelo como alternativas frente a una condición de restricción hídrica aguda; sin embargo, en condiciones de año normal, con adecuada disponibilidad hídrica, igualmente es necesaria la correcta gestión del agua, la que no solo pasa por el uso de riego tecnificado y otras estrategias de manejo, sino por la adecuada elección de los cultivos.

Respecto a los tipos de cultivos, el olivo destaca en las zonas semiáridas por su alta capacidad productiva y de buen desempeño con bajos niveles de suministro hídrico, el cual alcanza valores de 500 a 700 mm por temporada (5.000 a 7.000 m³/ha) (Gucci et al., 2012). Por otra parte, la uva de mesa es un cultivo con una mayor demanda de riego en relación al olivo, por lo que es importante prospectar mecanismos de ahorro de agua. Las distintas variedades de vid muestran capacidades contrastantes en su tolerancia al estrés hídrico, ya sea por sus características morfológicas, fisiológicas o por su capacidad de cerrar estomas frente al estrés hídrico (Franks et al., 2007), presentando consumos de agua que en el caso de la uva de mesa pueden sobrepasar los 800 mm por temporada (8.000 m³/ha) (Sellés et al., 2012).

Dada la escasez hídrica en zonas semi-áridas, el riego tecnificado es una condicionante obligada para incrementar la eficiencia de riego y la calidad productiva en frutales, lo que se

asegura con un adecuado monitoreo del agua del suelo y la mantención del sistema de riego, entre otros (Niu et al., 2013; Callejas et al., 2014). El conjunto de malas prácticas de riego genera una pérdida de agua por percolación profunda o por evaporación directa desde la superficie del suelo, lo que implica un menor aprovechamiento del agua, debiéndose aumentar los esfuerzos para disminuir estas pérdidas, especialmente en zonas semi áridas (Guo et. al., 2006).

Existen diversas técnicas que buscan reducir las pérdidas de agua en huertos frutales. Dentro de estas prácticas, el uso de coberturas (mulch) en la superficie del suelo disminuye la incidencia directa de la radiación, reduciendo las pérdidas por evaporación directa desde el suelo (Kader et al., 2017). Además, el mulch puede reducir la lixiviación de fertilizantes y el crecimiento de malezas (Fuentes et al., 2013). Para el caso de la industria olivícola, la producción de aceite deja como residuo agroindustrial el alperujo, el cual es un producto alto en materia orgánica y rica en fenoles (Alburquerque et al., 2003), por lo que su reutilización en el país se limita a la aplicación directa en caminos o bien su disposición en piscinas de almacenaje, dado el riesgo de toxicidad que este tipo de residuos puede tener en la planta (Callejas et al., 2014). Una alternativa la constituye su compostaje, junto a los residuos de poda, teniendo efectos positivos a nivel nutricional en los cultivos (Alburquerque et al., 2007); sin embargo, su potencial utilización como mulch, tanto fresco como compostado, ha sido escasamente probado en el país.

Complementariamente, el uso de mallas de sombra sobre la canopia del cultivo disminuye de manera considerable la acumulación de calor en el dosel, generando un microclima que disminuye la pérdida de agua, tanto por evaporación directa desde el suelo como por transpiración de la planta (Sethi y Sharma, 2007). Finalmente, la aplicación de caolín o protectores foliares a la canopia, como es el caso de óxidos de Calcio, buscan disminuir la fotosaturación y/o aumentar el albedo, a través de un efecto de bloqueador solar, debido al aumento de la reflectancia de la luz, lo que repercute en una menor transpiración en hojas y fruta (Gindaba y Wand, 2005).

Considerando que la implementación de manejos agronómicos que busquen disminuir las pérdidas hídricas de los cultivos puede contribuir al aumento de la eficiencia del uso del agua, se hace necesario estudiar el efecto de dichos manejos sobre los componentes del balance hídrico en los principales cultivos de la Región de Coquimbo. Es así como en el presente capítulo se entregan los resultados de dos ensayos, el primero en olivos, donde se evaluó el efecto del uso de mulch de alperujo sobre la respuesta fisiológica y dinámica hídrica del sistema suelo-planta, además de evaluar el efecto del mulch como enmienda orgánica sobre las propiedades del suelo. Para el caso del segundo ensayo, establecido en un huerto de vid, se busca aportar con antecedentes respecto al ahorro de agua que se genera con el uso de mallas de sombra, aplicación de protector solar y utilización de mulch en la sobrehilera.

Metodología

El estudio en olivos se realizó en la Sociedad Agrícola y Ganadera Río Negro Ltda. (30°40'52.63"S, 71°23'26.18"O), ubicada en la localidad de Tabalí, en tanto el estudio en vid se realizó en la Agrícola Alfalfares (30°34'53.71"S, 71°15'21.08"O), ubicada en la localidad de Talhuén, ambas pertenecientes a la Comuna de Ovalle, durante la temporada 2017-2018.

En ambos casos el suelo corresponde a la Serie Tuquí (CIREN, 2005), que ocupa las terrazas altas del río Limarí, en la zona de Ovalle. Es un suelo plano, moderadamente profundo, de textura superficial franco arcillosa, que en profundidad presenta un sustrato de arcilla densa con presencia de carbonatos, lo que le confiere una alta retención de agua pero baja permeabilidad; además, presenta pedregosidad superficial de un 15%, la que se mantiene baja a lo largo del perfil.

El clima es característico del tipo semiárido con influencia marina, ya que presenta nubosidad abundante y lluvias invernales, con marcadas oscilaciones térmicas diarias. La precipitación promedio anual varía entre los 80 y los 120 mm, con una evapotranspiración potencial que varía entre los 1.132 y los 1.460 mm al año. La temperatura media anual es cercana a los 15°C; el mes más cálido es enero, con una máxima media de 28°C, en tanto el mes más frío es julio, con una mínima media de 6°C (Uribe et al., 2012; Dirección Meteorológica de Chile, 2016).

Ensayo en olivos

Se utilizaron olivos de la variedad Arbequina, de 8 años de edad, con una conducción súper intensiva en forma de setos, con plantas a 1,5 m en la sobrehilera e hileras a 4 m de distancia. Las hileras están orientadas norte-sur y poseen un sistema de riego por goteo, con una línea simple, con emisores de 4 L h⁻¹ ubicados a 0,75 cm en la sobrehilera. El control del riego se realizó considerando información de la estación climática del predio y los valores de Kc del cultivo.

En un diseño completamente aleatorizado, se establecieron 20 unidades experimentales de 7,5 m de largo y 1 m de ancho. Los tratamientos consistieron en la aplicación de mulch de alperujo sobre la línea de riego, generando 5 tratamientos con 4 repeticiones y 5 árboles por unidad experimental, dando un total de 100 árboles (20 árboles por cada tratamiento). Los tratamientos correspondieron al testigo sin mulch, más tratamientos que consistieron en aplicaciones de alperujo fresco (nominalmente nuevo: n) o compostado (nominalmente viejo: v), cada uno en 2 dosis, nominalmente baja y alta (b y a, respectivamente), según se detalla en el Cuadro 3.1. Se consideró una hilera de borde en los costados y una parcela de borde de 5 plantas para la homogeneidad del ensayo. Debido a que el alperujo nuevo contiene gran proporción de agua y el alperujo viejo está más seco, se plantearon dosis buscando equiparar la aplicación de materia seca, según se detalla en el Cuadro 3.1. Como se busca que el alperujo ejerza un efecto de colchón antievaporante, la aplicación se realizó sobre la línea de goteo (Imagen 3.1) en julio de 2018, repitiéndose la aplicación en unidades experimentales nuevas en julio de 2019.

Cuadro 3.1. Tratamientos del ensayo con aplicaciones de alperujo compostado (viejo) y fresco (nuevo), más el detalle de la dosis por unidad experimental (u.e.).

Tratamiento	Detalle	Dosis (m ³ /ha)	Dosis (L/u.e.)	Dosis (ton/ha)
T0	Sin alperujo	-	-	-
AVb	Alperujo viejo en dosis baja	20	60	8,0
AVa	Alperujo viejo en dosis alta	60	180	23,9
ANb	Alperujo nuevo en dosis baja	30	90	7,2
ANa	Alperujo nuevo en dosis alta	90	270	21,7



Imagen 3.1. Aplicación de alperujo fresco (izquierda), condición al cabo de un año (centro) y detalle de la actividad biológica (hifas de hongos, crecimiento de raicillas, presencia de artrópodos) al cabo de dos años (derecha).

Ensayo en vid

El ensayo se llevó a cabo en un huerto de uva de mesa variedad Red Globe, de 12 años de edad, con un sistema de conducción en parrón español, con un marco de plantación de 3m x 3m y que cuenta con un sistema de riego por goteo, con una línea de riego espaciada a 1 metro en la línea, con goteros de 2 L/h.

Los tratamientos se dispusieron en unidades experimentales de 9 plantas (tres hileras de tres plantas) en un diseño en bloques completamente aleatorizado, con 5 repeticiones por tratamiento, los cuales correspondieron a:

- T0: Testigo, plantas sin ningún método de ahorro de agua, fueron regadas definiendo un punto de recarga (aproximadamente un 50% de la humedad aprovechable) según el monitoreo continuo por sondas de capacitancia (Callejas et al., 2014) y características edáficas del perfil.

- T1: Plantas con un dosel cubierto por protector solar en base a óxido de calcio (Wallsun 33, AM Ecological), aplicado en dos dosis de 30 kg/ha (243 g por unidad experimental) a inicios de enero y mediados de febrero de 2019, mediante bomba de espalda y asegurando una dilución de 100 L de agua por cada kg de producto.
- T2: Plantas que en la superficie del suelo tienen mulch de 1 m de ancho de fibra plástica (malla Raschel monofilamento) en la sobre hilera, cubriendo la manguera de riego.

También se realizó un seguimiento descriptivo entre un grupo de 15 plantas cubiertas con malla de hebras monofilamento marca Protekta, la cual se instaló en una estructura a 1,5 m por sobre la canopia del parrón, de manera de contrastar el efecto de la malla sobre la dinámica del agua.

En ambos ensayos y para todos los tratamientos, se mantuvieron los manejos propios del campo, lo que incluyó el criterio en cuanto a monto y frecuencia de riego.

Evaluaciones

En ambos ensayos se realizaron mediciones periódicas de variables fisiológicas, lo que incluyó el potencial hídrico de prealba y de brote (al medio día solar) utilizando una cámara de presión tipo Scholander, además del intercambio gaseoso, el cual permite determinar la asimilación de CO₂ (A), la conductancia estomática (gs) y la transpiración (E), utilizando equipos IRGA (ADC LCi-SD, ADC LCPro+).

En el ensayo de vid se contó con estaciones meteorológicas bajo y fuera del tratamiento con malla. Para ambos ensayos, a través del uso de microlisímetros se evaluaron las pérdidas de agua por evaporación directa desde la superficie del suelo. Para esto se instalaron cilindros de PVC (microlisímetros) de 75 mm de diámetro y 10 cm de altura, rellenos con suelo no disturbado en su interior y una malla porosa en su base, de manera de asegurar el contacto con el subsuelo para no afectar procesos de percolación o ascenso capilar. Se instalaron en tres repeticiones de cada tratamiento, bajo la línea de goteo y a ras de suelo, asegurándose un mojamiento como consecuencia del riego. Entre 12 a 24 horas después de un riego, se tomó la masa del microlisímetro, proceso que se repitió a las 48 y 72 horas posterior al control del primer peso, expresando la pérdida de agua en mm por día.

Para evaluar el contenido de agua del suelo, se dispusieron sensores de humedad del tipo TDR (Decagon Devices) en la zona de mayor concentración de raíces, siempre bajo la proyección de la línea de riego, evaluando también la temperatura. Finalmente, en el ensayo de olivos, con miras a evaluar el efecto del alperujo como enmienda orgánica sobre las propiedades del suelo, al cabo de un año de aplicado el material se evaluaron propiedades físicas relevantes, lo que incluyó la densidad aparente, la distribución de tamaño de poros y la conductividad hidráulica saturada, además de un análisis de fertilidad completo, que incluyó muestras de alperujo nuevo y viejo.

Resultados

Los contenidos de agua en el suelo no se afectan de manera significativa con las aplicaciones de alperujo (Figura 3.2, arriba), aunque en altas dosis se promueve una menor temperatura (Figura 3.2, al medio).

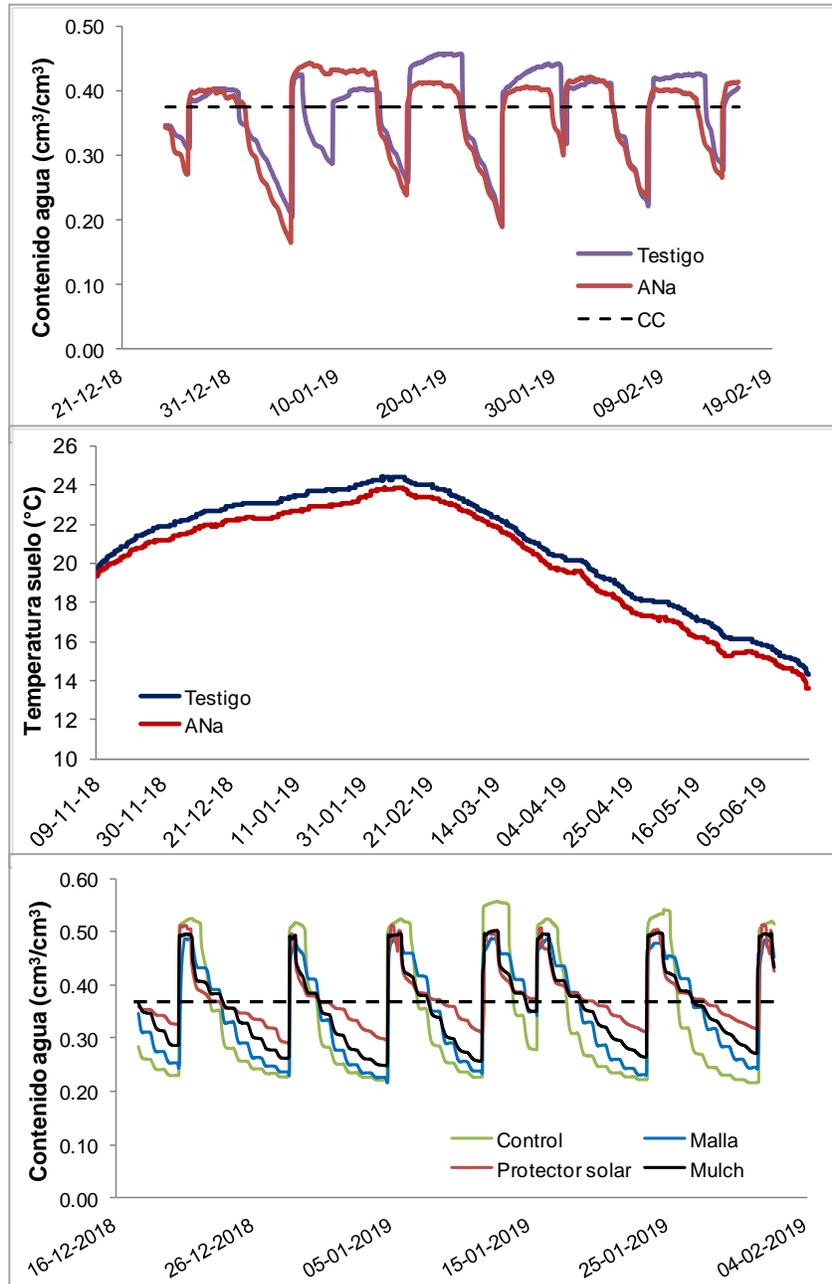


Figura 3.2. Dinámica del contenido de agua y la temperatura en función del tiempo en olivos (figura superior y media), considerando el testigo y la dosis alta de alperujo nuevo (Ana). Abajo se muestra el contenido volumétrico de agua del suelo para cada uno de los tratamientos del ensayo de vid. Se seleccionó el periodo de máxima demanda hídrica para el contenido de agua y un ciclo completo (primavera-invierno) para la temperatura. La línea segmentada representa la capacidad de campo medida en laboratorio.

A modo referencial, la Figura 3.2 presenta el contenido de agua a capacidad de campo (CC) determinado en laboratorio, pudiendo observarse que los ciclos de riego generan valores por sobre CC, lo que en suelos como el del estudio (texturas finas con arcillas densas en profundidad) pueden generar problemas por falta de aireación del sistema de raíces (Horn y Fleige, 2009). En el caso del ensayo en vid, se generan diferencias sólo en el nivel de llenado (Callejas et al., 2014), con una tendencia a un menor contenido de agua cercano a saturación cuando existe aplicación de alperujo.

El efecto de cobertura superficial del mulch previene la radiación directa sobre el camellón, generando una menor temperatura en relación a un suelo desnudo (Kader et al., 2017). En el sitio de estudio, la temperatura del suelo no desciende de 12°C ni sube por sobre los 25°C, por lo que no existen riesgos de daño en el sistema de raíces; sin embargo, en zonas más frías (Región Metropolitana al sur) la aplicación de alperujo en alta dosis podría generar una condición de suelo más frío y aislamiento térmico que podría aumentar el daño por las heladas.

En el caso del ensayo en vid (Figura 3.2, inferior), el testigo presenta las mayores variaciones en cada ciclo de riego, con los valores más altos por efecto del riego, una rápida caída posterior al riego y los menores valores previo al riego siguiente. La caída más suave del contenido de agua del suelo se genera en el tratamiento con protector solar, seguido del tratamiento con mulch sobre la platabanda, lo que indica la efectividad de éstos en disminuir el uso-consumo de agua. La fuerte caída del tratamiento testigo responde a un mayor consumo por parte de la planta, pero también responde a una mayor pérdida por evaporación directa (Figura 3.3), lo que se evita con el uso de mulch (Kader et al., 2017), indistintamente si es de malla o de alperujo de olivo. En el caso del protector solar, no se previene la evaporación directa desde el suelo, pero sí se genera un menor consumo de agua por efecto de la reflexión de radiación y probable menor temperatura del follaje (Gindaba y Wand, 2005).

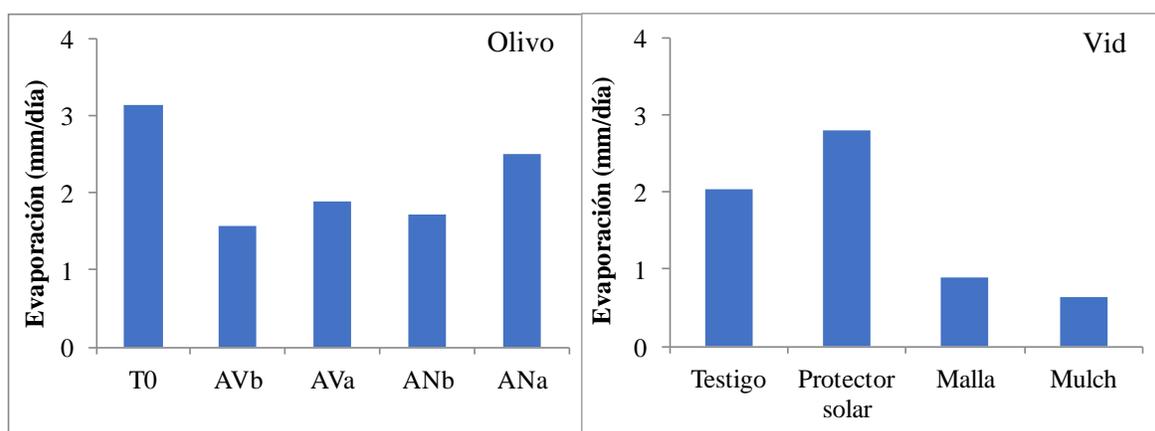


Figura 3.3. Evaporación directa desde el suelo en función de los tratamientos para el ensayo de olivo (izquierda) y vid (derecha). Mediciones realizadas en enero, mes de máxima demanda evapotranspirativa. Tratamientos de alperujo en Cuadro 3.1.

La disposición del alperujo sobre la línea de riego genera una pérdida por evaporación de aproximadamente un 60% del testigo, lo que durante la proyección de la temporada puede llegar a significar un ahorro mayor a 1.000 m³/ha. Este ahorro es en el contexto de un suelo arcilloso, con un bulbo de mojamiento amplio y alta capacidad de ascenso capilar una vez que se genera el gradiente por secado en la superficie. La dosis de alperujo no fue un factor determinante, por lo que bastan 20 m³/ha (8 ton/ha), aplicados a la sobre hilera, para cumplir con el objetivo de disminuir la evaporación. Aún así el alperujo nuevo en dosis alta (ANa, Figura 3.3, izquierda), al ser un material fino, genera una pasta de porosidad fina en superficie, probablemente con una semi-incorporación, por lo que genera una continuidad porosa, no siendo tan efectivo en la prevención de la evaporación.

En el ensayo en vid (Figura 3.3, derecha), la superficie descubierta del testigo y el tratamiento con protector solar generan los valores más altos de evaporación, al doble de lo presentado en los tratamientos con malla sobre el dosel y mulch en la sobre hilera. En el caso de la malla, la filtración de la radiación genera una menor evapotranspiración (Figura 3.4), tal como lo recomienda Sethi y Sharma (2007) como mecanismo para prevenir la fotosaturación; sin embargo, la malla a la vez disminuye la velocidad del viento, factor relevante para la remoción de la capa límite en el proceso de transpiración y fotosíntesis (FAO, 2006).

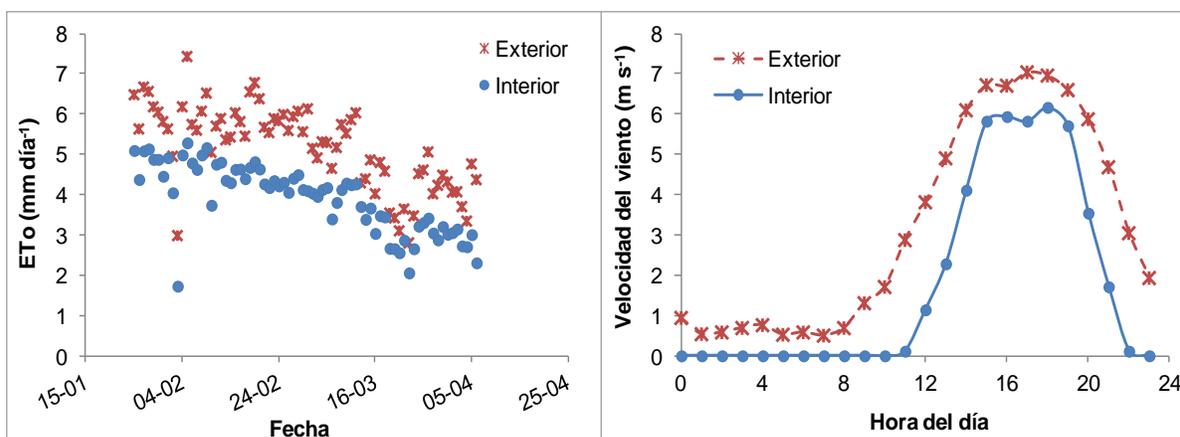


Figura 3.4. Evapotranspiración potencial (izquierda) en el parrón de vid de mesa sin malla (exterior) y bajo la malla (interior) y ciclo diario de velocidad del viento (derecha) bajo las mismas condiciones (asterisco: fuera de la malla; círculo: bajo malla).

Por otra parte, el mayor sombreado provocado por la malla determina que dicho tratamiento presente brotes más largos, tal como se muestra en la Figura 3.5. Estos resultados son promisorios pues el largo de brotes es muy dependiente de la disponibilidad de agua al interior de los tejidos para generar crecimiento. Este resultado debe tomarse con cautela, pues sombreados demasiado drásticos pueden afectar procesos de inducción y diferenciación floral, afectando el rendimiento, lo que podría ser especialmente crítico en parrones de la zona central de Chile, donde el vigor de las plantas es mayor.

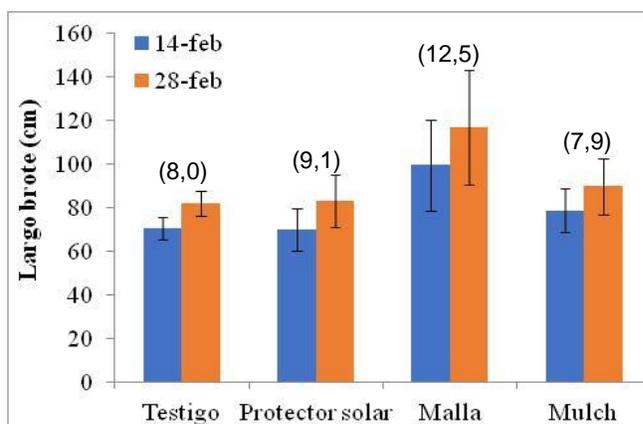


Figura 3.5. Largo de brotes en dos momentos de medición del ensayo en uva de mesa. Entre paréntesis se muestra la tasa de cambio (mm/día) del crecimiento de brote.

Para la primera fecha de evaluación, el tratamiento bajo malla sobre el dosel genera entre 20 a 30% de mayor longitud de brote, lo que aumenta ligeramente en la siguiente evaluación, explicando las tasas de crecimiento mayores (12,5 mm/día) cuando se utiliza esta tecnología en relación a doseles descubiertos (7,9 a 9,1 mm/día).

En cuanto al efecto nutricional del alperujo, el material fresco de la temporada (AN) presenta un pH ácido (5,2), con una conductividad eléctrica (CE) de 2,3 dS/m y un alto nivel de materia orgánica (MO = 84,5%), con un aporte de N, P₂O₅ y K₂O de 1,13%; 0,50% y 1,8%, respectivamente. El proceso de estabilización genera un material (AV) con pH cercano a neutro (7,4), un nivel de CE alto (5,8 dS/m) y un contenido de MO que se mantiene en torno al 84%. Además, los macronutrientes aumentan a niveles de 2,10%, 1,40% y 5,6% de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, con una relación C:N de 22,2, lo que equivale a un compost clase B. El efecto de la aplicación de estos materiales se observa en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Análisis de fertilidad de los tratamientos al cabo de un año de la aplicación del alperujo. Detalle de los tratamientos en Cuadro 3.1.

Tratamiento	pH	CE (dS/m)	MO (%)	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)
0-10 cm						
T0	7,7	2,8	3,6	42	29	767
AVb	7,6	2,0	6,3	49	67	1.263
AVa	7,7	1,9	12,8	55	74	2.150
ANb	7,4	2,9	4,6	45	52	1.123
ANa	7,4	2,4	4,9	50	80	1.701
10-30 cm						
T0	7,7	1,2	2,4	28	13	319
AVb	7,5	1,1	3,0	35	27	485
AVa	7,8	0,76	3,3	40	19	1.036
ANb	7,7	1,1	2,9	32	24	602
ANa	7,6	0,86	3,0	35	32	687

Si bien el alperujo nuevo (AN) posee un pH bajo, su aplicación al suelo es neutralizada, manteniendo niveles ligeramente alcalinos. Por otra parte, el incremento de la CE generado durante el proceso de estabilización no se refleja en el suelo, el que mantiene niveles no salinos (CE < 4,0 dS/m) y disminuye en profundidad. El alperujo nuevo, si bien posee un alto

nivel de MO, también posee un alto contenido de agua, por lo que no genera incrementos en el suelo comparables a los del material estabilizado. Aun así, los incrementos de MO promovidos por la aplicación de alperujo se concentran sólo en superficie, siendo proporcionales a la dosis aplicada. Dados los incrementos de MO (al menos un 1,0% mayor en los tratamientos respecto al testigo), es esperable un efecto positivo sobre las propiedades físicas del suelo, al menos en superficie (Abiven et al., 2009).

Respecto al contenido de nutrientes, el alperujo genera incrementos en los niveles de P y K, manteniendo el N en niveles medios, aunque todos ellos, como era esperable, disminuyen su concentración en profundidad. Es conocido el aporte de nutrientes del alperujo, particularmente de K (Albuquerque et al., 2007) pero igualmente se alcanzaron altos niveles de P_2O_5 , especialmente con las dosis mayores e indistintamente de la edad del alperujo. En cuanto al K_2O , se alcanzan niveles altos a excesivos, en especial con altas dosis y materiales estabilizados (AVa), afectando incluso el subsuelo. Esta condición eventualmente podría generar desbalances nutricionales (Taiz y Zeiger, 2006), por lo que es necesario controlar la dosis de alperujo y disminuir la fertilización potásica.

A pesar de la menor radiación generada por la malla, con un mayor crecimiento de brotes en vid (Figura 3.5), y las fuertes dosis de nutrientes aportados por el alperujo (Cuadro 3.2) en el cultivo de olivos, los diversos tratamientos no se ven afectados en su funcionamiento fisiológico, tal como se muestra en la Figura 3.6.

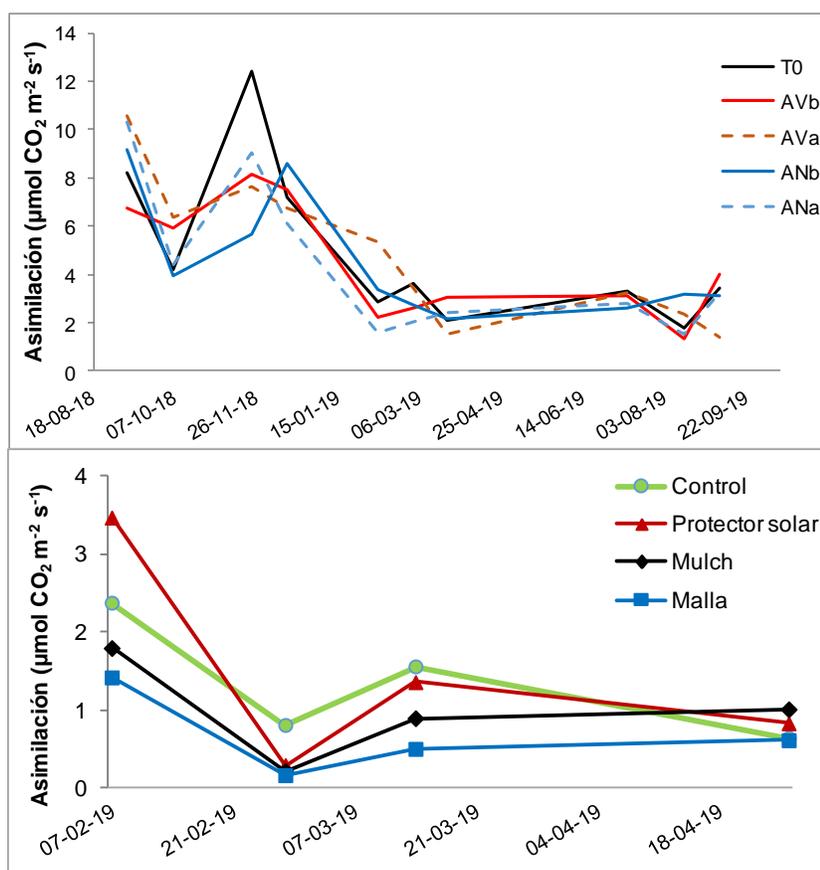


Figura 3.6. Asimilación neta en el tiempo de los tratamientos del ensayo de olivo (arriba) y uva de mesa (abajo).

Aun cuando en ciertos momentos de la temporada se observaron algunas diferencias entre tratamientos, las tendencias generales son las mismas y los valores se presentan en rangos esperados para plantas sanas y bien hidratadas (Guerfel et al., 2009; Li et al., 2017). Es decir, una alta dosis de alperujo no manifiesta síntomas de toxicidad o intoxicación, pudiendo utilizarse incluso en altas dosis (Chile Oliva, 2017), pero controlando cuidadosamente la fertilización potásica (Cuadro 3.2). Para el caso de la vid, el protector solar es efectivo en disminuir el consumo de agua (Figura 3.2), sin afectar la asimilación de C (Gindaba y Wand, 2005), lo que resulta en una gran ventaja si el propósito es aumentar la eficiencia de uso de agua.

Por otro lado, como consecuencia de la aplicación de alperujo estabilizado (AV), se generaron efectos benéficos sobre las propiedades físicas del suelo, según se muestra en la Figura 3.7.

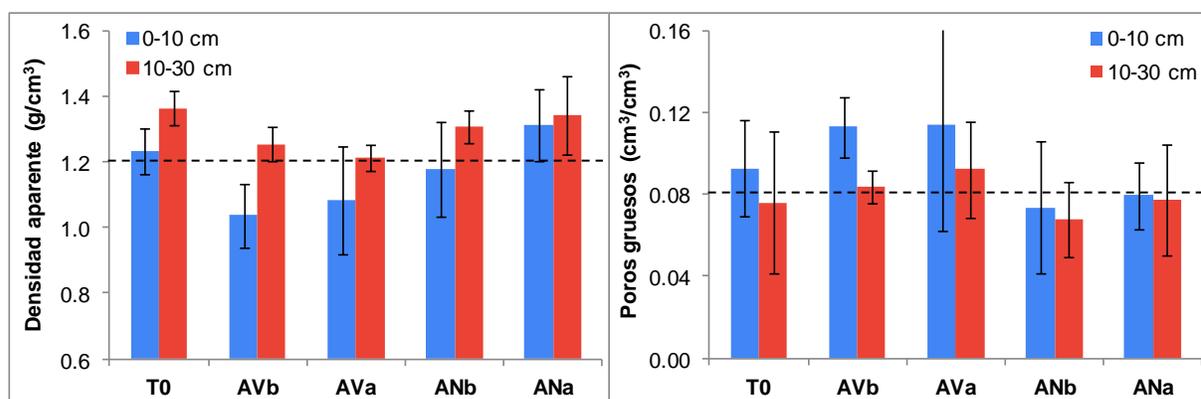


Figura 3.7. Densidad aparente (izquierda) y porosidad gruesa (derecha) en los tratamientos del ensayo en el huerto de olivos. Con línea punteada se presentan valores críticos.

En forma natural el suelo testigo (T0) presenta niveles de densidad aparente (D_a) medios, los cuales aumentan en profundidad por la presencia de una arcilla densa. El aporte de enmiendas estabilizadas genera una disminución de la densidad aparente, con un aumento de la porosidad total (Abiven et al., 2009), efecto que se logra con el alperujo de un año de antigüedad (AV), el cual desarrolla un proceso de estabilización biológica. La naturaleza del alperujo fresco, con un alto contenido de agua, favorece la formación de una pasta sobre el suelo (Figura 3.1), sellando la porosidad gruesa y provocando disminuciones de la porosidad de aireación (Figura 3.6, derecha). Horn y Fleige (2009) plantean un mínimo de 8% de poros gruesos ($0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) para el correcto desarrollo del sistema de raíces, lo que se logra sólo con el alperujo estabilizado (AV). Aun así, al cabo de dos años el alperujo fresco (AN) termina descomponiéndose (Figura 3.1), por lo que se espera tenga el mismo efecto que el alperujo viejo (AV) en el mediano plazo. Para finalizar, se observó que el equivalente de agua aprovechable presentó una relación lineal directa con la conductividad hidráulica, resultado que se presenta en la Figura 3.8.

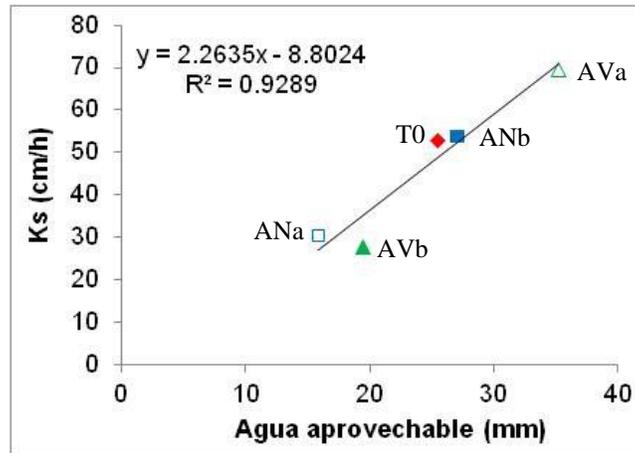


Figura 3.8. Equivalente de agua aprovechable (mm) y su relación con la conductividad hidráulica (cm/h) en el ensayo de olivos.

Si bien era esperable un mayor contenido de agua aprovechable en los tratamientos con aplicación de alperujo en altas dosis, sólo el material estabilizado (AV) generó dicho efecto, favoreciendo además una alta porosidad gruesa y una alta conductividad hidráulica saturada (Ks). De todas formas, la Ks en todos los casos se presentó en niveles altos, no siendo restrictiva para el funcionamiento del suelo y la distribución del agua de riego.

En cuanto a los resultados productivos, la Figura 3.9 presenta los rendimientos de cada ensayo, como un resultado integrador de los efectos fisiológicos de las cubiertas en vid y los efectos sobre propiedades físicas y nutricionales del suelo, en el caso del olivo.

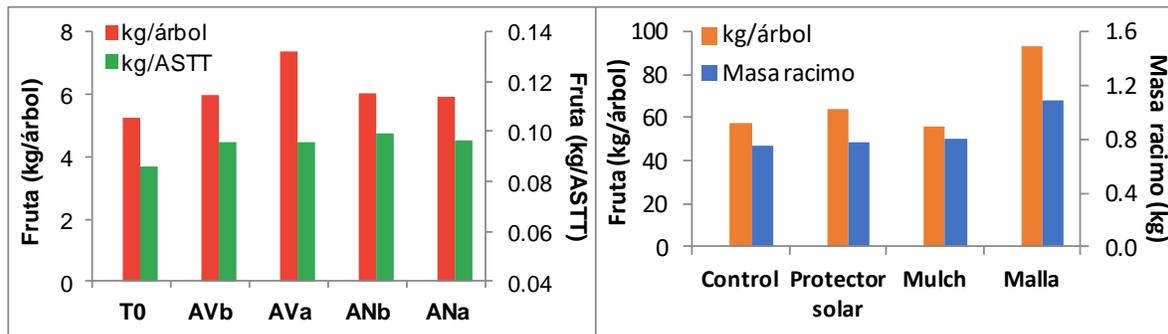


Figura 3.9. Producción en los ensayos de olivo (izquierda) y vid (derecha) en función de los tratamientos. ASTT es el área de sección transversal de tronco (cm²).

Los manejos en olivo generaron efectos positivos sobre la producción por planta, especialmente con aplicaciones de alperujo estabilizado en altas dosis (Figura 3.8, izquierda), dados los efectos conjuntos en las propiedades físicas y químicas, con mayor contenido de materia orgánica y nutrientes y una mayor proporción de poros de aireación, aunque cuando se expresa la producción por área de sección transversal de tronco dichas diferencias no son tan evidentes. Para el caso de la vid, el mayor crecimiento de brotes en el tratamiento con malla generó una mayor carga y racimos más grandes, lo que generó la mayor producción, sin diferenciarse los demás tratamientos respecto del control.

En definitiva, los manejos propuestos contribuyen a disminuir el consumo de agua, sin afectar el funcionamiento fisiológico y productivo de los cultivos, por lo que se presentan como opciones viables de manejo como contribución a sistemas productivos semiáridos.

Conclusiones

Dentro de los componentes del balance hídrico, los testigos en los ensayos en olivos y vid presentaron los mayores consumos de agua. En el caso del uso de mulch en la sobre hilera, se logra una disminución de la evaporación directa desde el suelo, indistintamente si se utiliza un material artificial o alperujo de olivas, aunque en este último caso las dosis altas generan una menor temperatura del suelo. La malla sobre el follaje disminuye la evapotranspiración potencial y la velocidad del viento, pero la menor interceptación de la radiación genera un mayor crecimiento vegetativo, con brotes más largos. Por su parte, el uso de protector solar sobre el follaje de la vid es efectivo en disminuir la interceptación de la radiación, favoreciendo el menor consumo de agua desde el suelo.

El uso de alperujo como mulch en la sobre hilera no afecta mayormente el pH y la conductividad eléctrica del suelo, pero sí favorece el incremento de la materia orgánica. Además, genera aportes de nutrientes, particularmente P y K, que en el caso de las dosis altas (>20 ton/ha) podría generar un exceso de K, con riesgo de desbalances nutricionales por una menor absorción de Ca y Mg. Por otra parte, los beneficios sobre las propiedades físicas del suelo se presentan con las aplicaciones de alperujo estabilizado en altas dosis, evidenciado en menores niveles de densidad aparente, mayor porosidad gruesa y de retención de agua aprovechable y mayor conductividad hidráulica; si bien el alperujo fresco se presenta como una pasta que no genera efectos inmediatos en las propiedades físicas del suelo, al cabo de dos años desde su aplicación presenta niveles avanzados de descomposición, con una alta actividad biológica en el suelo.

En términos generales los manejos propuestos no afectan negativamente el comportamiento fisiológico de la planta, incluso con altas dosis de aplicación de alperujo, por lo que el uso de este material puede ser incorporado a los manejos agrícolas como estrategia de fertilización y mejoramiento de propiedades físicas, aunque es recomendable un proceso de estabilización previa y un cuidadoso balance nutricional.

4. El riego en condiciones de restricción hídrica



Aline Vásquez
Sebastián Munizaga
Francisco Alfaro
Charlotte Hardy
Claudio Pastenes
Oscar Seguel

Introducción

En la Región de Coquimbo, el principal producto agrícola es la uva de mesa (Chaban, 2014), alcanzando las 8.159 hectáreas (ODEPA, 2018). Este frutal es altamente dependiente del agua de riego, por lo que eventos de sequía afectan directamente la producción (Santibáñez et al., 2008). En la región, la demanda hídrica del sector agrícola es mayor que la disponibilidad de agua (CORFO, 2015); en consecuencia, la superficie regada disminuye durante eventos de sequía, dejando plantaciones abandonadas, incurriendo en pérdidas económicas.

Por otra parte, el olivo se constituye como una alternativa productiva rentable y de menor requerimiento hídrico que la vid. En la Región de Coquimbo, del año 2015 al 2018 la superficie de olivo se incrementó de 3.719,5 ha a 3.904,6 ha, lo que corresponde a un incremento de 5%. Esta especie es un frutal de hoja persistente capaz de tolerar bajos contenidos de agua en el suelo y se destaca por poseer una alta capacidad de recuperación en cortos periodos de tiempo, por lo que es capaz de resistir suelos salinos, temperaturas extremas y sequía (Fernández, 2013).

En relación a lo anterior, se han implementado distintos manejos agrícolas con miras a utilizar de manera eficiente el agua de riego, como es el caso del **riego deficitario controlado** (RDC), que es una estrategia de reducción del aporte hídrico a la planta en distintos estados fenológicos, generando un estrés que no ocasiona pérdidas de rendimiento y calidad del producto (Romero et al., 2016). Este método genera una disminución en la cantidad de agua a utilizar como también un ahorro de energía y en los costos de producción, lo cual hace más competitiva la producción agrícola. Sin embargo, de no aplicarse bien en cuanto al monto y el momento, estas restricciones pueden generar una gran pérdida en la calidad y el rendimiento de las producciones agrícolas, por lo que se debe estudiar el momento fenológico óptimo y la intensidad de la reducción que no modifique estas variables (Sellés et al., 2006). Este manejo ha sido utilizado en distintos tipos de frutales para optimizar la **eficiencia de uso de agua** (EUA) en términos de la razón rendimiento/agua aplicada (kg m^{-3}).

En vides, un estrés hídrico moderado posterior a pinta no afecta fuertemente al fruto, y los efectos de un estrés en post cosecha implican principalmente una reducción en el crecimiento de raíces (Ferreira et al., 2001). Es decir, frente a un escenario de restricción hídrica, un menor aporte de riego de pinta en adelante no debiese ser perjudicial, debido a que en este periodo las pérdidas en rendimiento no son tan importantes; además, es necesario tener en cuenta que la demanda hídrica por parte de la agricultura hacia el final de la temporada sigue siendo alta, mientras que los caudales disponibles para riego son bajos (CORFO, 2015).

Por su parte, los frutos del olivo presentan tres etapas de crecimiento: en la primera se genera una multiplicación celular intensa, que determina principalmente el tamaño final de la semilla y el fruto; en la segunda fase se produce un crecimiento más paulatino que en la primera etapa y la oliva comienza a endurecer el endocarpo (Provedo, 2012). Posterior a este endurecimiento, se produce una tercera fase, que corresponde a un nuevo crecimiento acelerado, debido a la expansión que se provoca por el aumento del volumen de las células del mesocarpo, coincidiendo con la acumulación de aceite en los frutos (Fichet y Henríquez,

2013). Un estudio realizado en San Felipe, Región de Valparaíso, señala que una reducción del 40% de la evapotranspiración de cultivo (ETc) en la tercera etapa del crecimiento del fruto, no genera disminución en el peso y tamaño de frutos (Sellés et al., 2006). Además, una reducción en las fases II y III no afecta el número de frutos del árbol (Alegre et al., 2000). No obstante, una reducción durante toda la temporada reduce la carga frutal de las plantas.

Otra técnica de manejo del riego que permite aumentar la EUA, es el **desecamiento parcial de raíces** (DPR), el que consiste en separar virtualmente el sistema radical en dos zonas, una que se deja secar progresivamente, y la otra que se mantiene regada (Ennahli et al., 2015). Esta técnica busca la inducción de la síntesis de ácido abscísico generado en las raíces de la zona que se dejó secar, induciendo el cierre estomático. Por otra parte, la zona regada permite que el follaje mantenga su potencial hídrico, por lo que este componente del cierre estomático no estaría actuando, generando como respuesta global de la planta un cierre estomático parcial, reduciendo la tasa de transpiración en mayor medida que la asimilación de CO₂ (Rojas et al., 2007). Existe evidencia que en diversos tipos de cultivos el DPR permite aumentar la EUA (Shi et al., 2015; Mossad et al., 2017); sin embargo, en algunos ensayos en vid no se han obtenido resultados concluyentes, por lo que aún existe controversia sobre la efectividad del DPR, en particular en ensayos de terreno (Sadras, 2009; Romero et al., 2016). Al respecto, es probable que el efecto del DPR sea más difícil de controlar en suelos arcillosos, dada su variabilidad estructural y la amplia apertura de bulbos de mojamiento (Sellés et al., 2012).

Dados estos antecedentes, en el presente capítulo se entregan los resultados de dos ensayos, el primero en vid, donde compararon los efectos del desecamiento parcial de raíces y del riego deficitario en la eficiencia del uso de agua en uva de mesa, contrastando ambos manejos con un control sin restricción de riego. Para el caso de olivos, se aplicaron tratamientos de riego deficitario controlado, considerando intensidades de restricción hídrica de 50 y 70% en la fase III del crecimiento del fruto. En ambos casos se analizó la respuesta fisiológica de la planta, la eficiencia del uso del agua y el rendimiento y la calidad de la fruta, lo que incluye el rendimiento de aceite, en el caso del ensayo en olivos.

Metodología

El estudio en vid se realizó en la Agrícola Alfalfares (30°34'53.71"S, 71°15'21.08"O), ubicada en la localidad de Talhuén, en tanto el estudio en olivos se realizó en la Sociedad Agrícola y Ganadera Río Negro Ltda. (30°40'52.63"S, 71°23'26.18"O), ubicada en la localidad de Tabalí, ambas pertenecientes a la Comuna de Ovalle, durante la temporada 2016-2017.

En ambos casos el suelo corresponde a la Serie Tuquí (CIREN, 2005), moderadamente profundo, de textura superficial franco arcillosa, permeabilidad moderada y con pedregosidad superficial de un 15%; presenta pendiente en el rango del 1 al 3 %, ligera pedregosidad en el perfil y descansa sobre un sustrato de arcilla densa con presencia de carbonatos.

La zona presenta un clima semiárido con nubosidad abundante y lluvias invernales, donde la nubosidad provoca marcadas oscilaciones térmicas diarias. La precipitación promedio anual varía entre los 80 y los 120 mm, con una evapotranspiración potencial que varía entre los 1.132 y los 1.460 mm al año. La temperatura media anual es cercana a los 15°C; el mes más cálido es enero, con una máxima media de 28°C, en tanto el mes más frío es julio, con una mínima media de 6°C (Uribe et al., 2012; Dirección Meteorológica de Chile, 2016).

Ensayo en vid

El ensayo se montó en un parrón de uva de mesa variedad Red Globe de 10 años de edad, con un marco de plantación de 3m x 2,5m, regado mediante sistema de goteo en doble línea, las que se distanciaron a 0,5m desde la hilera de plantación. El control del riego se realizó mediante información de la estación climática del predio y los valores de Kc del cultivo de uva.

Los tratamientos se dispusieron en unidades experimentales (parcelas) de 9 plantas (tres hileras de tres plantas) en un diseño en bloques completamente aleatorizado, con 5 repeticiones por tratamiento, los cuales correspondieron a:

- Control: Testigo, riego en ambos lados de la hilera (100% de reposición de riego).
- DPR: Desecamiento parcial de raíces mediante riego alternado a cada lado de la hilera (50% de reposición de riego).
- RD: Riego deficitario, en ambos lados de la hilera (50% de reposición de riego).

Los tratamientos se establecieron desde pleno envero (24 de enero de 2017) hasta la entrada en receso (8 de mayo de 2017), justo antes de las precipitaciones invernales. Para DPR se regó un monto equivalente al 50% del riego, por lo que se utilizó una única línea de goteo para cada unidad experimental, separada a 0,5m desde la línea de plantación, con goteros de 2 Lh⁻¹ distanciados a 1m. Se cambió la línea de riego manualmente de un sector al otro en dos ocasiones, 31 y 84 días desde el inicio del ensayo. Los tratamientos de riego deficitario (RD) y el Control se regaron mediante dos líneas de goteo. En el Control se utilizaron goteros de 2 Lh⁻¹ distanciados a 1m, entregando el 100% del riego. Para RD se dispuso de dos líneas de goteo con goteros de 1,2 L h⁻¹ distanciados a 1,2 m, suministrando el 50% del riego. Con esta disposición de los tratamientos, se aplicó la misma frecuencia y tiempo de riego en todos los tratamientos, reponiendo el 50% del agua en los tratamientos DPR y RD.

Ensayo en olivos

Se utilizaron olivos de la variedad Arbequina, de 7 años de edad, en un marco de plantación intensivo, 4 m entre hileras y 1,5 m entre plantas, con una conducción súper intensiva en forma de setos. Las hileras están orientadas norte-sur y poseen un sistema de riego por goteo, con una línea simple, con emisores de 4 L h⁻¹ distanciados a 0,75 cm sobre la línea. Al igual que en el otro ensayo, el control del riego se realizó mediante información de la estación climática del predio y los valores de Kc del cultivo.

Los tratamientos se aplicaron durante la fase tres de crecimiento del fruto (FIII), disponiendo de parcelas de 9 plantas (tres hileras de tres plantas) en un diseño en bloques completamente aleatorizado, con 5 repeticiones por tratamiento, los cuales correspondieron a:

- T0: Sin restricción hídrica (control).
- T1: Restricción del 50% de riego del productor en la FIII crecimiento del fruto.
- T2: Restricción del 70% de riego del productor en la FIII crecimiento del fruto.

Los tratamientos se establecieron a partir del 16 de febrero del 2017, y se extendieron hasta la cosecha, a fines de mayo de 2017. Para el marco de plantación, el sistema de riego por goteo dispone de 2 goteros por planta (4 l h^{-1}). Para realizar las restricciones hídricas, se reemplazaron los emisores de riego según el caudal correspondiente a cada tratamiento (2 y $1,2 \text{ L h}^{-1}$) para T1 y T2 respectivamente, manteniendo la posición del gotero para no causar un efecto en el crecimiento de las raíces y, a su vez, dejando los emisores originales en el tratamiento control. Esto permitió aplicar la misma frecuencia y tiempo de riego en todos los tratamientos, generando las restricciones hídricas en T1 y T2.

Evaluaciones

En ambos ensayos se realizaron mediciones periódicas de variables fisiológicas: Potencial hídrico de prealba y de brote (al medio día solar) utilizando una cámara de presión tipo Scholander, además del intercambio gaseoso, el cual permite determinar la asimilación de CO_2 (A), la conductancia estomática (gs) y la transpiración (E), utilizando equipos IRGA o sus equivalentes (ADC LCi-SD, ADC LCPro+).

Para el caso de la vid, se evaluaron los distintos componentes del rendimiento al momento de cosecha (20 de marzo, 2017), lo cual incluyó el número de racimos por planta, el peso de racimos, el número de bayas por racimo (seleccionando al azar 3 racimos de cada unidad muestral) y el peso y diámetro de la baya, además de algunas variables de calidad (calibre, color, sólidos solubles). El detalle de las evaluaciones y sus resultados se pueden encontrar en Munizaga (2019).

Para el caso del olivo, cada 15 días se cosecharon cinco frutos por planta al azar y se midió su diámetro ecuatorial y polar, además del peso fresco y seco. A la cosecha (mayo 2017), se colectaron todos los frutos de cada árbol central y se pesaron para obtener la producción total por árbol; además se estimó el peso promedio de fruto en una muestra de 100 frutos por árbol, determinando el peso de la pulpa y el porcentaje de aceite en la pulpa. El rendimiento de aceite se estimó multiplicando el rendimiento de fruta fresca (kg fruta/planta) por la fracción de peso de pulpa y por el porcentaje de aceite en la pulpa. El detalle de las evaluaciones y sus resultados se pueden encontrar en Vásquez (2019).

En ambos ensayos se calculó la eficiencia de uso de agua a nivel foliar (IRGA) y a nivel de cultivo, en este último a partir del control del riego con caudalímetros en las líneas de goteo (vid) o con el control del tiempo y números de riego en la temporada (olivo). Complementariamente, se llevó un control del agua en el perfil del suelo con sondas FDR.

Para comparar los tratamientos, las variables que fueron medidas una vez en la temporada fueron analizadas mediante un ANDEVA; en caso de encontrar diferencias significativas entre los tratamientos se realizó una prueba de comparación múltiple de LSD Fisher, con un nivel de significancia de 5%. En las variables que se midieron periódicamente, se utilizó un ANDEVA con medidas repetidas en el tiempo, considerando como parcela principal el tratamiento de riego y como parcela secundaria los días desde el inicio del tratamiento (DIT); en caso de encontrar diferencias estadísticamente significativas, se realizó la prueba de comparación múltiple de LSD Fisher, con un nivel de significancia del 5%.

Resultados

Condiciones climáticas y ahorro de agua durante los ensayos

En la Figura 4.1 se presenta la variabilidad en la evapotranspiración de referencia (ET₀) obtenida a partir de la estación meteorológica “Talhuén”, perteneciente a la red de estaciones “Ceazamet”. Además se presenta la ET₀ acumulada desde el inicio del ensayo y las fechas de cosecha.

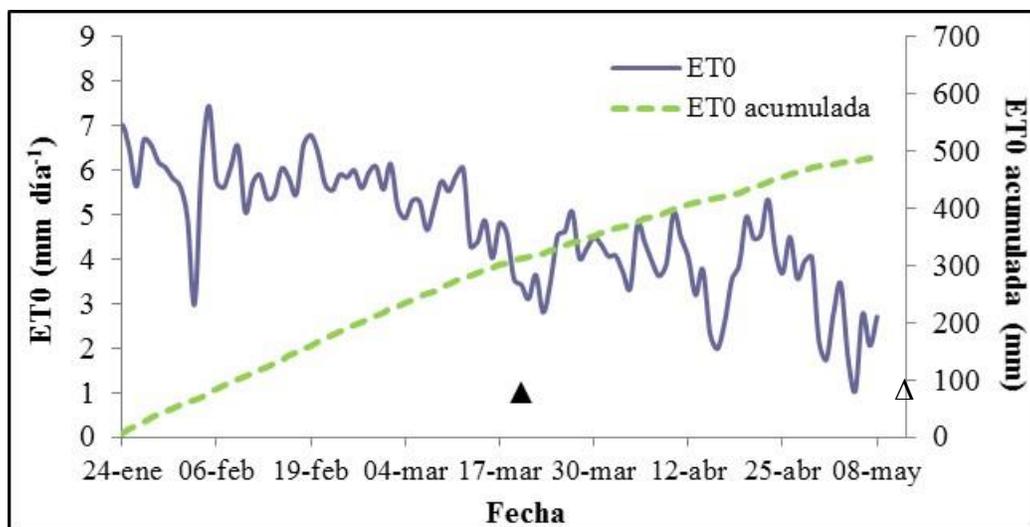


Figura 4.1. Valores de ET₀ desde la implementación de los tratamientos (año 2017); ET₀ acumulada desde el inicio del ensayo y fecha de cosecha de la vid (▲) y los olivos (Δ).

Durante el año 2017 las condiciones climáticas fueron las típicas de un verano de clima mediterráneo con altas temperaturas, registrando una máxima de 34,2°C en febrero y una mínima de 1,8°C en junio; por su parte, la ET₀ disminuye gradualmente hasta mayo, estabilizándose durante la época invernal en torno a los 2 mm día⁻¹, sin cambios importantes para la etapa final del ensayo de olivos. Como es característico de la región, no existieron lluvias durante el verano, sin embargo, entre el 10 y el 12 de mayo de 2017 se registró un total de 143 mm de precipitación, lo que generó una recuperación de las plantas de olivo; para el caso de la vid, éstas ya se encontraban en receso. Posteriormente se registraron lluvias de menor magnitud, con valores máximos de 1,5 mm, totalizando 157,6 mm. A pesar de la intensidad de las lluvias en mayo, dada la baja pendiente y la alta retención de agua en los

sitios de los ensayos, no se registraron pérdidas por escorrentía superficial o por percolación en profundidad.

Para el caso del ensayo en uva de mesa, los montos de riego fueron de $9.607 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para el Control y $7.574 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para los tratamientos sometidos a restricción hídrica (DPR y RD). Con la implementación de los tratamientos a partir de pinta, se entregó la mitad del agua de riego del Control mediante la disminución del caudal de goteros (RD) y de una línea de goteo (DPR); **de esta manera, se logró disminuir en un 21,16% el volumen de agua aplicada en toda la temporada.** En este ensayo no ocurrieron precipitaciones durante el desarrollo del cultivo.

En el caso del olivo, las plantas con restricción de riego a partir de Fase III de crecimiento recibieron un aporte de riego total de $3.447 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en T1 (50% de restricción) y $3.079 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en T2 (70% de restricción) durante la temporada, **lo cual generó un ahorro de 21,1 y 29,5% en la cantidad total de agua en comparación con las plantas control,** que se regaron con $4.368 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Sólo considerando la fase III, las plantas regadas en forma normal recibieron $1.841 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mientras que las de T1 y T2 recibieron respectivamente 921 y 552 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$, lo que resulta de extrema relevancia si se considera un escenario en que la disponibilidad de agua de riego disminuye fuertemente hacia el final de la temporada. Al considerar las lluvias existentes a partir de mayo de 2017, con plantas de olivo aún activas, se llegó a un equivalente de $5.944 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para plantas T0, y de 5.023 y 4.655 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para plantas con restricción de 50% y 70% del riego, respectivamente. Estos valores equivalen a un aporte de agua en toda la temporada de 84,5% y 78,3% para T1 y T2 respecto al tratamiento testigo, destacando la función del suelo como almacén de agua.

Fisiología de la vid

La respuesta en el tiempo de las variables de intercambio gaseoso y potencial de tallo (Figuras 4.2 y 4.3) presentan una tendencia general a disminuir a medida que transcurre el ensayo (días desde iniciados los tratamientos, DIT), manteniéndose el Control en la mayoría de los casos por sobre los tratamientos de restricción hídrica. Esta respuesta puede ser dividida en dos etapas: una fase inicial (hasta 31 DIT), donde se puede diferenciar de mejor manera el efecto de los tratamientos sobre las variables de intercambio gaseoso (E, A y gs) y potencial de tallo (ψ_t). Se identifica una segunda fase, de 41 a 108 DIT, donde se aprecia una disminución y estabilización de estas variables.

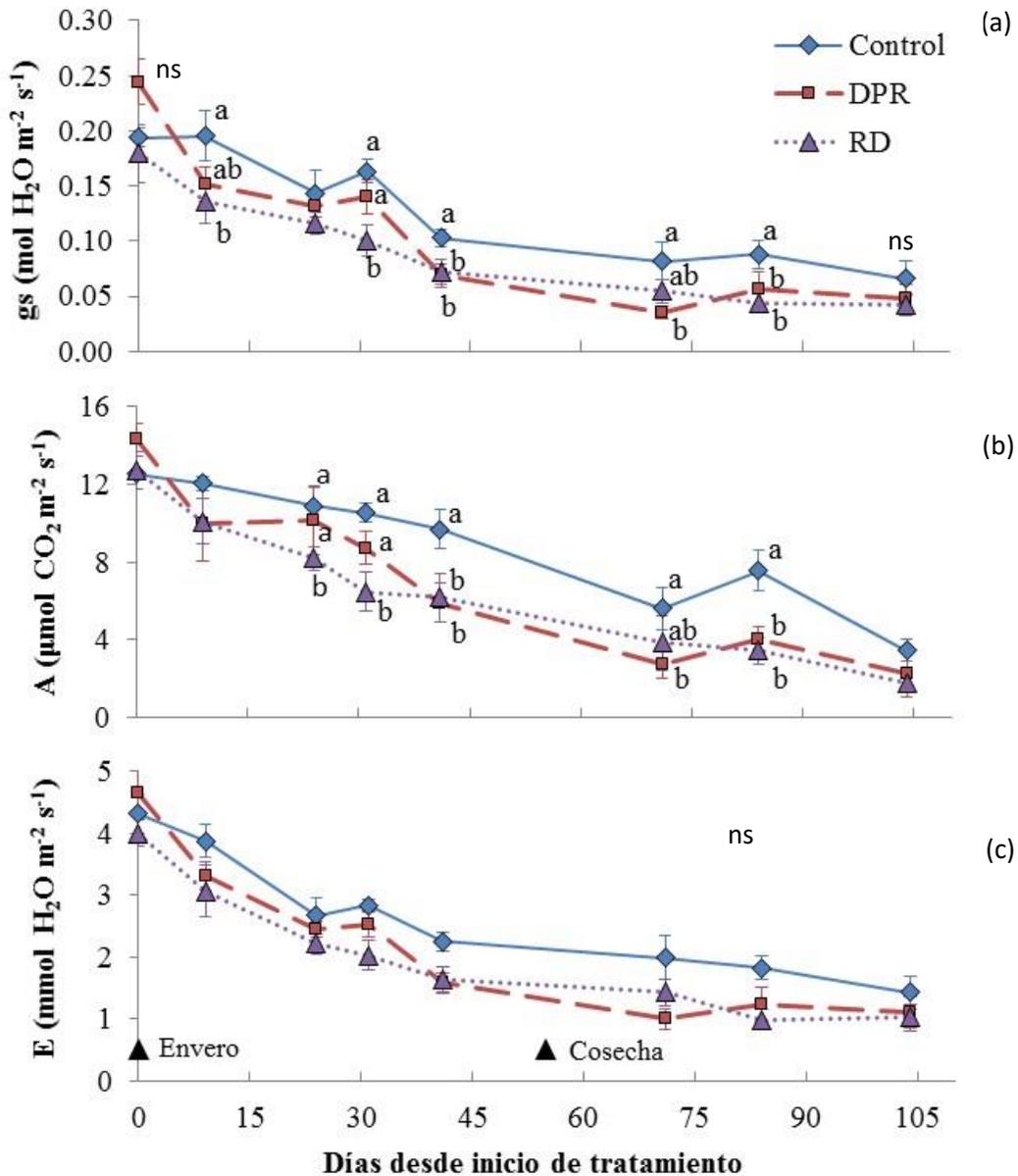


Figura 4.2. Respuesta en el tiempo de: (a) conductancia estomática (g_s); (b) asimilación de CO_2 (A); y (c) transpiración (E), para los tratamientos de riego (deseccamiento parcial de raíces, DPR, riego deficitario, RD y Control). Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas para cada fecha de medición ($p < 0,05$). n.s. indica que no hay diferencias significativas. Barras verticales indican error estándar.

La conductancia estomática (g_s) del Control en la fase inicial presentó valores que se acercan los obtenidos por Li et al. (2017) en uva de mesa variedad Red Globe (bajo condiciones de riego óptimas y suelo de textura franca). Sin embargo, en este mismo periodo el tratamiento RD y DPR presentaron un estrés hídrico moderado (entre 0,15 y 0,05 mol $\text{H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) según la clasificación propuesta por Cifre et al. (2005), acercándose a los valores observados en vid bajo condiciones de restricción hídrica (Chaves et al., 2007). En la fase final del ensayo el Control se mantuvo en condiciones de estrés moderado, en tanto los tratamientos de

restricción hídrica alcanzaron niveles de gs que indican un nivel de estrés severo, en rangos cercanos a tratamientos sin riego.

Producto de la disminución de la gs, se vio afectada la asimilación de CO₂ (A). En la fase inicial no se presentaron diferencias entre los tratamientos hasta el día 24, donde los mejores tratamientos fueron DPR y el Control. Al igual que en el caso de la gs, se produjo una disminución importante de A hacia la fase final, sin embargo el Control no presentó una disminución tan drástica como los tratamientos de restricción hídrica, manteniendo la mayor A hasta la última fecha, donde alcanzó el mismo nivel que los tratamientos de restricción hídrica. Los valores de A obtenidos por Li et al. (2017) coinciden con los obtenidos por el Control al inicio del ensayo; sin embargo el decrecimiento general responde a la fenología del cultivo al acercarse al receso invernal. El hecho que los tratamientos de restricción hídrica se hayan mantenido bajos se explica porque se acercaron más al nivel de estrés severo; bajo estas condiciones, se producen reducciones más intensas de A, predominando las limitaciones no estomáticas de la fotosíntesis (Cifre et al., 2005).

La transpiración (E) fue menos sensible a la disminución en la conductancia estomática, no diferenciándose entre la fase inicial y la final (Figura 4.2c); además no se encontraron diferencias entre los tratamientos. Sin embargo, se aprecia una tendencia del tratamiento Control a mantenerse más alto que los tratamientos de restricción hídrica.

El comportamiento del potencial de tallo (ψ_t) a lo largo del ensayo (Figura 4.3) presenta una respuesta similar a la de la conductancia estomática. En la etapa inicial se encuentran diferencias a partir del día 24, donde el Control presentó el ψ_t menos negativo y RD el ψ_t más bajo. Por su parte, el DPR inicialmente mantuvo el ψ_t en un valor intermedio, aunque más cercano al Control, pero a partir del día 31 disminuyó al nivel de RD, a pesar que en esta misma fecha mantuvo su conductancia estomática al nivel del Control, lo que es indicador de un comportamiento anisohídrico (Hugalde y Vila, 2014). En la fase final, al igual que en gs y A, se aprecia una caída abrupta en el ψ_t , para todos los tratamientos, incluido el Control, aunque este último presenta una recuperación hacia el final del ensayo.

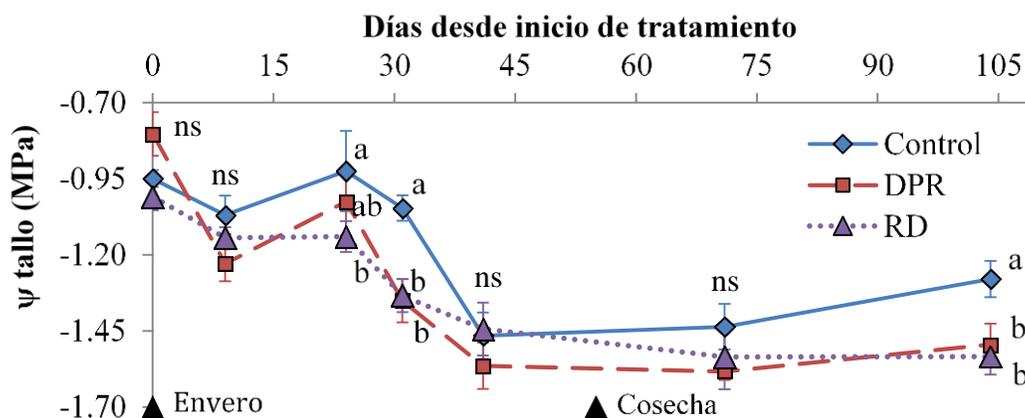


Figura 4.3. Potencial de tallo a través del tiempo en tratamientos de riego (desecamiento parcial de raíces, DPR, riego deficitario, RD y Control). Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas para cada fecha de medición ($p < 0,05$), barras indican error estándar.

De acuerdo a los niveles de estrés hídrico definidos por Van Leeuwen et al. (2009), en la fase inicial el Control se mantuvo en el rango de estrés hídrico de moderado a leve (de -0,9 a -1,1 MPa), en tanto RD a partir 9 DIT alcanza un estrés hídrico de moderado a severo (de -1,1 a -1,4 MPa). Por su parte, DPR alcanza un estrés de moderado a severo 9 DIT, recuperándose a los 24 DIT, para luego volver a descender al nivel de RD 31 DIT. Hacia la fase final del ensayo, ψ_t alcanza niveles de estrés hídrico severo ($<-1,4$ MPa) para todos los tratamientos, el que se mantuvo hasta el final del ensayo, exceptuando al Control, que logra una recuperación en la última fecha de medición.

Sellés et al. (2012) evaluaron distintas variedades de uva de mesa bajo distintos niveles de reposición hídrica, en un sitio con condiciones evapotranspirativas en torno al 90% de la evapotranspiración calculada en el presente ensayo. El potencial hídrico de tallo obtenido por los tratamientos a los que se suministró cerca del 100% de la ET_c , varió de 0,51- MPa a -0,94 MPa, valores superiores a los obtenidos en el presente ensayo, incluso para el tratamiento Control. Este comportamiento se explica en parte por una deficiente distribución de raíces en el suelo, producto de procesos de compactación favorecidos por la textura fina en el sitio del estudio, lo que en provoca que el sistema radical no sea capaz de suplir la demanda transpirativa de manera eficiente. Es así que resulta fundamental generar las óptimas condiciones físicas de suelo para favorecer la exploración radical, de manera de hacer más eficientes los manejos implementados.

Fisiología del olivo

Como se observa en la Figura 4.4, el potencial de tallo no presentó diferencias significativas sino hasta mediados de marzo de 2017 (aproximadamente 40 días desde iniciado los tratamientos), donde los árboles con tratamiento más restrictivo (T2) mostraron menores valores de potencial, respondiendo a un mayor estrés que los otros dos tratamientos.

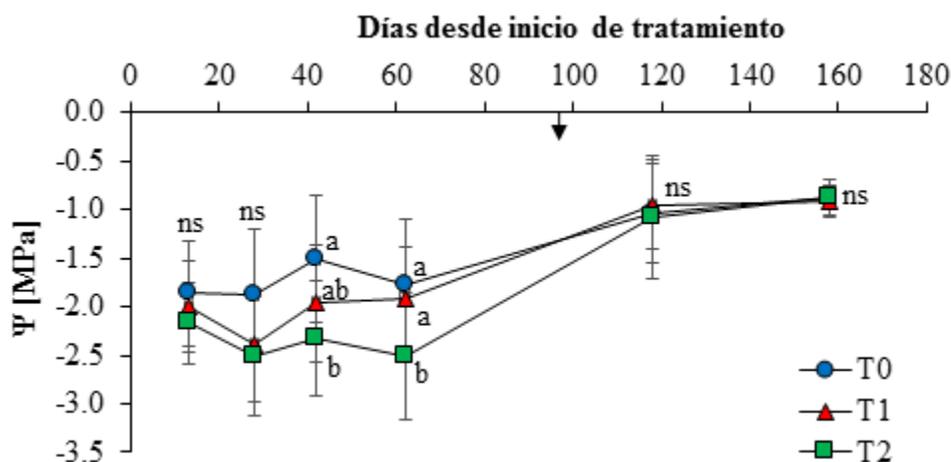


Figura 4.4. Evolución del potencial hídrico de brote en olivos sometidos a estrés hídrico (50 y 70% de restricción, T1 y T2) en la fase III de crecimiento del fruto. Flecha indica lluvia (143 mm). Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas para cada fecha de medición ($p < 0,05$), barras indican error estándar.

Para olivos bien regados en fase III de crecimiento de fruto se han observado valores de $\psi_t > -1,5\text{MPa}$ (Iniesta et al., 2009). Los tratamientos con restricción hídrica obtuvieron valores de ψ_t que se situaron entre -2 a -3 MPa, niveles que han sido reportados en olivos sometidos a diferentes tipos de restricción de riego desde endurecimiento de carozo a cosecha bajo manejo de riego deficitario controlado (Caruso et al., 2017; Kremer et al., 2018). Finalmente, la Figura 4.5 presenta las variables derivadas del intercambio gaseoso.

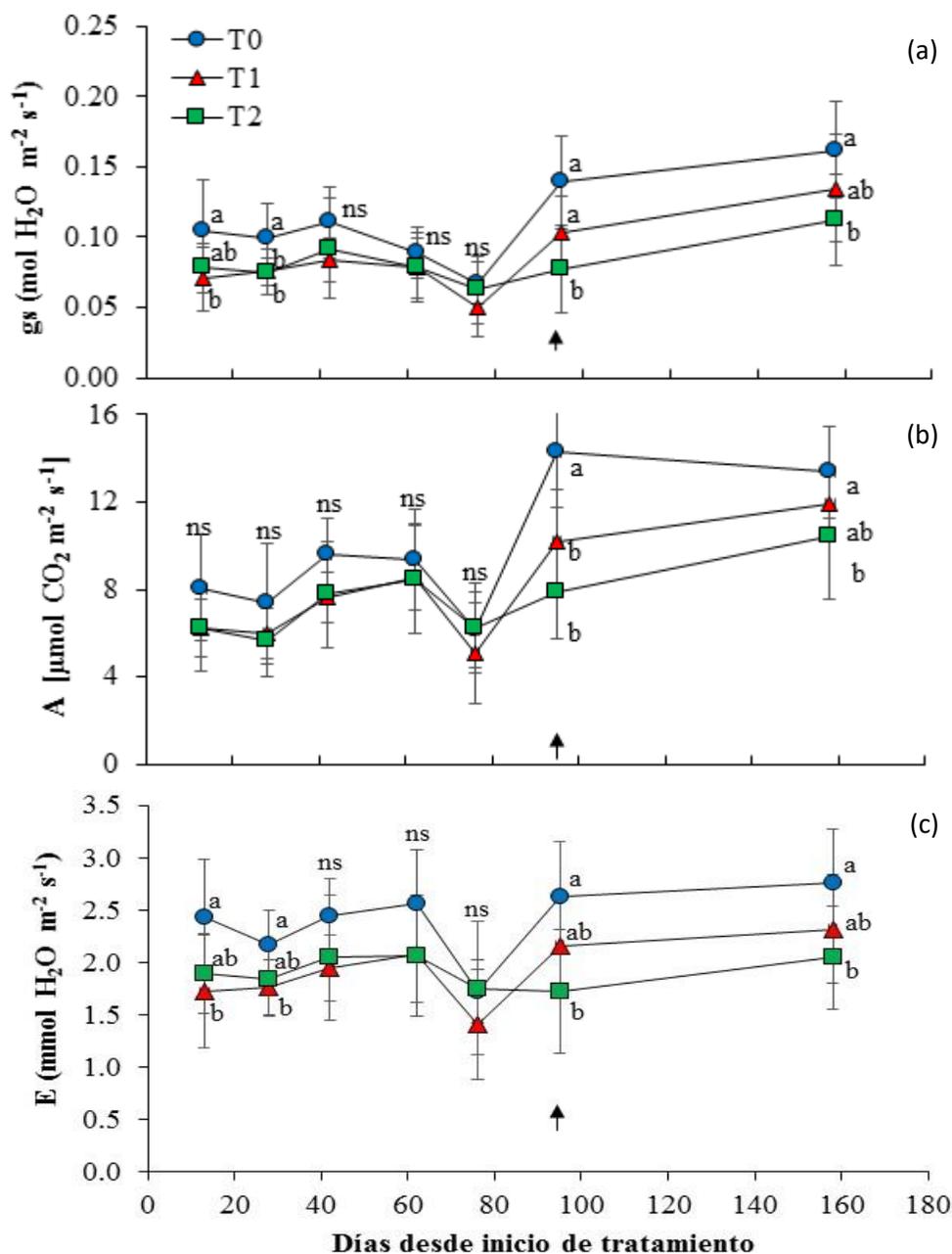


Figura 4.5. Respuesta en el tiempo de: (a) conductancia estomática (g_s); (b) asimilación de CO_2 (A); y (c) transpiración (E), para los tratamientos de riego en olivos. La flecha indica lluvia intensa. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas para cada fecha de medición ($p < 0,05$). n.s. indica que no hay diferencias significativas. Barras verticales indican error estándar.

En un comienzo, en las primeras dos fechas de medición (13 y 28 días desde inicio de tratamiento), los tratamientos mostraron diferencias en gs debido a la alta demanda atmosférica que existía en los días de verano (Figura 4.5a); posteriormente, los tratamientos se mantuvieron sin diferencias y presentaron cierres estomáticos con una caída aproximadamente a los 70 DIT debido a un aumento particular de la ETo en la medición de abril. En mayo (día 100 aproximadamente) se presentaron lluvias que alcanzaron los 143 mm en tres días, lo que provocó un aumento en la apertura estomática de todas las plantas, aunque en esta alza se lograron diferenciar las restricciones hídricas, donde plantas con un riego menor no lograron alcanzar valores similares a las plantas control, como un mecanismo de protección frente al estrés hídrico acumulado previamente, de manera de prevenir una posible caída excesiva del potencial de tallo (Marino et al., 2018).

Los valores más altos de conductancia estomática se obtuvieron post lluvia en todos los tratamientos, lo que coincide con Puertas (2011), quien señala que olivos de la var. Arbequina sometidos a restricción hídrica en la fase III de crecimiento de fruto, obtuvieron los valores de gs más altos de la temporada sin importar el tratamiento aplicado. Así, la conductancia estomática es un parámetro fisiológico que responde sensiblemente a las condiciones ambientales, variando en función de la demanda atmosférica más que a tratamientos de restricción hídrica (Marino et al., 2018).

A diferencia de la gs, en la primera etapa de la fase III, los árboles tendieron a registrar valores similares de A, sin diferenciarse significativamente hasta ocurridas las precipitaciones, donde los olivos bajo restricción hídrica se diferenciaron de manera proporcional respecto al control (Figura 4.5b). Aun así el comportamiento de la A, al igual que gs, responde a otros factores ambientales o de manejo, escondiendo los efectos de la restricción hídrica en la primera etapa de medición. En árboles sin estrés hídrico, se presentaron valores en el rango de 6 a 15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante el periodo de ensayo, mientras que las plantas que tuvieron estrés mostraron rangos entre 5 a 11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, rangos que coinciden con otros estudios, donde plantas bien regadas presentaron valores entre 15 y 20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en tanto en plantas con estrés este valor disminuyó a un rango entre 5 y 11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Hernández-Santana et al., 2017).

En un estudio realizado en Túnez (Guerfel et al., 2009), se sometieron plantas de olivo de dos variedades (Chetoui y Chemlali) a un déficit hídrico hasta alcanzar punto de marchitez permanente, observándose que la fotosíntesis neta disminuyó significativamente en función de los días desde impuesto el estrés, en comparación a plantas regadas. Ello coincide con la descripción de este frutal a su adaptación a climas mediterráneos, ya que soporta periodos extensos sin lluvias, veranos cálidos y una limitada disponibilidad de agua, lo que confiere mecanismos fisiológicos que le permiten responder al contenido de agua restringido en el suelo.

Por su parte, la transpiración (E) se comportó de manera similar a la gs, donde inicialmente en las dos primeras fechas se diferenciaron significativamente los olivos de T0 de los de T2. Posteriormente, en las siguientes tres fechas de medición (42, 62 y 76 DIT) no se encontraron diferencias entre tratamientos, sino hasta después de ocurridas las precipitaciones, donde los tratamientos se diferenciaron en función del grado de restricción hídrica. Existe evidencia que la asimilación neta de carbono y la transpiración se ven afectados en similar magnitud

por un riego deficitario controlado (Fernandes-Silva et al., 2016); sin embargo, con estrés hídrico más intenso, la transpiración se ve más afectada que la fotosíntesis y por ende existiría una mayor eficiencia de transpiración, que además responde rápidamente a condiciones ambientales, mostrando sus mayores valores cuando la demanda evapotranspirativa es menor y post lluvias (Hernandes-Santana et al., 2016). Así, el olivo se presenta como una especie que responde de mejor forma a las restricciones hídricas en relación a la vid, presentando comportamientos similares a controles regados y una rápida respuesta de recuperación una vez que se repone el agua.

Respuesta productiva a los manejos

Respecto al ensayo en vid, el Cuadro 4.1 los atributos más importantes de la baya y la producción de uva en función de los tratamientos.

Cuadro 4.1. Atributos de bayas por tratamiento y producción expresada en número de racimos por planta, peso de racimos y rendimiento por planta en el ensayo en vid (cosecha año 2017).

Tratamiento	Atributos de la baya			
	Diámetro (mm)	Peso (g)	Volumen (cm ³)	Sólidos solubles (°Brix)
Control	26,92 (±2,59) a	12,69 (±3,40) a	11,88 (±2,98)	17,18 (±1,55)
DPR	27,26 (±2,31) a	12,89 (±2,84) a	12,29 (±2,32)	16,29 (±1,47)
RD	26,14 (±2,46) b	11,30 (±2,87) b	11,38 (±3,28)	16,56 (±1,50)
	Producción			
	Pre ajuste	Racimos por planta (#) Cosecha	Peso racimos (g)	Rendimiento (kg/planta)
Control	36,7 (±6,0)	28,8 (±9,1)	887,1 (±176,0)	27,0 (±12,6)
DPR	39,6 (±2,4)	33,4 (±4,7)	1030,9 (±72,7)	30,3 (±9,9)
RD	42,4 (±7,9)	34,6 (±5,5)	946,9 (±158,9)	29,1 (±9,7)

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Existe evidencia que el déficit hídrico puede producir mermas en el rendimiento final de la vid (Zúñiga-Espinoza et al., 2015), sin embargo, dependiendo del periodo fenológico en el que se aplique el déficit hídrico, afectará de distinta forma los componentes del rendimiento. Si la restricción hídrica se aplica antes de pinta, es posible esperar un mayor efecto en el tamaño y número de bayas, producto de la inhibición en la división celular; sin embargo, si la restricción hídrica se aplica después de pinta, se pueden mantener los rendimientos en relación a un control regado (Sellés et al., 2012).

Se aprecia un efecto del riego deficitario (RD) en el diámetro y peso de baya, con valores significativamente menores en relación a DPR y el Control. Destaca el DPR, con los mayores valores en todos los atributos de la baya y componentes de rendimiento, con excepción de la concentración de sólidos solubles, donde el Control presentó el mayor promedio. Ferreyra et al. (2006) observaron que el diámetro de bayas var. Crimson Seedless en pinta corresponde

al 83% del tamaño final, por lo que si se aplica una restricción hídrica posterior a este momento el efecto en el tamaño final de la baya no será tan importante como un déficit hídrico previo. Romero et al. (2016) en un ensayo donde se compararon vides variedad Monastrell sometidas a DPR y RD, concluyeron que DPR presentó el mejor desempeño respecto del rendimiento. Por otra parte, Bozkurt y Yazar (2017) en un ensayo en uva de mesa variedad Royal, compararon DPR y RD en dos niveles de restricción (75 % ETc, 50 % ETc), encontrando diferencias en el diámetro de bayas en ambos niveles, con un mayor diámetro para DPR que RD.

Para el caso de los racimos, se realizó un ajuste de carga con el objetivo de homogenizar la producción y la calidad de la fruta, seleccionando entre 28 y 35 racimos a cosecha. El peso de racimo está determinado por el número y peso de bayas; el número de bayas no depende de la restricción hídrica en el periodo que esta fue aplicada (Guilpart et al., 2014), sino de los manejos realizados en campo, como es el despunte, entre otros manejos de arreglo de racimos. Sin embargo, la cantidad de bayas por racimo presentó ligeras diferencias, donde el tratamiento Control tuvo un promedio de 93,0 bayas por racimo, DPR 99,5 y RD 99,3, sin diferencias estadísticamente significativas. Si bien el peso de bayas fue menor para RD en relación a DPR y el Control, esto no se vio reflejado en el peso de racimos, debido a que este parámetro presenta una alta variabilidad. Así, el rendimiento final por planta no se vio afectado por los tratamientos, destacando el DPR con el mayor rendimiento por un mayor peso de racimos y similar carga frutal respecto a los otros tratamientos.

Respecto al crecimiento del fruto del olivo (Figura 4.6), en las dos primeras mediciones no se observaron diferencias entre tratamientos, pero a partir de principios de abril (aprox. 60 DIT), la fruta de los olivos bien regados obtuvo mayor peso que la fruta proveniente de plantas con déficit. Esta tendencia se mantuvo hasta cosecha, donde los olivos del T1 lograron tener fruta con peso similar a las plantas sin déficit hídrico.

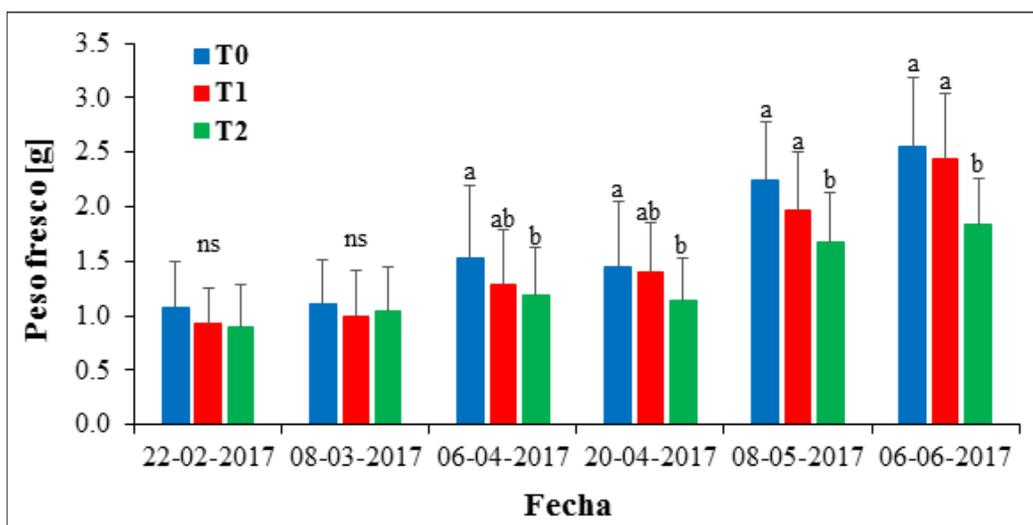


Figura 4.6. Evolución del peso fresco de los frutos de olivos var. Arbequina sometidos a estrés hídrico durante fase III de crecimiento del fruto. Letras diferentes por fecha, indican diferencias estadísticas significativas según prueba LSD de Fisher ($\alpha < 0,05$). n.s. sin diferencia significativa.

Para una restricción hídrica moderada (T1), el mecanismo de adaptación que tiene el olivo le permite a los frutos mantener su peso durante este periodo. Por otro lado, restricciones de riego mayores (T2) mostraron un menor peso fresco de fruto, lo que coincide con el trabajo de Ahumada-Orellana et al. (2017), quienes indican que el peso fresco de frutos con déficit hídrico severo (restricciones de riego de 60-70% de la ETc) es menor en comparación con olivos bien regados o con déficit moderado.

En general el déficit hídrico moderado mantendría valores de peso fresco de frutos similares a olivos bien regados, debido a que este frutal puede tolerar de mejor manera estreses hídricos en ciertos periodos o momentos (como el endurecimiento de carozo) en donde son menos sensible a la falta de agua (Gucci et al., 2019). Este resultado se opone a lo descrito por Moriana et al. (2003), donde en 4 tratamientos de restricción (control, riego con 75% ETc y luego reposición del riego normal, riego con 75% ETc y luego sequía, y un tratamiento en secano), los tratamientos con restricción hídrica no generaron diferencias de peso fresco con respecto a la fruta de los olivos control. Es por esto que se debe mantener un control permanente de los efectos de largo plazo del RD sobre la calidad y rendimiento del olivo. Al respecto, el Cuadro 4.2 presenta los resultados productivos del ensayo.

Cuadro 4.2. Atributos de la fruta y rendimiento (fruta y aceite) de olivos sometidos a estrés hídrico en fase III (cosecha año 2017). Promedio \pm DS.

Tratamiento	Atributos de la baya		
	Peso fruto (g)	Diámetro ecuatorial (mm)	Diámetro polar (mm)
T0	2,55 (\pm 0,62) a	15,12 (\pm 1,32) a	17,45 (\pm 1,63) a
T1	2,44 (\pm 0,60) a	15,10 (\pm 1,47) a	17,28 (\pm 1,38) a
T2	1,83 (\pm 0,43) b	13,51 (\pm 1,23) b	15,71 (\pm 1,08) b
Tratamiento	Producción		
	Aceite (% bs)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	
		Fruta fresca	Aceite
T0	45,36 (\pm 2,84)	13,82 (\pm 7,82) a	2,96 (\pm 1,74) a
T1	44,40 (\pm 2,93)	13,36 (\pm 5,54) ab	2,91 (\pm 1,37) a
T2	44,31 (\pm 2,97)	10,12 (\pm 6,76) b	1,81 (\pm 0,98) b

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

El mayor nivel de estrés hídrico generado por T2 resultó en frutos de menor peso y menores diámetros, con diferencias significativas respecto a los otros tratamientos. Sin embargo, no hubo diferencias significativas en el porcentaje de aceite, coincidente con lo expuesto por Ahumada-Orellana et al. (2018) y Caruso et al. (2017), quienes señalan que los tratamientos de riego deficitario no varían el contenido de aceite, tanto en base fresca como seca. Esto genera que las diferencias en el rendimiento de aceite (t ha⁻¹) se deban principalmente a la disminución del tamaño de fruto y no a la variación de aceite acumulado en el fruto en la fase III de crecimiento. Lo anterior hace referencia a la capacidad de acumulación de aceite por parte del mesocarpo o pulpa, donde se forman y acumulan los ácidos grasos en la última etapa del crecimiento del fruto de olivo, por lo que al disminuir el peso de fruto hay menor pulpa disponible para la acumulación de aceite y un menor rendimiento de kg aceite ha⁻¹ en

árboles con un riego deficitario severo (Gómez del Campo y Rapoport, 2008). Esto coincide con lo expuesto por Puertas et al. (2011), quienes realizaron ensayos con déficit hídrico en distintas intensidades y a cosecha las plantas con mayor estrés presentaron frutos con menor peso fresco y con una relación mesocarpo/endocarpo menor, por ende un menor rendimiento de aceite en comparación con olivos bien regados o con estrés hídrico moderado.

El resultado de rendimiento de fruta fresca no se vio afectado por la carga frutal, debido a que el efecto de restricciones hídricas en su última fase de crecimiento de fruto no varía la cantidad de fruta por planta, la cual se define en etapas anteriores, donde se señala de gran importancia la sexta y séptima semana desde floración (Caruso et al., 2017). Al respecto, T0 presentó el mayor rendimiento de fruta fresca, seguido de T1, ambos con diferencias significativas respecto a T2, tal como se ha observado en plantas de olivos sometidas a déficit hídrico, las cuales pueden presentar hasta un 25% menor rendimiento que los olivos control (Iniesta et al., 2009). Esta merma de rendimiento se explica principalmente por la disminución del peso promedio de fruto de los tratamientos con déficit, aunque también se ha reportado un menor número de frutos por planta en tratamientos de restricciones hídricas (Sellés et al., 2006). Aun así existe evidencia que, incluso con restricciones de riego de 66% de la ETc desde inicio de endurecimiento de carozo a cosecha, no se presentaron diferencias en el rendimiento de fruta por árbol con respecto a olivos con riego de 100% ETc (Puertas et al., 2011), lo que abre nuevos desafíos para entender el comportamiento productivo de la especie, dependiente de múltiples factores, aparte del riego.

En cuanto al rendimiento de aceite, el tratamiento con 30% de reposición de riego (T2) presentó valores más bajos que T0 y T1, lo que indica que esta restricción es muy severa y genera pérdidas en el rendimiento final de aceite, debido a una producción de frutos más pequeños, con menor proporción de mesocarpo. Esto resulta en una pérdida importante en producción considerando que esta variedad es comúnmente usada para la elaboración de aceite. Diversos autores señalan que el riego deficitario controlado mantiene el rendimiento de aceite mientras la restricción de agua oscile entre 15 – 50% del volumen total aplicado a plantas sin restricciones hídricas (Iniesta et al., 2009; Gómez del Campo, 2013; Gucci et al., 2019), pero una restricción producida en la fase I de crecimiento de fruto, caracterizada por la división celular, necesariamente disminuirá el número de células del fruto y por ende su tamaño final, afectando el rendimiento de fruta y aceite (Hernández-Santana et al., 2017).

Finalmente, se evaluó la eficiencia en el uso del agua, para el caso de la vid a nivel de hoja (EUAi) y a nivel de cultivo (EUAc); para el caso del olivo, se evaluó la EUA para la producción de fruta fresca y de aceite, resultados que se presentan en el Cuadro 4.3. Respecto a la EUAi de la vid, Romero et al. (2014) encontraron que el tratamiento de DPR presentó una mayor EUAi que RD en el periodo entre brotación y cuaja, sin embargo estos manejos no se diferencian si se aplican entre pinta y cosecha. A su vez, Romero et al. (2016) indican que DPR presentó una mayor EUAi respecto de RD en post cosecha para tratamientos bajo restricción hídrica leve, a diferencia de lo ocurrido en el presente ensayo, donde la restricción hídrica alcanzó niveles de estrés severos. El-Ansary y Okamoto (2007) compararon tratamientos de DPR y RD en uva de mesa entre pinta y cosecha, observando un aumento de EUAi de DPR en mayor medida que RD, sin embargo en mediciones posteriores RD alcanzó el nivel del DPR, manteniéndose ambos por sobre el Control.

Cuadro 4.3. Eficiencia del uso de agua a nivel foliar (EUAI) y de cultivo (EUAc) en el ensayo de vid y EUA para el rendimiento de fruta y aceite en el ensayo de olivos. Datos de cosecha temporada 2017. Valores promedios \pm DS. Letras diferentes por columna, indican diferencias estadísticas significativas según prueba LSD de Fisher ($\alpha < 0.05$).

Tratam	Ensayo vid		Tratam	Ensayo olivo	
	EUAI ($\mu\text{mol CO}_2$ $\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$)	EUAc (kg m^{-3})		EUAfruta (kg fruta m^{-3} agua)	EUAaceite (kg aceite m^{-3} agua)
Control	74,48 ($\pm 18,85$)	3,29 ($\pm 1,34$) b	T0	2,86 \pm 1,79 b	0,61 \pm 0,40
DPR	70,90 ($\pm 24,80$)	5,02 ($\pm 0,66$) a	T1	3,26 \pm 1,61 a	0,71 \pm 0,32
RD	72,14 ($\pm 21,09$)	4,63 ($\pm 1,42$) ab	T2	3,00 \pm 1,04 b	0,55 \pm 0,32

Para la EUAc se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, donde DPR presentó el mayor rendimiento por unidad de agua aplicada, siendo significativamente mayor al Control, dado los volúmenes de agua aplicados durante la duración del ensayo; RD presentó un valor intermedio, sin diferencias significativas con DPR y el Control. Dos Santos et al. (2003) evaluaron el efecto de DPR y RD en vides destinadas tanto a la producción de vino como de mesa, encontrando con ambos manejos un aumento de alrededor de 80% en la EUAc en toda la temporada respecto de un control regado. Sadras (2009) en un meta análisis respecto al manejo del riego, concluyó que el aumento en la EUAc en vid producto del DPR se debe principalmente a la disminución en el volumen de agua aplicada a los tratamientos y no a un mejor desempeño a nivel fisiológico de DPR respecto de RD. Este autor explica la discordancia entre los resultados de EUAI y EUAc por la diferencia que se genera entre la respuesta a nivel fisiológico de corto plazo y el efecto de largo plazo que finalmente afecta el rendimiento.

Para el caso del ensayo en olivos, la EUA en términos de kg de fruta m^{-3} de agua aplicada mostró diferencias significativas entre los tratamientos, donde plantas con RD moderado (50%) presentaron una mayor EUA, debido a que lograron mantener su rendimiento con un menor aporte hídrico respecto al control regado. Por otro lado, en plantas con estrés severo (T2) se vio reducido tanto al aporte de agua como el rendimiento, por lo que el valor de EUA no mejoró en relación a T0. Por otra parte, la EUA en función al rendimiento de aceite no mostró diferencias significativas entre tratamientos; sin embargo, se estableció una tendencia, presentando los olivos de T1 una EUAaceite mayor que los otros dos tratamientos. Así, el olivo presenta una respuesta positiva de la EUA al RD moderado, valorizando el recurso hídrico frente a un escenario de escasez; sin embargo, restricciones de riego severas afectan el rendimiento, no presentando diferencias significativas con plantas bien regadas (Guerfel et al., 2009).

Conclusiones

El efecto fisiológico esperado para el desecamiento parcial de raíces (DPR) en vid variedad Red Globe es efectivo sólo cuando la restricción hídrica alcanza niveles de estrés de leve a moderado ($-0,9 > \psi_t > -1,1$ MPa; $0,15 > g_s > 0,05$ $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Un estrés hídrico severo

produce una caída importante en la asimilación de CO₂, en mayor medida que la transpiración.

El rendimiento por planta en la vid no se ve afectado significativamente por la restricción hídrica después de pinta, sin embargo, DPR mejora el peso y diámetro de bayas respecto del riego deficitario (RD).

Los tratamientos de restricción hídrica en vid (DPR y RD) aumentan el rendimiento por unidad de agua aplicada (EUAc) respecto de un control regado, sin una ventaja significativa del DPR por sobre el RD, pero con un 21% de ahorro de agua respecto al control regado.

Para el caso de los olivos, la restricción hídrica en fase III de endurecimiento de carozo genera una disminución de la fotosíntesis, la conductancia estomática y la transpiración de manera proporcional al grado de estrés hídrico.

La restricción de 50% de riego en fase III del olivo produce un estrés moderado en la planta, lo que no genera cambios en el crecimiento del fruto y por ende en su peso a cosecha. Así, no se altera la producción final de fruta respecto al control regado, permitiendo un ahorro de 21% de agua en el periodo estudiado, con aumentos significativos en la EUA de fruta fresca. Sin embargo las plantas con restricción de 70% de riego produjeron un estrés severo, afectando negativamente la producción de fruta por unidad de superficie.

El porcentaje de aceite no se vio afectado por ningún tratamiento, por lo que el estrés moderado no presentó diferencias en rendimiento de aceite respecto al control regado. No obstante, la producción de fruta en plantas con restricción severa disminuyó en comparación con los olivos control, por lo que el rendimiento de aceite en árboles con estrés severo fue estadísticamente menor.

5. El riego en sequía severa (sobrevivencia del huerto)



Arantza Garay
Ricardo Quintana
Oscar Seguel
Claudio Pastenes
Francisco Alfaro
Charlotte Hardy

Introducción

Pese a las innovaciones y a los avances tecnológicos del último tiempo, la agricultura mundial se encuentra enfrentando nuevos desafíos para garantizar la seguridad alimentaria y energética de manera sustentable, tanto desde un punto de vista social como medioambiental (National Research Council, 2010). En este contexto, el cambio climático es uno de los factores que introduce nuevas dinámicas e incertidumbres a la producción agrícola, en particular en zonas áridas, donde se proyecta una disminución de las precipitaciones, un aumento en la variabilidad de éstas y una mayor recurrencia de periodos de sequía (Crane et al., 2011; Santibáñez et al., 2014).

Si bien los efectos del cambio climático afectan a numerosos rubros, es la actividad agrícola la más vulnerable, en especial en zonas áridas o semi áridas con clima mediterráneo, donde el agua es el recurso más limitante para la producción de alimentos (Hueso et al., 2012). Esto se hace particularmente importante en la producción frutal, con presencia de especies con ciclos de vida largos, las cuales requieren el aseguramiento de la disponibilidad de agua en cantidad y calidad adecuada y de manera permanente en el tiempo (Sadras, 2009).

Por ejemplo, el palto requiere grandes volúmenes de agua para una producción comercial que garantice la rentabilidad del huerto, siendo además sensible a los excesos de sales, por lo que ante un evento de sequía el cultivo se ve seriamente dañado (Ferreira et al., 2012). Por su parte, la vid se presenta como un cultivo de bajo requerimiento hídrico, en particular si el objetivo es la producción vitícola, donde el manejo con déficits hídricos resulta en aplicaciones de riego cercanas al 50% de un huerto destinado a fruta fresca (Sellés et al., 2012); en particular, la Región de Coquimbo presenta un buen potencial enológico en las zonas con influencia marina (Montes et al., 2012), destacando el cultivar Chardonnay, con 744,5 ha plantadas en la Región (ODEPA, 2015). Finalmente, el olivo se caracteriza por su habilidad para crecer en condiciones de restricción hídrica (Díaz-Espejo et al., 2006), lo que la hace una especie atractiva para cultivar en las zonas áridas del país, con un potencial de producción de aceite y aceitunas de alta calidad, que vuelve interesante y promisorio el desarrollo de este negocio (Mora et al., 2013). Estos casos, a diferencia de los cultivos anuales, corresponden a una inversión a largo plazo, por lo que al producirse una sequía que los afecte, las pérdidas económicas serán sustantivamente mayores en relación a los cultivos de ciclo corto (Franck y Muñoz-Aravena, 2014).

En la región de Coquimbo, el proceso de desertificación ha forzado a los productores a adoptar prácticas agronómicas que disminuyan las pérdidas de agua del sistema, aprovechando de mejor manera su uso y asegurando una producción sostenible en el tiempo, especialmente considerando eventos de sequía por periodos prolongados (Souvignet y Heinrich, 2010). Los esfuerzos han apuntado a mejorar los sistemas de conducción de agua, tecnificación de los sistemas de riego y aseguramiento de la disponibilidad de agua a través de la construcción de embalses (CAZALAC, 2015). Sin embargo, los eventos de sequía son cada vez más recurrentes e intensos, por lo que es fundamental favorecer la respuesta y recuperación de los ecosistemas frente a un evento de este tipo (Santibáñez et al., 2014).

Por lo antes expuesto, se hace indispensable contar con herramientas de gestión del recurso hídrico a nivel intra-predial, para darle la mayor utilidad al agua que ingresa al sistema,

implementando prácticas agronómicas ligadas al suelo y a la planta que minimicen los efectos de la sequía. Al respecto, la FAO (2005) señala que las medidas para afrontar la escasez hídrica deben ir enfocadas a aumentar la capacidad de retención de agua en el suelo, la eficiencia en su uso y la capacidad de resiliencia de las plantas para combatir de buena manera escenarios de sequías.

Una de las prácticas asociadas al incremento y aprovechamiento del agua disponible en el suelo es la aplicación de materia orgánica (Seguel et al., 2013), ya que ésta favorece la agregación y la estabilidad estructural frente al agua y las cargas mecánicas, incrementando el agua aprovechable y la persistencia de la porosidad; además, el contenido de materia orgánica del suelo está íntimamente ligado con la calidad general de éste, afectando positivamente sus propiedades físicas, químicas y biológicas, incluso en condiciones climáticas extremas (Hueso et al., 2012; Song et al., 2014). Junto con promover una mayor disponibilidad de agua, las enmiendas orgánicas favorecen la proliferación y el aumento de la diversidad de los microorganismos, favoreciendo la actividad biológica del suelo y el reciclaje de nutrientes (Pascual et al., 2007).

Por otra parte, si la planta se ve expuesta a condiciones hídricas adversas, como es el caso de una sequía, se producirá un cierre estomático, con lo que disminuirá la transpiración y aumentará la temperatura foliar, pudiendo ocasionar muerte de tejidos (Cochard et al., 2002). Es por esto que una poda severa podría contribuir a solucionar este problema, ya que una reducción del área foliar reduce la transpiración, disminuyendo la necesidad de agua por temporada, lo que potencialmente se puede traducir en una mejora del estado hídrico de las plantas (Jiménez-Casas y Zwiazek, 2013) para una pronta recuperación post-sequía.

La respuesta de un ecosistema ante un estrés tiene dos componentes: la resistencia y la resiliencia, los que, en conjunto, determinan la estabilidad del ecosistema; la resistencia es la capacidad inherente del sistema para soportar alguna perturbación, en tanto la resiliencia se refiere a la capacidad que tiene para recuperarse luego de esa perturbación (Hueso et al., 2011). Ante un estrés hídrico, la planta busca mantener el equilibrio entre oferta y demanda, siendo la respuesta más inmediata limitar la transpiración a través del cierre de los estomas, provocando que la concentración de carbono en el espacio intercelular disminuya, limitando así la fotosíntesis (Grassi y Magnani, 2005). Qué efectos tiene esto sobre la productividad del sistema agrícola y qué capacidad tienen los cultivos de recuperarse una vez repuesto el riego resulta crucial para la agricultura de zonas áridas. Así, en este capítulo se entregan los resultados fisiológicos y productivos de manejos de poda y enmiendas de suelo en los tres cultivos principales de la Región (vid, palto y olivo) bajo un escenario de sequía, estudiando su posterior recuperación una vez eliminado el estrés.

Metodología

El estudio se realizó entre los años 2016 al 2019. Para el caso de vid y olivos, el ensayo se estableció en huertos comerciales de la Sociedad Agrícola y Ganadera Río Negro Ltda. (30°40'52.63"S, 71°23'26.18"O), ubicada en la localidad de Tabalí, Comuna de Ovalle, en

tanto el ensayo en paltos se realizó en la Agrícola Las Cañas (31°42'11''S, 71°16'30''O), ubicada en Pintacura, Comuna de Illapel.

En Ovalle el suelo corresponde a la Serie Tuquí (CIREN, 2005), con detalles entregados en el capítulo anterior, en tanto en Illapel el suelo se puede asociar a la Serie Pintacura (PTC), moderadamente profundo, clases texturales franca-finas con pendiente de 15 a 20% y pedregosidad superficial común, con clastos de hasta 30cm de diámetro, predominantemente angulares.

En Ovalle el clima fue detallado en el capítulo anterior. Para Illapel se define un clima semiárido con lluvias invernales que alcanzan los 170 mm al año, con una evapotranspiración potencial que varía entre los 1.052 y los 1.130 mm al año. La temperatura media anual es cercana a los 16°C; el mes más cálido es enero, con una máxima media de 25°C, en tanto el mes más frío es julio, con una mínima media de 6°C (explorador climático (CR)²).

Material vegetal

El huerto de olivos corresponde a una plantación de 7 años de edad de la variedad Arbequina, dispuestas en un marco de plantación de 4 m entre hilera por 1,5 m sobre hileras de orientación Norte-Sur. Al ser una producción mecanizada con un fin industrial, las plantas son manejadas en forma de setos en alta densidad. El sistema de riego es tecnificado, con una línea de riego por goteo en cada hilera y emisores de goteo con un caudal de 4 litros por hora, distanciados a 0,75 centímetros entre sí.

En la vid se dispuso de una plantación comercial del cv. Chardonnay de 6 años de edad, plantadas en un marco de 1,5 m x 0,9 m, conducidos en espaldera, con orientación noroeste-sureste y un sistema de riego por goteo de una línea, con emisores de 2 L h⁻¹ dispuestos cada 45 cm.

Finalmente, el huerto de paltos corresponde a un cultivo de la variedad Hass plantados el año 2012, en un marco de plantación de 2 m sobre la hilera y 5 m en la entrehilera, dispuestos sobre camellones de 1,2 m de alto y 3 m de base, en una ladera con 15% de pendiente. El riego se realiza por microaspersión, con emisores de 36 L h⁻¹.

Tratamientos y manejos de los cultivos

Se realizaron manejos de poda y/o enmiendas de suelo previo a un desecamiento severo, simulando una sequía en la que no se aplicó riego. El control correspondió al tratamiento sin poda, sin enmienda y sin riego, pero igualmente se estableció un control positivo, el cual correspondió al frutal bajo régimen normal de riego (sin poda y sin enmienda), tal como se detalla en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Tratamientos de los ensayos en olivo, vid y palto. √ indica implementación del tratamiento según especie.

Tratam.	Descripción	Olivo	Vid	Palto
R	Con riego	√	√	√
P0E0	Sin poda, sin enmienda	√	√	√
P5E0	Poda 50%, sin enmienda	√	√	√
P8E0	Poda 80%, sin enmienda	√	√	√
P0EA	Sin poda, con ácido húmico	√	√	√
P0EB	Sin poda, con bacterias nitrificantes	√	√	-
P0EAB	Sin poda, con ácido húmico y bacterias nitrific.	√	√	-
P5EA	Poda 50%, con ácido húmico	√	√	√
P8EA	Poda 80%, con ácido húmico	-	-	√

Los tratamientos se dispusieron en unidades experimentales (parcelas) de 5 plantas en un diseño en bloques completamente aleatorizado, con 5 repeticiones por tratamiento, evaluando la planta central en cada caso.

En el ensayo de olivo, en la primera temporada (2016-2017) se realizaron dos aplicaciones de ácido húmico (octubre 2016 y febrero 2017) del producto comercial Pow Humus® (WSG 85%, Humin Tech, Alemania) con una dosis de 20 kg ha⁻¹ cada vez; para la segunda temporada, en enero de 2018 se aplicó una tercera dosis de 20 kg ha⁻¹. Para el caso de las bacterias, se realizó una aplicación por temporada de un equivalente de 10¹¹ unidades formadoras de colonia (ufc) ha⁻¹ del producto comercial Twin N®. La primera aplicación se realizó en octubre de 2016 y la segunda se realizó en enero de 2018, simulando una aplicación por fertirriego, asegurando su incorporación con cinco riegos posteriores previos a la sequía. La poda se realizó en el mes de enero, simulando un trabajo mecanizado; para esto, se midió la altura del árbol y su ancho hacia la entre hilera y, dependiendo del tratamiento, se redujo en un 50% u 80% estas medidas (Imagen 5.1). Con excepción del tratamiento RI, el corte del riego se realizó a partir de febrero en cada respectivo año (2017 y 2018).

En el ensayo de vid, el ácido húmico también correspondió al producto comercial Pow Humus en una dosis de 40 kg ha⁻¹. Para la enmienda con bacterias fijadoras de nitrógeno se utilizó nuevamente el producto comercial Twin N en dosis correspondiente a 10¹¹ ufc ha⁻¹. Tal como en el caso anterior, la aplicación se realizó simulando un fertirriego; en la primera temporada la aplicación se realizó parcializada, la primera mitad en octubre de 2016 y la segunda mitad en enero del año 2017; en la segunda temporada, la aplicación de la dosis total fue en enero de 2018. Luego de cada adición de enmiendas orgánicas se realizó un último riego, con el fin de lograr una correcta incorporación al suelo. La poda se realizó el mismo día del corte definitivo del riego, simulando un manejo mecanizado. Se utilizaron dos niveles de poda, el primero al 50% de altura de la canopia, el cual coincide con la altura del alambre superior de la espaldera, el segundo nivel se realizó al 20% de altura de la canopia, el cual coincide con la altura del segundo alambre de la espaldera. Lo que se intentó lograr con estos manejos es disminuir la altura de la planta en un 50% y un 80% respectivamente, buscando una menor interceptación de radiación. En la primera temporada el corte del riego se realizó

en post cosecha (inicios de marzo); en la segunda temporada éste se realizó en post enero (inicios de enero).

Para el caso del ensayo en paltos, se utilizó como enmienda sólo el ácido húmico (Pow Humus), pero esta vez se incluyeron ambos tratamientos de poda intensa con aplicación de ácido húmico. La poda nominalmente designada como P5 corresponde a una poda intensa, en que se dejaron cuatro ramas basales para asegurar la fotosíntesis; para el caso de P8, ésta correspondió a una poda a tocón (Imagen 5.1), pintando el tronco de color blanco para disminuir el daño por sol. La dosis de ácido húmico fue de 30 kg ha⁻¹, aplicado en el mes de noviembre, en tanto la poda se aplicó a fines de diciembre de 2017, comenzando la sequía el 18 de enero de 2018.

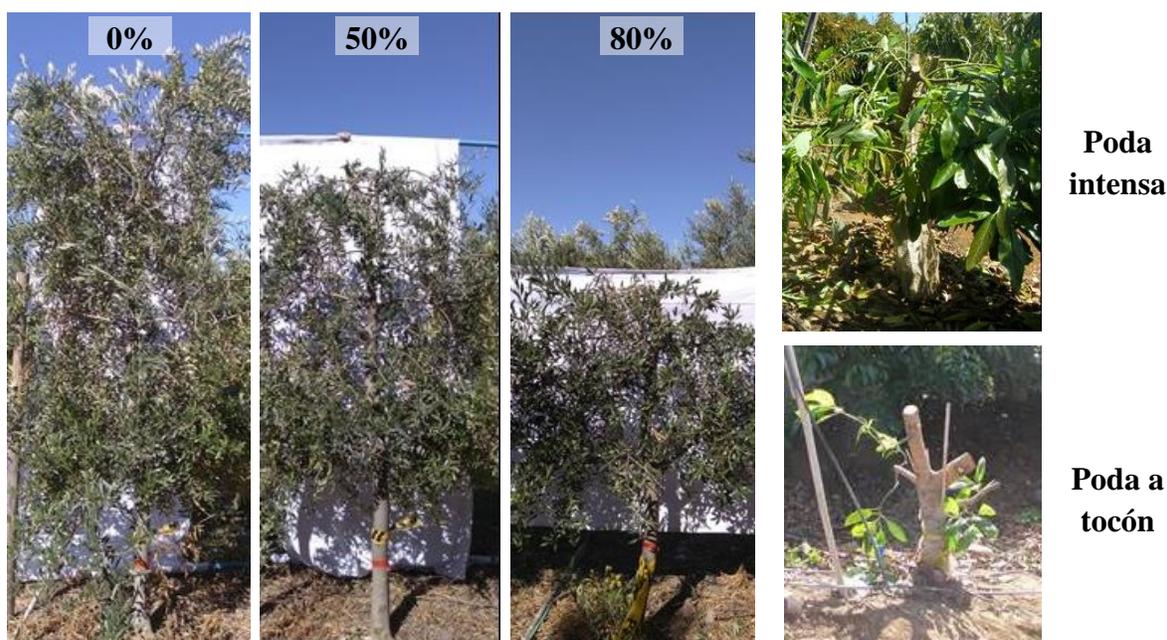


Imagen 5.1. Intensidades de podas en olivos (para vid se repite el concepto), simulando una labor mecanizada; fotos de la derecha, poda en paltos, realizada en forma manual.

Las aplicaciones de enmiendas se recomiendan realizarlas idealmente durante primavera (octubre a diciembre), pensando en que su máximo efecto se logra al cabo de uno a tres meses; sin embargo, como el objetivo en los presentes ensayos era mejorar la probabilidad de sobrevivencia de las plantas ante una sequía, se adaptaron ligeramente las fechas de aplicación. En todo caso, se intentó aplicar uno o más riegos antes de comenzar el ciclo de sequía, de manera de asegurar la reacción con las partículas del suelo. La poda, por su parte, busca disminuir al máximo la transpiración de la planta, bajo el concepto de una pronta recuperación fisiológica y productiva post-sequía.

Evaluaciones

En todos los ensayos se realizaron mediciones periódicas de variables fisiológicas: Potencial hídrico de prealba y de brote (al medio día solar) utilizando una cámara de presión tipo

Scholander, además del intercambio gaseoso, el cual permite determinar la asimilación de CO₂ (A), la conductancia estomática (gs) y la transpiración (E), utilizando equipos IRGA o sus equivalentes (ADC LCi-SD, ADC LCPro+), además de la radiación interceptada. También se midió la tasa de fluorescencia máxima (Fm) y variable (Fv), para así obtener la razón Fv/Fm como indicador de daño al aparato fotosintético de la planta.

Para el caso del olivo, en la segunda temporada se cosechó toda la fruta de la planta central de la unidad experimental para poder estimar el rendimiento por hectárea (kg/ha). Se tomó una submuestra de 100 gramos de frutos por planta para realizar un análisis de contenido de aceite (método Soxhlet), además de la humedad por desecación en estufa de aire forzado, para así estimar el rendimiento de aceite por hectárea. También se pesaron 100 frutos para, en conjunto con los kg/árbol, estimar el número de frutos y así evaluar la carga frutal. El detalle de las evaluaciones y sus resultados se pueden encontrar en Garay (2020).

Para el caso de la vid, en la segunda temporada se cosechó toda la fruta de la planta central de la unidad experimental para poder estimar el rendimiento por hectárea (kg/ha). Además se midió la acidez titulable y los sólidos solubles (grados Brix) del mosto del jugo obtenido de dos racimos por planta, con un refractómetro manual. El detalle de las evaluaciones y sus resultados se pueden encontrar en Quintana (2019).

En el ensayo en paltos, se midió el rendimiento comercial de la planta central de la unidad experimental, de manera de determinar el rendimiento por hectárea. No se determinaron otros parámetros de calidad por no ser relevantes al momento de evaluar una producción comercial. Sin embargo, en el caso de la vid y el palto, se evaluó el rendimiento una temporada después de realizado el ensayo, una vez repuesto el riego, de manera de evaluar la recuperación productiva de la planta. Esto no se pudo realizar en el ensayo de olivos, ya que el huerto entró en un receso productivo (año de baja producción), presentando un rendimiento despreciable y no técnicamente cosechable, no diferenciándose los sectores regados con los tratamientos de sequía.

Complementariamente, se realizaron algunas mediciones de suelo para evaluar el efecto de las enmiendas. Así, se determinó la densidad aparente, la distribución de tamaño de poros (de aireación, de agua aprovechable) y la estabilidad de agregados, además de controlar el contenido de agua del suelo con una sonda FDR DIVINER 2000 (SENTEK, Australia) a 20 cm del tronco de cada unidad muestral, en la zona de mayor concentración de raíces.

Los datos fueron analizados mediante modelos lineales mixtos (MLM). En el caso de encontrar diferencias significativas, se realizaron pruebas de contrastes y prueba de comparaciones múltiples (PCM) de Fisher ($\alpha < 0,05$) para los datos ligados al suelo y prueba de separación de medias DGC ($\alpha < 0,05$) para los datos ligados a ecofisiología y rendimiento. En términos prácticos, para la entrega de resultados los tratamientos se agrupan y presentan parcialmente según objetivo y representatividad.

Resultados

Condiciones climáticas

En la Figura 5.2, a modo de ejemplo, se presentan las principales variables hidrológicas del sitio de estudio en Ovalle durante el año 2018.

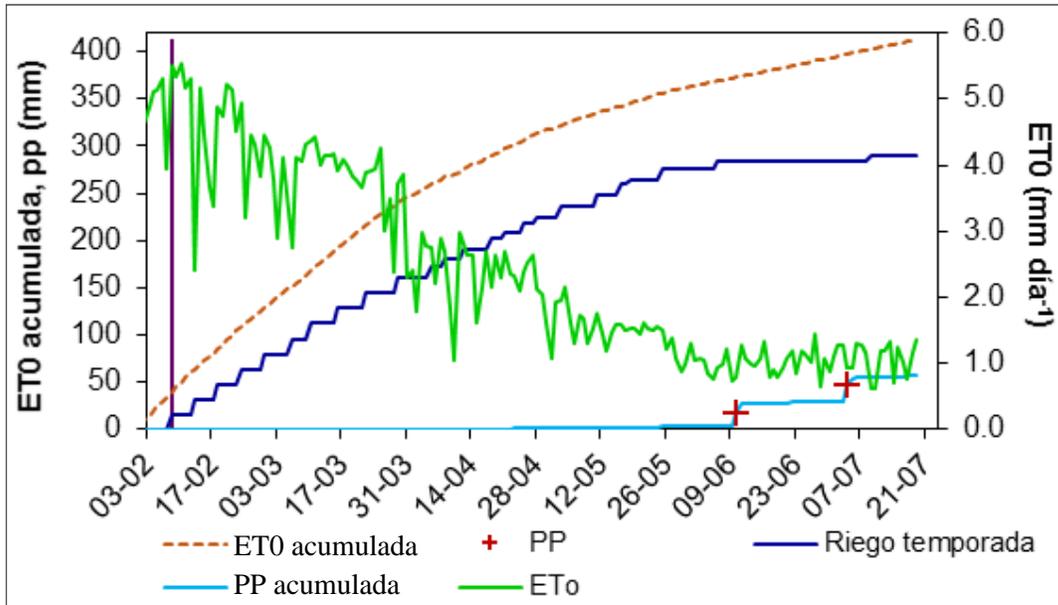


Figura 5.2. Condiciones ambientales (Estación meteorológica Camarico, INIA) durante el año 2018, en Ovalle. El riego corresponde al tratamiento RI del ensayo en olivos.

A pesar de ser zonas semiáridas, los sitios de estudio se caracterizan por la nubosidad matinal, lo que genera una alta variabilidad en la evapotranspiración diaria. Sin embargo, la ET0 acumulada presenta un incremento gradual y sostenido a través de la temporada, estabilizándose a partir de mayo, con valores diarios cercanos a 1 mm día^{-1} . Por lo mismo, los riegos se concentran en la época estival, totalizando entre 3.000 a $3.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en olivos, 3.500 a $5.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en vid, y 6.500 a $9.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en palto, dependiendo de la temporada.

Las precipitaciones los años 2018 y 2019 fueron en extremo bajas, alcanzando valores de 38,1 y 8,5 mm en Ovalle (años 2018 y 2019, respectivamente) y de 74,6 y 20,0 mm en Illapel (años 2018 y 2019, respectivamente), con uno o dos eventos concentrados en el mes de junio mayoritariamente. Esto permitió mantener las condiciones del ensayo bajo sequía absoluta en la época más crítica, ya que las precipitaciones ocurren durante la época de invierno, con baja demanda atmosférica. Sin embargo, el año 2017 fue normal, totalizando 221,8 y 247,5 mm en Ovalle e Illapel, respectivamente, con montos concentrados en los meses de mayo (142,8 y 157,4 mm en Ovalle e Illapel). Por este motivo, las variables presentadas se concentrarán en los resultados obtenidos durante la segunda temporada de sequía (año 2018).

Variables fisiológicas de los cultivos frente a sequía

Dado el diseño de los huertos y el sistema de conducción y poda, la interceptación solar previo a una poda es cercana al 60% en paltos, 50% en vid y 40% en olivos. Para el caso del palto, si bien su crecimiento es frondoso, el hecho de disponerlos en camellones implica un cierto distanciamiento de las hileras que impide que el follaje se traslape; para el caso de la vid y el olivo, la conducción en espaldera y la formación en seto superintensivo, donde se dejan entrehileras que permitan la mecanización, genera que parte importante de la radiación no sea captada por el cultivo.

Una vez realizada la poda, el mayor efecto se ve en el huerto de paltos, donde la interceptación cae bajo el 15%, incluso cercano a 0 para la poda a tocón. En los huertos de vid y olivo, esta variable disminuyó a aproximadamente un 18 y un 30%, respectivamente, sin diferencias entre intensidades de poda (50% v/s 80%). Es decir, la poda logra el objetivo de disminuir la biomasa aérea, sin reducir la interceptación de manera importante en vid y particularmente en olivo, con lo que se lograría el objetivo de disminuir la transpiración, sin afectar en demasía la asimilación de Carbono, factor importante al momento de analizar la posterior recuperación de la planta. Sin embargo, se debe tener en cuenta que ante un escenario de sequía, con este manejo se espera que la producción sea mínima, lo que será particularmente crítico en paltos, donde la reducción del follaje elimina todos los puntos de fructificación.

En cuanto al estrés hídrico alcanzado por las diferentes especies, la Figura 5.3 presenta los valores de potencial evaluado a medio día solar (medido en ramilla o en hoja, según corresponda, pero correspondiendo al equilibrio del potencial xilemático) durante la segunda temporada.

El periodo de sequía se extendió por más de 100 días en el caso de olivos, aproximadamente 80 días en el caso de la vid, y un poco más de 100 días en palto, en respuesta a su grado de adaptación a las condiciones de escasez hídrica y las condiciones específicas de suelo y clima de cada localidad. Por lo mismo, resulta interesante que el palto, creciendo en un suelo de matriz franca fina con buena retención de agua, pueda soportar un periodo cercano a los tres meses sin riego, ya que es ampliamente conocida su alta sensibilidad al déficit hídrico (Ferreira et al., 2012). Es necesario tener presente que en suelos de matriz gruesa (arenosos a franco arenosos), la sequía severa, sin ningún suministro de agua, podría provocar la muerte de la planta en un periodo de dos meses.

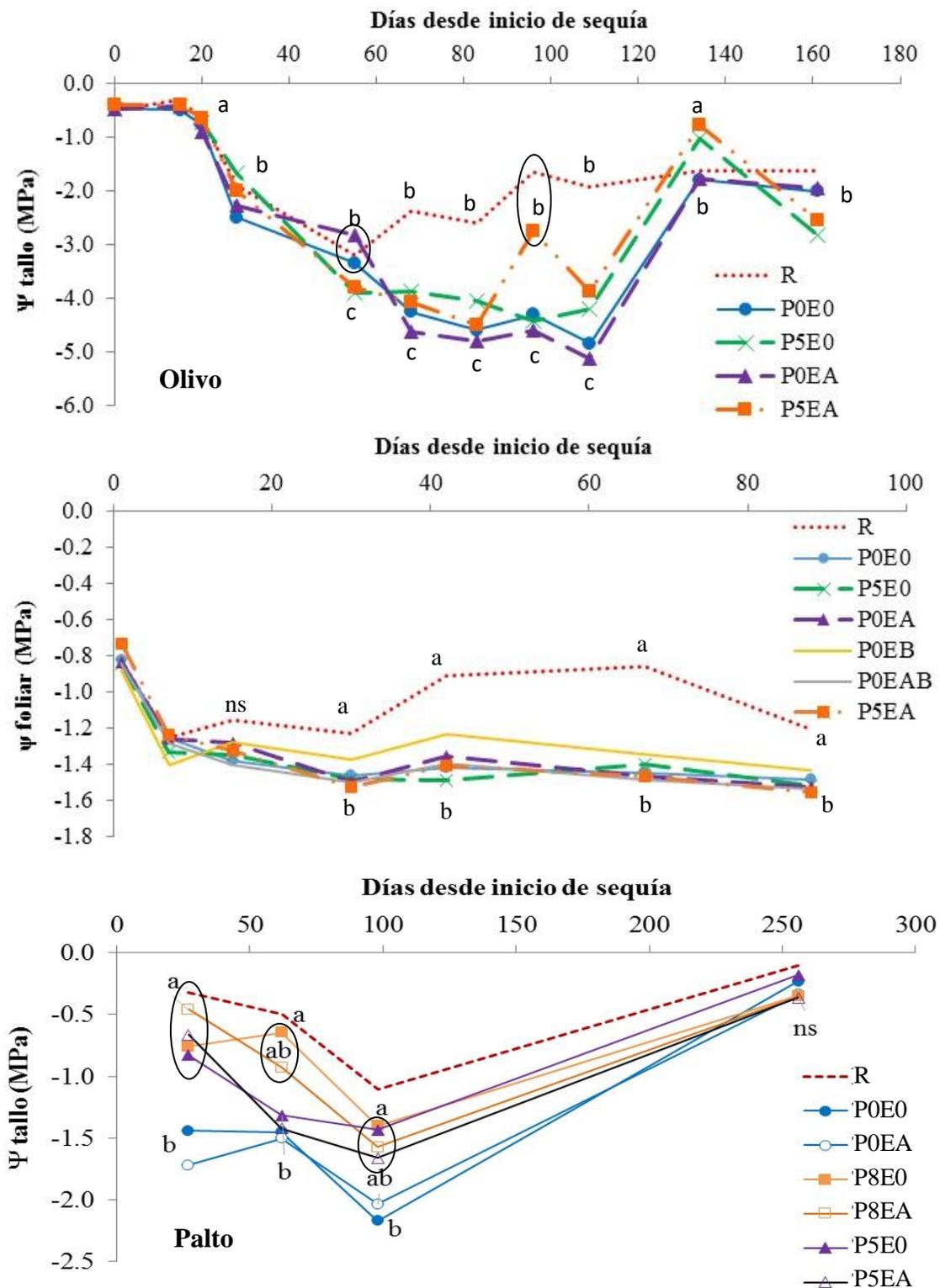


Figura 5.3. Potencial xilemático de los cultivos sometidos a sequía en la segunda temporada (2018). Se presentan los tratamientos más relevantes/contrastantes, donde R es el control regado, P son los niveles de poda y E las enmiendas (A, ácido húmico; B, bacterias; AB, mezcla). Letras distintas denotan diferencias estadísticas significativas.

Para el caso del olivo, una poda intermedia (50%) junto con la aplicación de ácido húmico promueve un menor estrés al cabo de tres meses de sequía; en el extremo opuesto, durante el periodo más crítico de la sequía (entre los días 60 y 110 aproximadamente) el tratamiento sin poda y con enmienda orgánica (POEA) presentó el mayor estrés, aunque una vez que ocurren las precipitaciones de invierno, todos los tratamientos se recuperan e igualan al testigo. Gucci et al. (2012) indican que las plantas de olivo sometidas a estrés de hasta -4,0 MPa se recuperarán rápidamente después de repuesto el riego, pero que estreses de hasta -8,0 MPa tendrán efectos negativos en la planta, especialmente si la sequía ocurre en periodos críticos como la floración y cuaja o durante la división celular del fruto (Etapa I).

En la vid, no se generaron diferencias entre los tratamientos, siendo todos menores al testigo regado; sin embargo, destaca el manejo con bacterias nitrificadoras, el cual se mantuvo con un ligero menor estrés respecto a los otros tratamientos. Aun así, a pesar de la intensa sequía aplicada, los niveles de estrés se mantuvieron en rangos de moderado a severo (Van Leeuwen et al., 2009). En este caso, el cambio en las condiciones climáticas y la entrada en receso del cultivo ponen fin al estado de estrés, aunque esto no se reflejó en el potencial xilemático de la vid. En ninguno de los dos casos (olivo y vid) la mayor intensidad de poda generó un efecto significativo respecto a la poda intermedia.

Finalmente, en el caso del palto, el factor determinante para prevenir el estrés fue la reducción de la biomasa aérea, alcanzando niveles de potencial de tallo mayores en la medida que aumentó la intensidad de la poda. El factor enmienda no fue relevante durante la sequía, lo que no descarta que pueda serlo durante el proceso de recuperación de la planta. Para la temporada en que se aplicó sequía, los niveles de potencial de tallo en palto disminuyeron a valores menores a -2,0 MPa en plantas sin poda, correspondiendo a un estrés severo, aunque Ferreyra et al. (2012) indican que el palto puede presentar hasta -3,0 MPa de potencial de tallo en condiciones de sequía extrema. Debido a que la sequía se aplicó durante el periodo de desarrollo del fruto, las plantas sin poda presentaron una deshidratación extrema de las paltas, afectando fuertemente el rendimiento; sin embargo, la floración se produce durante la primavera, por lo que, una vez repuesto el riego, la nueva brotación (en el caso de las plantas podadas) debiese asegurar la recuperación productiva del huerto.

En todos los casos, la transpiración, la conductancia estomática y la asimilación presentaron comportamientos similares entre sí, por lo que, a modo de ejemplo, la Figura 5.4 presenta los valores de conductancia estomática para los diferentes ensayos. Se puede observar que la conductancia estomática, particularmente en palto, disminuyó a valores inferiores a $0,05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, por lo que las plantas alcanzaron niveles de estrés hídrico severo (Medrano et al., 2002), afectando negativamente la eficiencia de uso de agua, dada la caída en paralelo de la asimilación neta.

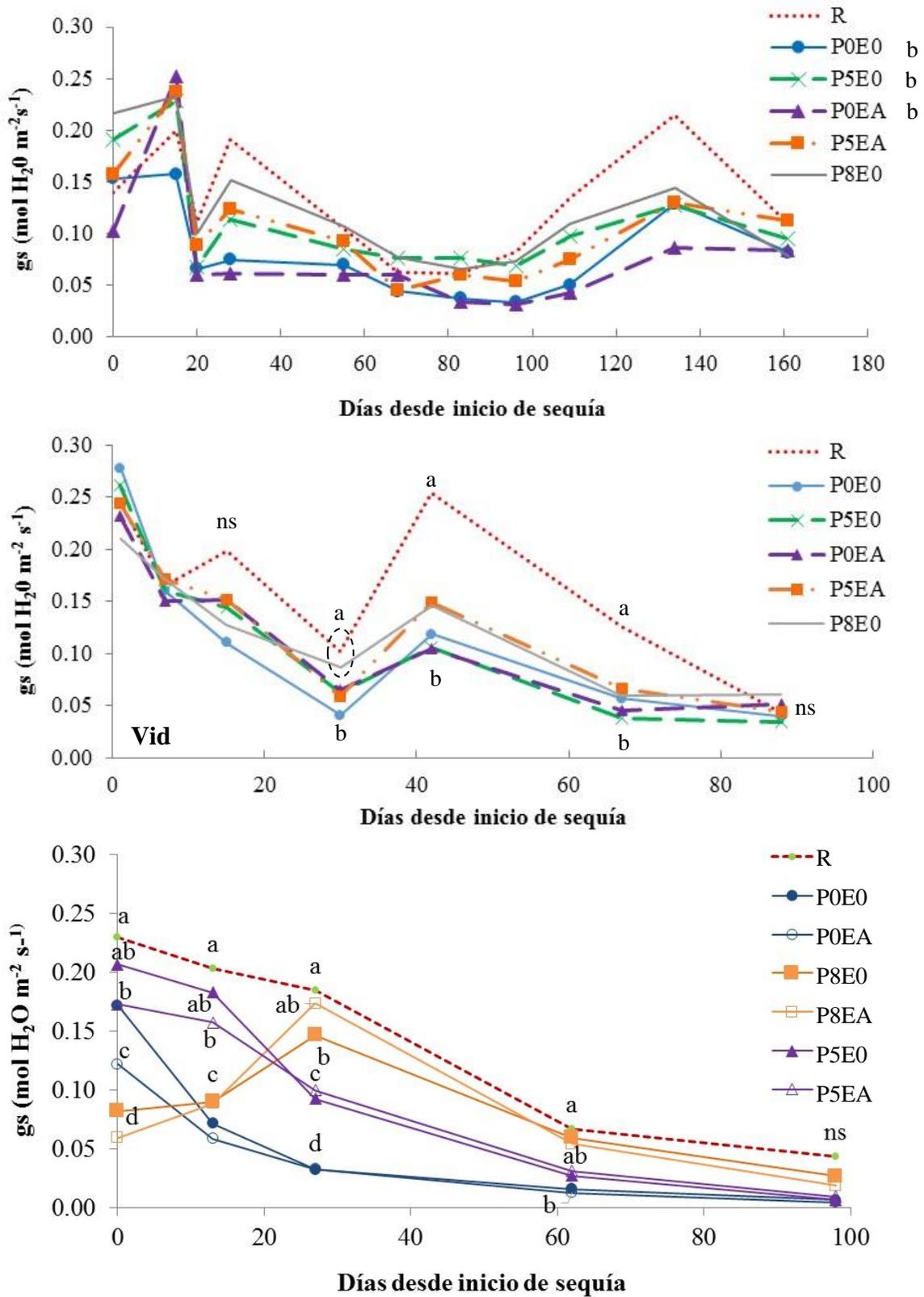


Figura 5.4. Conductancia estomática (gs) de los cultivos sometidos a sequía en la segunda temporada (2018). Letras distintas denotan diferencias estadísticas significativas, para el caso de olivo, a nivel de tratamiento independiente de la fecha.

En el caso del olivo, el manejo con podas y/o el uso de enmiendas de suelo promueven una mejor condición para la planta, pero la ausencia de poda en conjunto con la enmienda genera un efecto contraproducente. En vid se mantiene la tendencia, aunque sin diferencias significativas entre tratamientos, y siempre en una peor condición respecto a la condición bajo riego. En palto, al igual que con el potencial de tallo, el factor clave para la planta resulta ser la poda, donde el corte a tocón (P8E0 y P8EA) al cabo de 30 días logra la recuperación de la actividad de la planta, por una rápida brotación post corte, al punto que alcanza al tratamiento regado. El descenso de la gs posterior al día 30 en palto responde al cambio en las condiciones climáticas, básicamente menor demanda atmosférica a partir del mes de marzo.

Como se indicó anteriormente, la fruta en el caso del palto no podado tuvo una deshidratación severa, por lo que **ante una inminente sequía, en que no se podrá regar un cultivo por un considerable periodo de tiempo, los manejos deben considerar el eliminar los frutos para evitar la demanda fotosintética y reducir la actividad de la planta al mínimo.** Con esto se aseguraría que la reducción de la fotosíntesis sea más bien dependiente de un cierre estomático, sin comprometer de manera importante la actividad de la enzima Rubisco, de manera de recuperar rápidamente la planta una vez que se reponga el riego (Bota et al., 2004; Flexas et al., 2004).

Al respecto, la relación Fv/Fm de los tratamientos bajo sequía en vid no se diferenciaron del control regado, por lo que se puede concluir que no tuvieron daños severos por el estrés hídrico, estando en condiciones de recuperarse una vez que se reponga el agua. Sin embargo, dada la mayor duración del estrés en el ensayo de olivos, y la alta intensidad en el ensayo de paltos, éstos presentaron diferencias con respecto al testigo regado (Figura 5.5).

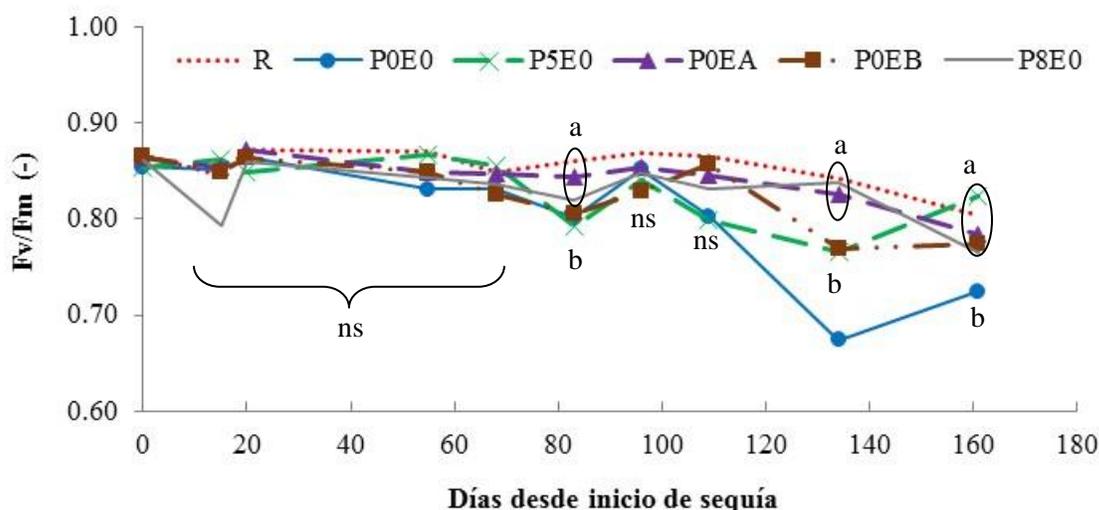


Figura 5.5. Fluorescencia de clorofila para el ensayo de enmiendas y poda en olivos. Se destacan los tratamientos más representativos y contrastantes. En paltos el resultado fue similar.

Una disminución en la relación Fv/Fm indica una reducción en la eficiencia fotoquímica del PSII y una perturbación o daños en el aparato fotosintético (Glynn et al., 2003). Para el caso de la vid, se confirmó que el funcionamiento del aparato fotosintético tiene una alta

estabilidad frente a diferentes condiciones ambientales (González et al., 2008); sin embargo, en el caso del olivo y el palto se registró un descenso crítico de la relación Fv/Fm (cercano a 0,65 y 0,60, respectivamente) en el tratamiento sin poda y sin enmienda (POE0, Figura 5.5), incluso una vez ocurridas las precipitaciones invernales, por lo que bajo condiciones de alta luminosidad, se puede generar sobreexcitación de los centros de reacción del fotosistema II y la formación de especies reactivas de oxígeno, las cuales pueden dañar tejidos e inactivar sus funciones (Ghobadi et al., 2013). En el caso del palto, una vez ocurrida la primera precipitación, el tratamiento de poda y ácido húmico presentó una rápida recuperación de este parámetro, relacionándose a una rápida salida de la condición de estrés. Dado que la poda elimina fruta y por ende la demanda por asimilados, **queda la posibilidad de intensificar la poda en cultivos como el olivo**, llegando al concepto de poda a tocón, en caso que se pronostique una sequía de larga duración y se desee salvar el huerto a través de una baja demanda hídrica por parte de la biomasa aérea.

Variables de suelo

Como resultado del manejo con enmiendas, se generan algunos cambios en las propiedades del suelo que resultan interesantes de analizar, ya que se relacionan con el potencial de enraizamiento y la disponibilidad de agua para el cultivo. Dado que la vid y el olivo se caracterizan por un sistema radical que es capaz de explorar suelos densificados, en el caso de los ensayos de sequía se observó una profundización del patrón de enraizamiento, indistintamente del tratamiento, a consecuencia de la sequía. Al inicio del ensayo, las raíces de vid y olivos se concentraban en los primeros 30 cm, donde se encuentra una matriz franco arcillosa, bien estructurada; al cabo de dos años, forzadas a explorar en profundidad en búsqueda de reservorios de agua, las raíces se presentaron de manera abundante hasta los 50 cm, siendo capaces de penetrar la matriz arcillosa y poco estructurada de la Serie Tuquí. Para el caso del palto (ensayo en Illapel, sobre camellones de matriz franca-fina), la Figura 5.6 presenta la densidad aparente y la resistencia mecánica al cabo de un mes de aplicada la enmienda (ácido húmico), justo antes del inicio de la sequía.

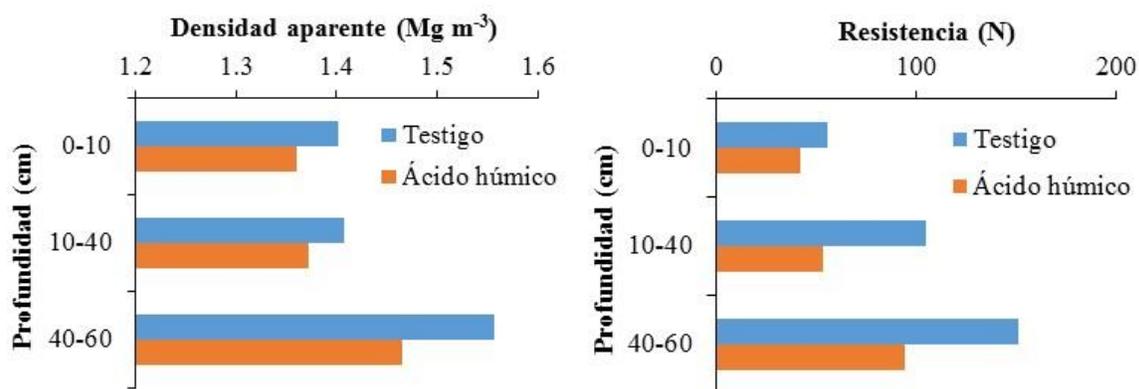


Figura 5.6. Valores de densidad aparente y resistencia mecánica en camellones tratados con enmienda húmica en relación al control sin enmienda, en el ensayo de paltos sobre camellón.

Es conocido el efecto benéfico de las enmiendas húmicas sobre las propiedades físicas del suelo (Zhang et al., 2018, Seguel et al., 2019), lo que en definitiva favorece el crecimiento

radical (Seguel et al., 2013). Sin embargo, en condiciones de sequía esto puede ser contraproducente, por cuanto una mayor exploración de raíces, si bien permite el acceso a nuevas fuentes de agua, también favorece una mayor extracción de ésta, por lo que el resultado debe ser validado por el comportamiento fisiológico del cultivo, lo que en el presente estudio se cumplió para la vid y parcialmente para el olivo, ya que la mejor respuesta fisiológica de este último se logró cuando junto con la enmienda se aplicó manejo de poda. Para el caso del palto, frente a una sequía el factor clave es la poda, sin embargo no resta importancia el favorecer la condición de suelo para una pronta recuperación productiva una vez finalizada la sequía. Es así que, como era de esperar, las enmiendas fueron efectivas en incrementar tanto el agua aprovechable del suelo como la porosidad gruesa de aireación (Figura 5.7).

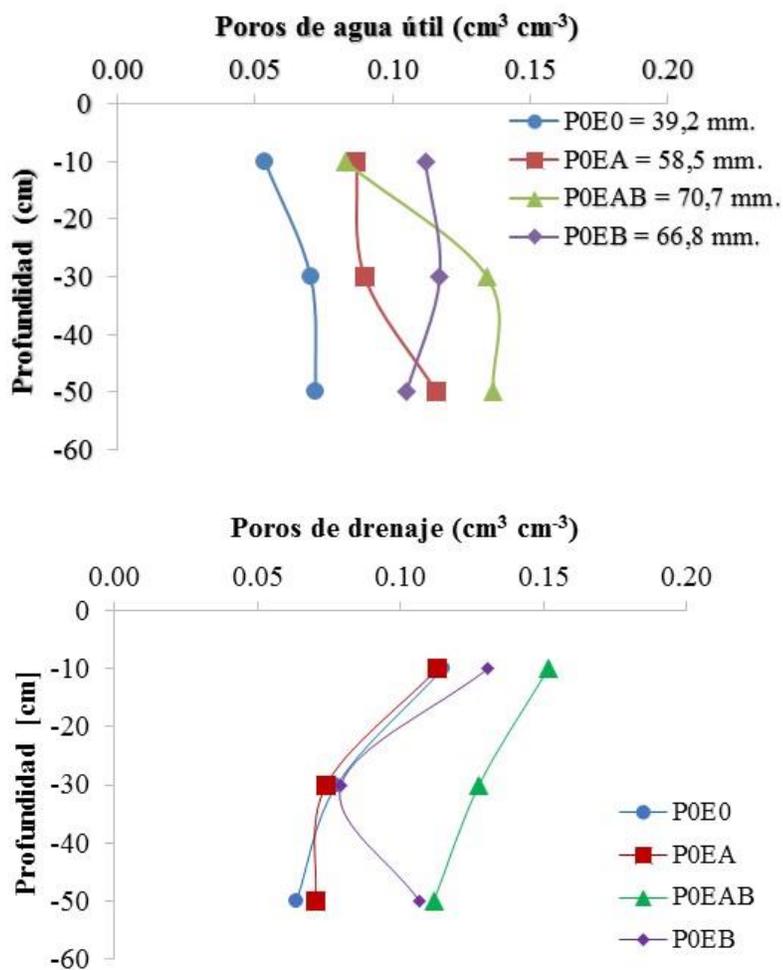


Figura 5.7. Agua aprovechable del suelo (arriba) con su equivalente en mm para una profundidad de 0-50 cm y, poros gruesos ($>50 \mu\text{m}$, abajo) en vid y olivos, respectivamente.

Sin embargo, el resultado de la Figura 5.7 no es constante ni válido en todos los ensayos. Por ejemplo, en el caso del ensayo de palto se vio favorecida la porosidad gruesa por efecto de la enmienda, no así la retención de agua, no generándose diferencias estadísticas significativas con respecto al testigo. Para el caso del agua aprovechable, aun siendo el mismo suelo, no

hubo mejora de esta propiedad en el ensayo de olivos, e incluso se perdieron los efectos con la sequía intensa en el ensayo de vid. **Es decir, el efecto de las enmiendas es temporal y no se manifiesta de la misma manera en todos los casos**, por lo que los impactos sobre la funcionalidad del suelo se deben analizar de manera integral en las interacciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Hueso et al., 2012). Al respecto, resulta interesante el efecto generado por las enmiendas sobre la estabilidad de agregados en el ensayo de vid (Figura 5.8), donde en profundidad mejoró la estabilidad con el uso de enmiendas.

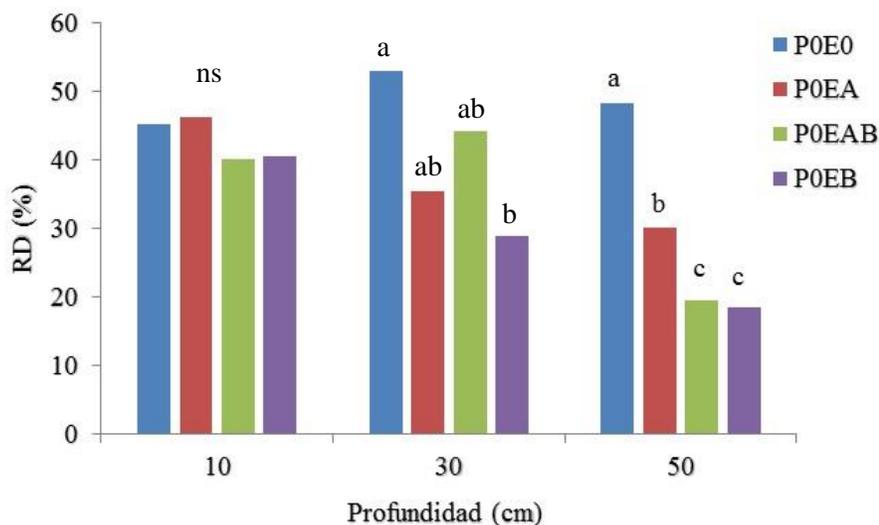


Figura 5.8. Relación de dispersión (RD) en agregados de 1 a 2 mm en el ensayo en vid, donde el menor valor denota la mayor estabilidad y las letras diferentes denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

La reacción del agregado frente al mojamamiento brusco genera una dispersión del suelo si no se tiene una suficiente estabilidad, generando sellos que dificultan la entrada de agua al suelo o bien destruyendo los macroagregados, dificultando así la distribución y almacenamiento del agua dentro del perfil (Seguel et al., 2013). Las enmiendas utilizadas en este ensayo, al ser aplicadas vía riego, favorecen su incorporación en el perfil, generando su efecto en profundidad, lo que asegura la funcionalidad del sistema poroso una vez que se reponga el riego. Las enmiendas, al aportar micronutrientes al suelo, además de incrementar la actividad biológica y mejorar las propiedades físicas del suelo (Abiven et al., 2009), generan una respuesta integral por parte de la planta, por lo que es relevante analizar el rendimiento y la calidad de la producción, además del efecto a mediano y largo plazo.

Respuesta productiva a los manejos

Si bien al generarse una sequía severa no se tiene como objetivo final la producción comercial, sino la sobrevivencia del huerto, la fructificación y llenado de frutos genera una demanda a la planta que afectará a la temporada siguiente, por lo que resulta igualmente interesante evaluar el rendimiento y la calidad de la fruta en los respectivos ensayos. La Figura 5.9 presenta los rendimientos de los tres ensayos como consecuencia de la sequía, en tanto la Figura 5.10 presenta algunos indicadores de calidad en cada caso. En ambos casos la información corresponde a la primera temporada de sequía.

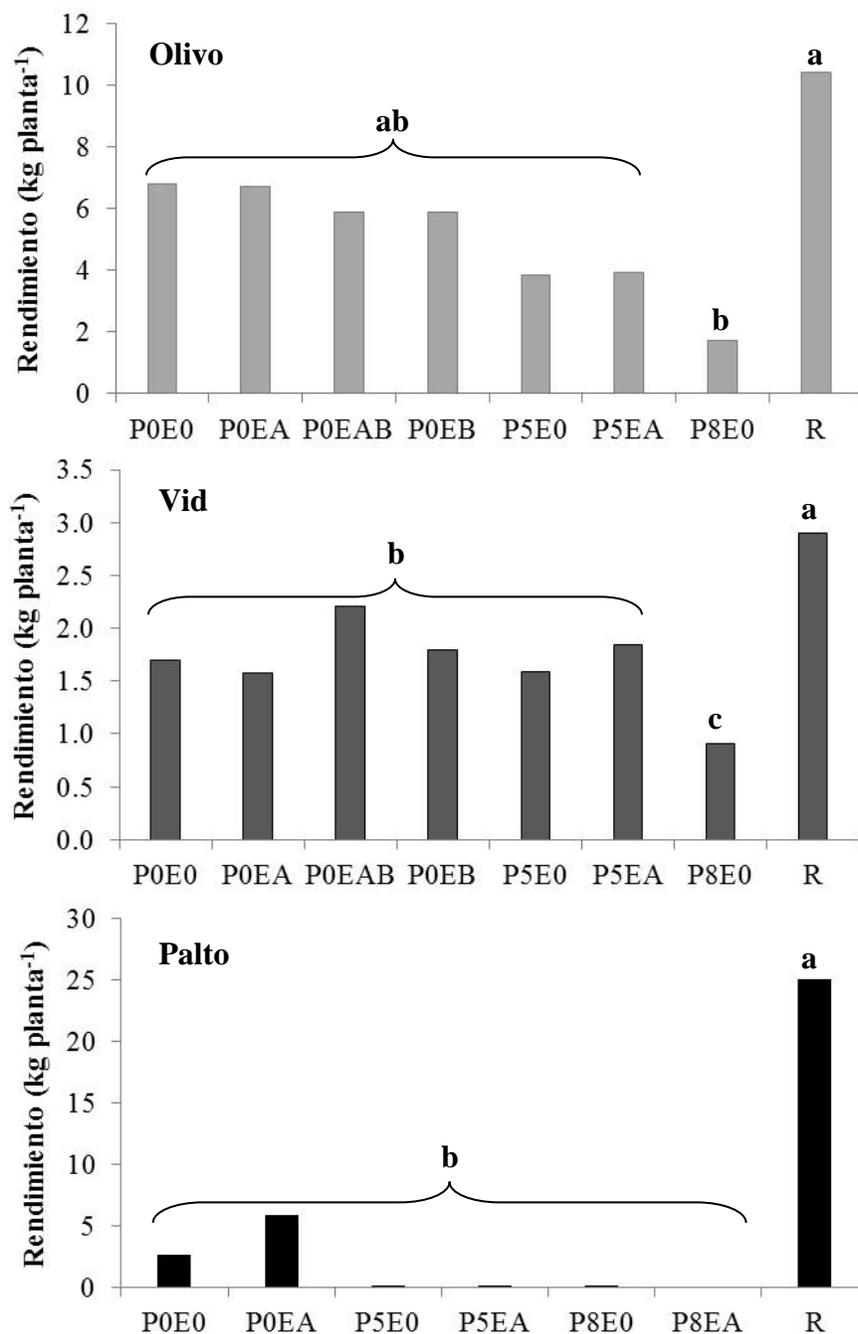


Figura 5.9. Rendimientos de los cultivos posterior a la sequía y bajo los manejos detallados en el Cuadro 5.1. Letras distintas denotan diferencias estadísticas significativas.

Para el caso del olivo, la reducción de rendimiento fue proporcional a la intensidad de poda, en tanto la vid, aunque sin diferencias significativas con los tratamientos equivalentes, presentó una acción sinérgica en la aplicación conjunta de las enmiendas (P0EAB), siendo nuevamente el factor determinante la intensidad de la poda. En el ensayo en palto, dada la mayor intensidad de esta labor, el rendimiento se ve severamente reducido al eliminar carga y puntos de fructificación.

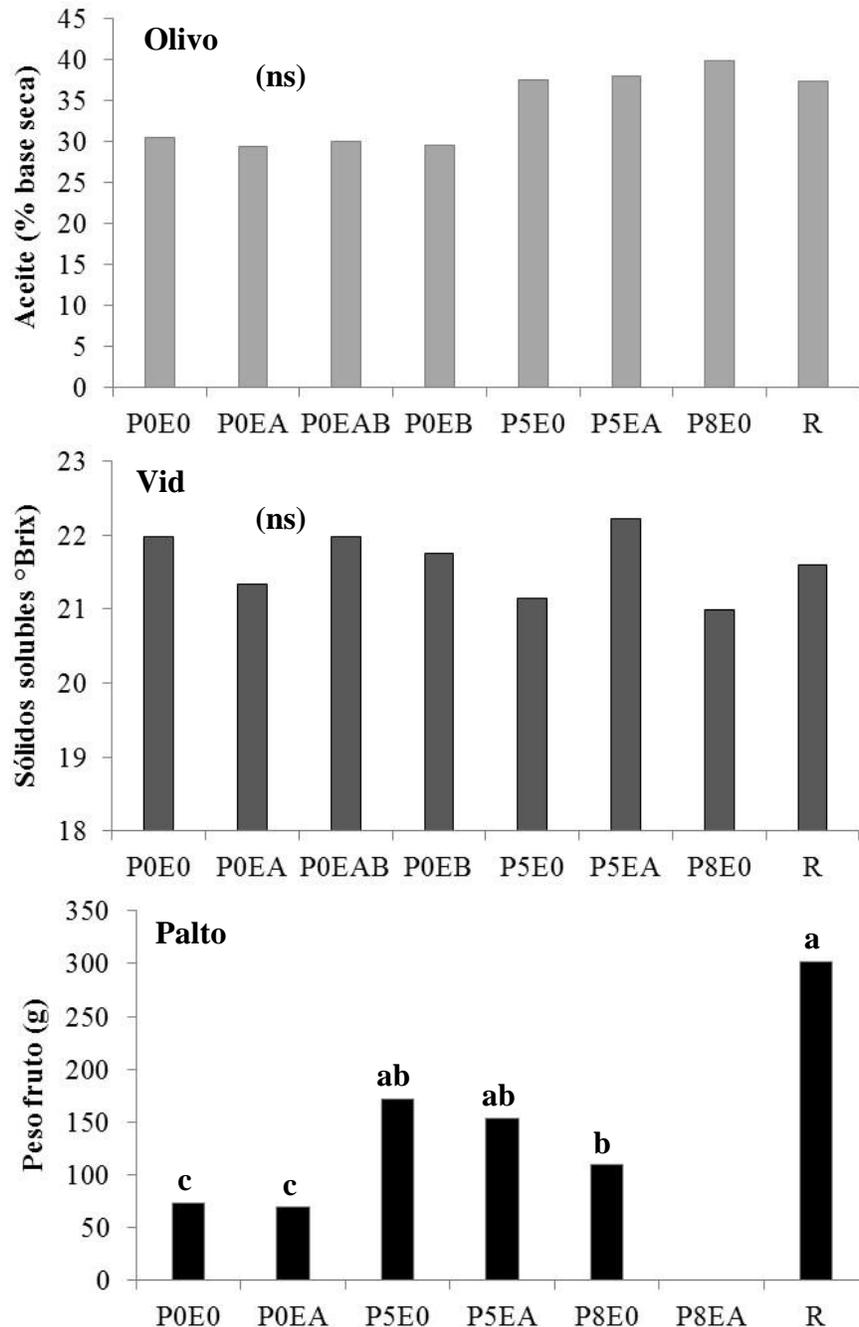


Figura 5.10. Indicadores de calidad de los cultivos sometidos a sequía. Letras distintas denotan diferencias estadísticas significativas (no se incluye P8EA del ensayo en palto por no existir producción).

En cuanto a los indicadores de calidad, tanto en olivo como en vid no se generaron diferencias significativas con respecto al control regado, aunque en el caso de los olivos sin poda, los frutos presentaron una disminución de tamaño, un nivel de deshidratación severo y un adelanto en la maduración.

En el caso de la vid, no se generaron diferencias en los sólidos solubles ni en la acidez titulable; esta última varió en el rango de 0,43 a 0,48 g L⁻¹, incluido el tratamiento con riego. Si bien se podría esperar que esta variable se viera afectada por la mayor temperatura de las bayas en los tratamientos podados, se mantuvo constante en los diferentes tratamientos, lo cual resulta positivo si dentro de la temporada de sequía aún se tienen expectativas de una producción comercial de calidad. Sin embargo, es necesario tener presente que el rendimiento disminuirá a aproximadamente la mitad del potencial (control regado, R) y hasta a un tercio de éste, en el caso de una poda severa (P8E0).

En el caso del palto, considerando que los tratamientos POE0 y POEA vieron reducido su rendimiento a menos de un quinto del potencial, y que en el resto de los tratamientos con sequía la producción fue casi nula (Figura 5.9), la diferencia en el peso del fruto (Figura 5.10) pierde relevancia, y ante una inminente sequía la recomendación es eliminar la carga frutal y esperar recuperar la planta en el corto plazo.

Conclusiones

El manejo de podas y enmiendas de suelo en cultivos frutales sometidos a una condición de sequía poseen resultados que dependen de la especie, siendo el factor clave en paltos la aplicación de podas, en tanto en olivos y vid se presenta una sinergia en la acción conjunta de podas y enmiendas de suelo.

La poda fue efectiva en reducir la interceptación de radiación en todos los casos, sin diferencias significativas entre las intensidades de poda, por lo que se recomienda la intensidad intermedia para promover la rápida recuperación (fisiológica y productiva) de los cultivos.

Las enmiendas orgánicas promovieron una mejoría general de las propiedades físicas del suelo, con una disminución de la densidad aparente, un aumento de la porosidad gruesa y de agua aprovechable y una mayor estabilidad de microagregados, lo que favorece la exploración radical de los cultivos.

En olivos, la implementación de una poda de mediana intensidad, en conjunto con la aplicación de ácido húmico al suelo, genera una menor condición de estrés en la planta, evaluada a través de variables fisiológicas, las cuales presentarán una rápida recuperación posterior a la primera lluvia, en relación a plantas regadas, presentando menor estrés a través de la relación de fluorescencia de clorofilas. Si bien se obtienen rendimientos menores bajo la condición de sequía, de manera proporcional a la intensidad de poda, el contenido de aceite no se ve afectado, aunque en plantas sin poda la deshidratación de la fruta es mayor que en plantas podadas.

En vid, el tratamiento con aplicación de bacterias fijadoras de nitrógeno favorece un menor estrés en las plantas después del corte de riego, aunque sin diferencias estadísticas significativas respecto al resto de los tratamientos. Por su parte, el tratamiento con aplicación de chapoda al 80% por sí solo, presenta los mayores valores en transpiración y conductancia estomática 30 días después del corte del riego, igualándose con el control regado. Si bien el

rendimiento disminuye de manera proporcional a la intensidad de poda, las variables de calidad, evaluadas como sólidos solubles y acidez titulable, no se ven afectadas en relación al control regado.

En palto, los tratamientos podados logran mantener el funcionamiento fisiológico durante el periodo de sequía, diferenciándose la poda severa de la poda a tocón durante el desarrollo de ésta. En el caso de la poda severa, que deja una proporción de biomasa aérea, el funcionamiento fisiológico disminuye durante la sequía, en tanto la poda a tocón promueve una rápida brotación y recuperación de la planta hasta 30 días de iniciada la sequía. Pese a que los potenciales de brote de los tratamientos podados se comportan igual que el control, se recuperan de mejor manera posterior a la primera lluvia, presentando menor estrés evaluado a través de la relación de fluorescencia de clorofilas. En este cultivo, el rendimiento se ve fuertemente afectado, aunque no se modifica el contenido de aceite.

6. Indicadores hídricos y económicos de los manejos



Francisco Alfaro
Charlotte Hardy
Oscar Seguel

Contexto

Ninguno de los manejos propuestos en el presente libro es válido si, junto con la factibilidad técnica, no se realiza un análisis económico y/o ambiental, en el caso de interés del proyecto, relacionado a la productividad económica del agua utilizada (ensayos de restricción hídrica) o al rendimiento durante y posterior a la sequía (ensayos de corte total de riego). Para esto se desarrollaron algunos indicadores sencillos, relacionándolos al control regado (ensayos de riego deficitario), o bien al control sin manejo y sin riego (ensayos de poda y manejo bajo condición de sequía severa).

Del punto de vista técnico, con los asociados se discutieron y afinaron los tratamientos, de manera de hacerlos factibles en su implementación en el corto plazo, esto es, con una capacidad de respuesta rápida en el caso de proyectarse una escasez de agua dentro de la temporada. Así, se desarrollaron los manejos asociados a poda mecanizada (caso de vid vinífera, con conducción en espaldera, y olivo, con formación en seto de alta densidad), pero en el caso del palto se mantuvo la poda manual, dadas las condiciones de plantación en laderas en muchos casos.

Para el caso de las enmiendas de suelo, dada una contingencia de baja disponibilidad hídrica, donde las aplicaciones de enmiendas sólidas como compost se dificultan por su exigencia en mano de obra y volumen a aplicar, se optó por aquéllas de bajo requerimiento en dosis y de fácil aplicación vía riego (sustancias húmicas y bacterias). Como se discutió en el capítulo 2, en todos los casos se requiere un tiempo (un mes bajo régimen de riego) para asegurar su acción y los efectos sobre el suelo.

Finalmente, en los ensayos de balance hídrico (asociados al Capítulo 3), el uso de mallas sobre el dosel es factible en un parrón de uva de mesa, no así en olivos, dada la expectativa de cosecha mecanizada; por lo mismo, en este último caso se desarrollaron los ensayos con mulch de alperujo, ya que corresponde a un material de desecho en la agroindustria.

Para el caso de los indicadores, éstos se explican y desarrollan en cada uno de los apartados del presente capítulo, de manera de entender de mejor forma su contexto e interpretación. Básicamente se resumen en indicadores de cuatro tipos, los tres primeros asociados a la producción y el último relacionado con la rentabilidad económica del agua. Para los tres primeros, se consideró (1) un indicador referido a la productividad del agua bajo condición de restricción hídrica moderada, (2) un indicador referido al rendimiento relativo como consecuencia de la sequía severa y, (3) un indicador referido al rendimiento relativo una vez que se repone el riego, a la temporada siguiente de la sequía, como índice de recuperación de la planta. Además, se complementa con (4) un indicador de la rentabilidad económica del agua, como mecanismos de justificación ambiental de los manejos, considerando que la sequía afecta a todos los actores de la Región. Así, el disminuir los montos de riego o tener que dejar de regar un huerto, no sólo tiene un impacto económico para la empresa agrícola, sino una valoración económica y ambiental para la sociedad.

Productividad relativa del agua en condiciones de sequía moderada

La productividad relativa del agua (WP_R) permite dar cuenta de la capacidad de producción de un tratamiento por unidad de agua de riego aplicado (m^3), bajo manejo de restricción hídrica, comparando con el tratamiento testigo, que posee el riego correspondiente al 100% de su demanda. Este indicador se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$WP_R = [(WP_{Ti} - WP_C) / WP_C] \times 100 \quad (\%)$$

Donde WP_C es la productividad del agua del tratamiento control (regado), correspondiente a Y_C en $kg\ m^{-3}\ año^{-1}$, y WP_{Ti} es la productividad del agua del tratamiento “i” (con restricción hídrica), correspondiente a Y_{Ti} en $kg\ m^{-3}\ año^{-1}$, siendo Y_C e Y_{Ti} los rendimientos a cosecha del tratamiento control (regado) y del tratamiento de restricción hídrica, respectivamente, en $kg\ ha^{-1}$, pero llevados a un valor proporcional a la cantidad de agua aplicada en la temporada o en el periodo del ensayo.

Se utilizó, para el cálculo de WP_R de cada tratamiento, la cantidad de agua aplicada desde la instalación del ensayo hasta el final de la temporada (cosecha). Así, el mayor valor resulta positivo en la valoración del uso del agua. Si se presta atención, los valores de WP_{Ti} y WP_C corresponden a la eficiencia de uso de agua a nivel agronómico (kg de fruta / m^3 de agua de riego), por lo que ya es un indicador de eficiencia y de valoración del uso del agua, aunque acotado al periodo del ensayo. El Cuadro 6.1 presenta los resultados de los ensayos de riego desarrollados en olivos y vid para las cosechas del año 2018.

Cuadro 6.1. Productividad relativa del agua (WP_R) de los tratamientos de manejo hídrico.

Tratamientos	Agua Aplicada (m^3/ha)	Rendimiento (kg/ha)	WP_{Ti} (kg/m^3 agua)	WP_R (%)
Ensayo olivo				
Testigo	2.449,0	17.367	7,09	-
T1 50%	1.224,5	15.817	12,92	82,15
T2 70%	734,7	12.706	17,29	143,87
Ensayo vid (vinífera, manejo montos)				
Testigo	1.661,6	15.676	9,43	-
T 50%	830,8	14.921	17,96	90,37
T 200%	3.323,3	13.700	4,12	-56,30
Ensayo vid (uva fresca, manejo estrategia)				
Testigo	9.607	31.607	3,29	-
DPR	7.574	38.021	5,02	52,58
RD	7.574	35.067	4,63	40,73

Para el caso del olivo, se aplicaron restricciones hídricas del 50 y el 70% respecto al testigo. Para el caso de la vid se evaluaron dos ensayos, uno de montos de riego, en vid vinífera, donde el tratamiento testigo considera una restricción de 75% a inicio de cuaja y de 60% a partir de enero, respecto a la demanda evapotranspirativa del cultivo; en este caso, se compara con tratamientos en que se aplica la mitad del agua del testigo (T50) y el doble de

este monto (T200), simulando un sobre riego. En el segundo ensayo en vid, desarrollado en un parrón variedad Red Globe, se aplicaron manejos de desecamiento parcial de raíces (DPR) y riego deficitario (RD), ambos con un 50% de agua respecto al control.

Según los resultados presentados en el Cuadro 6.1, la implementación de una reducción de 50% del agua de riego en olivos permite incrementar la productividad relativa del agua en un 82%, en tanto el tratamiento de 70% de reducción de riego incrementa el WP_R en un 144%. En el caso de la vid vinífera, la implementación de una reducción de 50% del agua de riego permite incrementar la productividad relativa del agua en un 90%, pero cuando el tratamiento considera el doble del agua de riego, se reduce el WP_R en un 56%. Finalmente, ambos manejos de riego en el ensayo de uva de mesa presentaron incrementos en el WP_R , los que variaron entre 40 y 53%.

Es sabido que las restricciones hídricas en periodos no críticos del punto de vista de la cuaja y crecimiento de fruto favorecen el aumento en la eficiencia de uso del agua, traducido en una producción con menor consumo de agua (Fernández, 2003; Chaves et al., 2007). Esto de por sí ya es una ventaja, como se observa en el Cuadro 6.1, ya que la disminución del contenido de agua resulta en un aumento de WP_T . Respecto a los testigos, los tratamientos de restricción hídrica favorecen el aumento de la productividad relativa del agua (WP_R), lo que resulta positivo al momento de enfrentar una temporada con baja disponibilidad de ésta, por cuanto se obtiene un producto valorizado por una menor huella hídrica.

El resultado de la intensidad de la restricción depende del tipo de suelo; en el caso de los ensayos del Cuadro 6.1, correspondió a un suelo arcilloso, con mayor capacidad de almacenamiento de agua en relación a un suelo de textura gruesa, lo que explica que las caídas fuertes en los montos de riego no se tradujeron en caídas fuertes en los rendimientos, explicando el incremento del WP_R de manera directa con el incremento de la restricción hídrica. Aun así, en el caso de los olivos, el tratamiento T2 (70% de restricción de riego) tuvo un descenso de rendimiento por debajo de 15 toneladas ha^{-1} , por lo que el implementar esta restricción se debe tomar como opción sólo en caso de una escasez de agua importante o cuando se valore la mayor eficiencia en el uso del agua con un mayor precio por el producto. En el caso opuesto, el tratamiento en vid con aplicación de exceso de agua de riego, se genera una condición de falta de aireación en el suelo arcilloso, lo que resulta en un menor rendimiento y, por ende, una WP_R negativa. Para el caso de la vid para consumo fresco, se utilizaron los rendimientos comerciales, por lo que resulta interesante el potencial de valoración del producto con un menor consumo hídrico.

En definitiva, resulta interesante que, en el caso de especies que poseen requerimientos intermedios a bajos de agua, y siendo manejados de manera óptima en los testigos, aún pueden ser sometidos a una restricción hídrica importante, con menores costos de bombeo y consumo de agua, sin afectar de manera importante el rendimiento.

Rendimiento relativo en condiciones de sequía severa

El rendimiento relativo (RR) se utilizó para establecer el impacto productivo de un tratamiento sometido a sequía, con aplicación de poda y/o enmienda de suelo, comparado

con el tratamiento testigo, sin riego y sin manejo de poda o enmienda. Los tratamientos se refieren a los detallados en el Cuadro 5.1, en tanto el indicador se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$RR_s = [(RP_{Ti} - RP_C)/RP_C] \times 100 \quad (\%)$$

Donde RP_{Ti} es el rendimiento productivo del tratamiento i (ton ha^{-1}), detallado en el Cuadro 5.1, y RP_C es el rendimiento (ton ha^{-1}) del tratamiento control, sin riego, ni poda, ni aplicación de enmienda. Es decir, un valor de RR_s positivo y alto se puede interpretar como un efecto positivo del manejo para la producción comercial en la temporada de sequía. El Cuadro 6.2 presenta los resultados para los ensayos en los tres cultivos del proyecto.

Cuadro 6.2. Rendimiento relativo (RR_s) de los tratamientos de poda y enmiendas bajo condición de sequía absoluta en relación al testigo sin manejos. R es la referencia del control sin manejos de poda y enmienda, pero bajo riego.

Ensayo	Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Rendim. Relativo RR_s (%)
Poda/Enmienda Olivos	P0E0	11.344	-
	P0EA	11.222	-1,08
	P0EAB	9.844	-13,22
	P0EB	9.844	-13,22
	P5E0	6.433	-43,29
	P5EA	6.578	-42,02
	P8E0	2.844	-74,93
	R	17.367	53,09
Poda/Enmienda Paltos	P0E0	4.063	-
	P0EA	7.350	80,92
	P50E0	625	-84,62
	P50EA	0	-100,00
	P80E0	375	-90,77
	P80EA	438	-89,23
	R	16.719	311,54
Poda/Enmienda Vid	P0E0	10.432	-
	P0EA	9.691	-7,10
	P0EAB	11.790	13,02
	P0EB	11.049	5,91
	P5E0	8.704	-16,56
	P5EA	7.531	-27,81
	P8E0	5.556	-46,74
R	15.062	44,38	

Para los ensayos de olivos y paltos, se presentan los resultados de la primera temporada de sequía, coincidentes con los resultados de la Figura 5.9. Los resultados de vid vinífera corresponden a la segunda temporada de sequía, por lo que, desde comenzado el corte del

riego, se acumularon dos temporadas con suministro hídrico dado sólo por las lluvias invernales.

Para cualquiera de los tratamientos en olivos, se generan disminuciones en el rendimiento relativo del cultivo, cumpliendo con el objetivo de disminuir la demanda de asimilados, en particular por efecto de la poda. El factor enmienda no resulta relevante en el resultado de RR_S , y los tratamientos sin poda y sin riego disminuyen el rendimiento relativo entre un 53 a un 66% respecto al control regado.

En el ensayo de paltos, la poda es efectiva en disminuir el RR_S por sobre el 80%, no diferenciándose la intensidad (poda intensa versus poda a tocón), como ocurrió con el ensayo de olivos. Si bien el tratamiento con ácido húmico (POEA) genera un RR_S cercano al 81% respecto a POE0, aún se encuentra lejos de la condición con riego ($RR_S=311\%$), por lo que su producción es marginal, aunque puede resultar interesante como fuente de ingreso durante una sequía. Es decir, el uso de ácido húmico ayuda a tener un nivel productivo, aún sin posibilidad de riego (Hueso et al., 2012), pero la decisión final de realizar una poda o no (es decir, no tener versus tener una producción marginal) dependerá de las proyecciones de intensidad y duración de la sequía.

En el caso de la vid (cv Chardonnay), dada la posición basal de la fruta dentro del brote, el efecto de la poda no es tan drástico como en los casos anteriores, generándose resultados que denotan una interacción poda-enmienda. Por ejemplo, la poda al 50% en conjunto con la aplicación de enmienda húmica (P5EA) genera un menor valor de RR_S que la poda por sí sola, pero a su vez el uso de enmiendas de suelo sin poda (POEA, POEAB y POEB) generan incrementos o reducciones de RR_S dependiendo de la interacción de éstas. La planta, frente a una mejora en las propiedades físicas del suelo, busca un equilibrio fisiológico entre la demanda atmosférica y sus posibilidades de exploración radicular (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008), con efectos a la siguiente temporada cuando se tienen estreses extremos; así, en una mirada de mediano plazo, la acción de la enmienda sólo será beneficiosa si a la vez se reduce la biomasa evapotranspirativa.

Rendimiento relativo post sequía

El rendimiento relativo posterior a la sequía (RR_{ps}) evalúa la recuperación productiva de los tratamientos sometidos a sequía, en relación al tratamiento que mantuvo el riego durante todo el ensayo. Los tratamientos se refieren a los detallados en el Cuadro 5.1, en tanto el indicador se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$RR_{ps} = [(RP_{Ti} - RP_R)/RP_R] \times 100 \quad (\%)$$

Donde RP_{Ti} es el rendimiento productivo del tratamiento i (ton ha^{-1}), detallado en el Cuadro 5.1, y RP_R es el rendimiento (ton ha^{-1}) del tratamiento regado. Es decir, un valor de RR_{ps} positivo se relaciona a una capacidad de recuperación post sequía, en tanto el valor negativo se relaciona a un efecto negativo de la sequía y/o la poda sobre la inducción floral. El Cuadro 6.3 presenta los resultados de los ensayos en vid y palto.

Cuadro 6.3. Rendimiento relativo post sequía (RRps) de los tratamientos de poda y enmiendas bajo condición de sequía absoluta en relación al control regado (R).

Ensayo	Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Rendim. Relativo RRps (%)
Poda/Enmienda Paltos	P0E0	3750	-82,95
	P0EA	5625	-74,43
	P50E0	10788	-50,96
	P50EA	11375	-48,30
	P80E0	15625	-28,98
	P80EA	18413	-16,30
	R	22000	-
Poda/Enmienda Vid	P0E0	14691	-25,62
	P0EA	6481	-67,19
	P0EAB	4630	-76,56
	P0EB	15741	-20,31
	P5E0	12037	-39,06
	P5EA	19444	-1,56
	P8E0	14506	-26,56
	R	19753	-

Para el caso del olivo, no se pudo evaluar el rendimiento de la temporada posterior a la sequía, debido a que el huerto entró en año OFF dentro del ciclo de añerismo, reduciendo su rendimiento a niveles no comercialmente cosechables; en el caso del palto, sólo se aplicó una temporada de sequía, en tanto en vid, que acumuló dos temporadas bajo sequía, se presentan los valores post reposición del riego. En ambos casos, es necesario tener presente que el rendimiento responde a una inducción floral de la temporada previa, es decir, bajo condición de sequía.

Para el caso del palto, se observan que todos los tratamientos acusan efectos de la sequía, aún después del restablecimiento del riego. Las plantas que no fueron podadas son las que presentan mayor castigo en el rendimiento. En efecto, la reducción de la copa en los tratamientos de poda permite disminuir las pérdidas de agua por evapotranspiración, manteniendo una mayor cantidad de agua en el suelo, y así un sistema radical más saludable, que les permitió mantener activas sus estructuras y acumular reservas. Al contrario, las plantas no podadas sufrieron un estrés hídrico por el corte de riego, seguido por un estrés lumínico. Ambos efectos contribuyeron a dañar los sitios florales. Por su parte, las plantas podadas volvieron a brotar después de la reposición del riego, renovando sus estructuras productivas y usando las reservas acumuladas, lo que les permitió alcanzar un mejor nivel de rendimiento.

Para el caso de la vid, se observan efectos residuales importantes de la sequía, con fuertes disminuciones del rendimiento en los tratamientos con ácido húmico. La intensidad de poda no permite discriminar claramente una mejor condición que otra (reducciones de un 25, 39 y 26% en P0E0, P5E0 y P8E0), pero resulta interesante la capacidad de recuperación del tratamiento con poda y enmienda (P5EA), que prácticamente iguala al control regado que no

tuvo sequía. De todas formas, con excepción de P0EA y P0EAB, los rendimientos son elevados, por lo que se debe analizar el efecto sobre la calidad potencial del vino (van Leeuwen et al., 2009).

Rentabilidad relativa de los manejos

La rentabilidad del agua de riego (WR_R) compara la capacidad productiva de las plantas de cada tratamiento por metro cúbico de agua de riego utilizado con el tratamiento control (regado). La WR_R se calcula según la siguiente fórmula:

$$WR_R = 100 \times (WR^{Ti} - WR^C) / WR^C$$

Donde WR^C es la rentabilidad del agua del tratamiento control regado, en $\$ m^{-3} H_2O \text{ año}^{-1}$; WR^{Ti} es la rentabilidad del agua del tratamiento “i” ($\$ m^{-3} H_2O \text{ año}^{-1}$). Para el cálculo económico se usaron los siguientes datos (a enero de 2020):

- Precio promedio de venta Palta Hass (bins 450kg): \$ 1.386/kg
- Precio promedio de venta de 1L de aceite de oliva virgen: \$ 3.302
- Rendimiento promedio de aceite en olivas variedad Arbequina: 20,5%
- Precio promedio de venta de 1L de vino de exportación: \$ 1.519
- Rendimiento promedio de 1kg de uva para vino: 0,75L
- Precio promedio de 1kg de uva de mesa variedad Red Globe (por mayor): \$ 600.

Cuadro 6.4. Rentabilidad relativa del agua (WR_R) de los tratamientos de manejo hídrico.

Tratamientos	Agua Aplicada (m^3/ha)	Rendimiento (kg/ha)	WR ($\$/m^3$ agua)	WR_R (%)
Ensayo olivo				
Testigo	2.449,0	17.367	4.800	-
T1 50%	1.224,5	15.817	8.743	82,15
T2 70%	734,7	12.706	11.706	143,87
Ensayo vid (uva fresca, manejo estrategia)				
Testigo	9.607	31.607	1.973	-
DPR	7.574	38.021	3.011	52,58
RD	7.574	35.067	2.777	40,72

En el caso del olivo, ambos tratamientos de reducción del riego permiten aumentar la rentabilidad del agua, a pesar de la disminución de rendimiento, lo que se explica por el mayor diferencial generado por el ahorro de agua. El tratamiento con 70% de restricción presenta la mayor rentabilidad relativa, equivalente a 140% el tratamiento control; no obstante, este resultado tiene que ser contrastado con los datos de calidad de la producción, como fue detallado en el capítulo 4. En efecto, los resultados de este ensayo muestran que la restricción de 70% del agua de riego somete las plantas a un estrés severo, afectando el rendimiento en cantidad y en porcentaje de aceite. Al contrario, el tratamiento con restricción

de 50% de riego también permite un aumento de la rentabilidad relativa en un 80%, sin afectar la calidad del rendimiento.

En el ensayo de uva de mesa, ambos tratamientos con déficit permiten aumentar la rentabilidad relativa en un 40 y 52 %, comparando con el testigo, ya que permiten reducir los costos de riego con un rendimiento mayor. El rendimiento por planta en la vid no se ve afectado significativamente por la restricción hídrica después de pinta, sin embargo, DPR mejora el peso y diámetro de bayas respecto del riego deficitario (RD), por lo que aumenta su rentabilidad relativa.

Finalmente, los Cuadros 6.5 y 6.6 presentan la rentabilidad relativa del agua (WR_R) de los tratamientos de sequía, durante la temporada de corte de riego y durante la temporada de recuperación (reposición de riego) respectivamente.

Cuadro 6.5. Rentabilidad relativa del agua (WR_R) de los tratamientos de restricción hídrica (manejos de poda y enmienda) durante la temporada de sequía.

Tratamientos	Agua Aplicada (m³/ha)	Rendimiento (kg/ha)	WR (\$/m³ agua)	WR_R (%)
Ensayo Olivos				
P0E0	315	11344	24.378	281,87
P0EA	315	11222	24.115	277,76
P0EAB	315	9844	21.154	231,38
P0EB	315	9844	21.154	231,38
P5E0	315	6433	13.824	116,56
P5EA	315	6578	14.135	121,42
P8E0	315	2844	6.112	-4,25
R	1841	17367	6.383	-
Ensayo Paltos				
T0	1027	4063	5.479	39,46
T0A	1027	7350	9.914	152,32
T100	1027	625	843	-78,54
T100A	1027	0	0	-100,00
T95	1027	375	505	-87,13
T95A	1027	438	590	-84,98
R	5897	16719	3.929	-
Ensayo Vid				
P0E0	199	10455	59.764	191,08
P0EA	199	9702	55.458	170,11
P0EAB	199	13655	78.054	280,16
P0EB	199	11075	63.310	208,35
P5E0	199	9788	55.953	172,52
P5EA	199	11409	65.215	217,63
P8E0	199	5565	31.810	54,93
R	994	17908	20.532	-

Durante la primera temporada, en los tres ensayos, la mayoría de los tratamientos reflejan un aumento de la productividad del agua, como consecuencia de una drástica disminución de la cantidad de riego aplicado, asociada a una disminución mediana a severa del rendimiento. A modo de excepción, los tratamientos de poda severa en olivos y en paltos removieron la casi totalidad de los sitios florales, lo que llevó a una cosecha casi nula.

Cuadro 6.6. Rentabilidad relativa del agua (WR_R) de los tratamientos de restricción hídrica (manejos de poda y enmienda) durante la temporada de recuperación.

Tratamientos	Agua Aplicada (m ³ /ha)	Rendimiento (kg/ha)	WR (\$/m ³ agua)	WR_R (%)
Ensayo Paltos				
T0	5900	3750	553	-82,95
T0A	5900	5625	829	-74,43
T100	5900	10788	1591	-50,96
T100A	5900	11375	1677	-48,30
T95	5900	15625	2304	-28,98
T95A	5900	18413	2715	-16,30
Testigo	5900	22000	3244	-
Ensayo Vid				
P0E0	995	12346	14.135	-25,92
P0EA	995	9012	10.319	-45,92
P0EAB	995	7284	8.340	-56,29
P0EB	995	13333	15.266	-20
P5E0	995	12469	14.277	-25,18
P5EA	995	15926	18.235	-4,4
P8E0	995	11975	13.711	-28,14
Testigo	995	16667	19.083	-

Como se indicó previamente, el año de recuperación el huerto de olivos presentó un comportamiento OFF, por lo que no hubo producción comercial que ameritara la cosecha.

Después de la reposición del riego en paltos, se observó que los tratamientos con mejor recuperación de rendimiento son los que recibieron los tratamientos de poda moderada (T95 y T95A), que alcanzan niveles similares al testigo, y permite una menor disminución de la rentabilidad del agua (-29,0% y -16,3% respectivamente). Al contrario, las plantas sin podar (T0 y T0A) presentan la mayor disminución de rentabilidad (-83,0% y -74,4%).

En vid vinífera, se puede observar que las plantas sometidas al tratamiento de poda moderada asociado a la aplicación de ácido húmico (P5EA) presenta valores de rendimiento muy similares al testigo, y por lo tanto disminuye poco la rentabilidad del agua (-4,4%). Al contrario, las plantas que recibieron la aplicación de ácido húmico y bacterias, sin poda (P0EAB), presenta bajos niveles de rendimiento, atrasando la recuperación productiva, con la correspondiente disminución de la rentabilidad del agua (-56,3%).

Conclusiones

Bajo manejos de restricción hídrica como déficit controlado o desecamiento parcial de raíces, la productividad relativa del agua se ve incrementada, aunque un estrés excesivo en olivos puede disminuir el rendimiento. Esto asegura a la vez una mayor rentabilidad monetaria relativa, como herramienta de valorización de los manejos y el producto comercial obtenido, al asegurar una menor huella hídrica y una mayor eficiencia en el uso de los recursos productivos.

En condiciones de restricción hídrica severa (corte total del riego a mitad de temporada), con manejos de poda y enmiendas de suelo para asegurar la sobrevivencia de la planta, el rendimiento relativo en relación al control sin manejo y sin riego disminuye en todos los tratamientos en olivos, pero el uso de ácido húmico sin manejo de poda en paltos y el uso de bacterias nitrificadores en el suelo del ensayo de vid, también sin poda, generan resultados positivos. Sin embargo, es necesario tener presente que el objetivo durante un periodo de sequía severo no es obtener producción, sino asegurar el bienestar de la planta y su rápida recuperación. Así, para la temporada posterior a la sequía, el rendimiento relativo en relación a plantas permanentemente bien regadas, como indicador de recuperación productiva, es óptimo en plantas de palto podadas a tocón y con aplicación de enmienda húmica al suelo. Para el caso de la vid, una poda parcial (50% del follaje) junto con la aplicación de ácido húmico durante la sequía, aseguran una rápida recuperación a la temporada siguiente, con rendimientos similares a plantas que no tuvieron períodos de sequía.

La rentabilidad monetaria relativa durante la temporada de sequía se ve afectada por los manejos de poda en los cultivos de olivos y paltos, pero en este último el uso de la enmienda húmica sin poda de la planta genera una alta rentabilidad monetaria. En el ensayo en vid, todos los tratamientos generan rentabilidad monetaria positiva respecto a plantas normalmente regadas, con extremos entre el tratamiento de poda fuerte y sin enmienda de suelo (54,9%) y el tratamiento sin poda, pero con mezcla de enmiendas húmicas y bacterias fijadoras de N (280,2%). En la temporada de reposición de riego post sequía, el indicador se hace negativo en todos los casos, siendo el factor clave la poda parcial con uso de ácido húmico para mantener una condición similar a plantas no estresadas.

7. Conclusiones del proyecto

Transcurridas tres temporadas (2016-2017; 2017-2018; 2018-2019) con ensayos en los cultivos principales de la Región de Coquimbo (vid, paltos y olivo), se lograron establecer directrices de manejo para optimizar el uso de agua y minimizar los efectos de la escasez hídrica. En función del escenario hídrico específico, se pueden realizar diversos manejos que apunten a la optimización de la eficiencia uso del agua en los sistemas agrícolas, sin afectar negativamente al cultivo o asegurando su rápida recuperación post estrés hídrico, con una visión de rentabilidad en el uso de los recursos.

Ante una condición de buena disponibilidad hídrica, la opción son los manejos que apunten a disminuir las pérdidas de agua por evaporación o por transpiración excesiva, siendo posible implementar mulch superficiales, mallas sobre el dosel o uso de protectores solares. Al respecto, el uso de mulch de alperujo estabilizado presentó resultados promisorios, con aporte de nutrientes y mejorías en las propiedades físicas del suelo, sin afectar el funcionamiento fisiológico de la planta, por lo que se proyecta el uso de este pasivo ambiental como una enmienda de suelo.

Bajo condiciones de restricción hídrica moderada, el riego deficitario controlado y el desecamiento parcial de raíces posterior a la división celular en los frutos contribuyen al ahorro del agua y a mantener un buen rendimiento de los cultivos en la medida que el estrés no sea excesivo, incrementando la eficiencia de uso de agua y manteniendo la calidad del producto comercial.

Frente a una expectativa de sequía, con imposibilidad de riego una vez iniciada la temporada, los manejos de podas y enmiendas de suelo mostraron resultados que dependen de la especie, siendo el factor clave en paltos la aplicación de podas, en tanto en olivos y vid se presenta una sinergia en la acción conjunta de podas y enmiendas de suelo. La poda es efectiva en reducir la interceptación de la radiación, lo que disminuye de manera efectiva el consumo de agua. Por su parte, el uso de enmiendas de suelo genera una condición estructural favorable para la exploración radical, lo que en el caso de la vid generó una mejor recuperación post sequía.

La implementación de los manejos propuestos en el presente manual, requiere del convencimiento de los productores agrícolas, de manera que puedan visualizar los beneficios intra y extra predial, como una contribución a las condiciones de escasez hídrica. Así mismo, se deben promover las instancias de interacción y participación por parte del resto de los productores, centros de investigación y autoridades de gobierno, como un mecanismo de retroalimentación e intercambio de experiencias.

8. Bibliografía

- Abiven, S., S. Menasseri, C. Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability- A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 40: 1-12.
- Ahumada-Orellana, L., S. Ortega-Farías, P. Searles. 2018. Olive oil quality response to irrigation cut-off strategies in a super-high density orchard. *Agricultural Water Management* 202: 81-88
- Alburquerque, J., J. González, D. García, J. Cegarra. 2003. Agrochemical characterization of “alperujo”, a solid by-product of two-phase centrifugation method for olive oil extraction. *Bioresource Technology* 91: 195-200.
- Alburquerque, J., J. González, D. García, J. Cegarra. 2007. Effects of a compost made from a solid by-product (“alperujo”) of a two-phase centrifugation system for olive oil extraction and cotton gin waste on growth and nutrients content ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Bioresource Technology* 98: 940-945.
- Alegre, S., A. Arbones, J. Girona, J. Marsal, M. Mata, M. Tovar. 2000. Regulated deficit irrigation in olive trees (*Olea europaea* L. cv. ‘Arbequina’) for oil production. *Acta Horticulturae*. 586: 259-262.
- Armada, E., O. López-Castillo, A. Roldán, R. Azcón. 2016. Potential of mycorrhizal inocula to improve growth, nutrition and enzymatic activities in *Retama sphaerocarpa* compared with chemical fertilization under drought conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16(2): 380-399.
- Bota, J., H. Medrano, J. Flexas. 2004. Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? *New Phytologist* 162: 671-681.
- Bozkurt, Y., A. Yazar. 2017. Evaluation of crop water stress index on Royal table grape variety under partial root drying and conventional deficit irrigation regimes in the Mediterranean Region. *Scientia Horticulturae* 224: 384-394.
- Callejas, R., J. Vera, C. Kremer. 2014. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Universidad de Chile, Ciencias Agronómicas N° 23. Santiago, Chile.
- Caruso, G., C. Gennai, R. Gucci, S. Esposito, A. Taticchi, S. Urbani. 2017. The effect of the timing of water deficit on yield components and oil quality of olive trees. *Acta Horticulturae* 1150: 267-272.
- CAZALAC. 2015. Boletín septiembre 2015: Estrategia regional de recursos hídricos por cuenca 2014-2030. Disponible en: <http://www.cazalac.org/2015/index.php?id=16>
- Chaban, O. 2014. Análisis socioeconómico de los productores de uva de mesa en la IV región chilena. *Revista Perspectiva Socioeconómica* 1: 114-126.
- Chaves, M., T. Santos, C. Souza, M. Ortuño, M. Rodriguez, C. Lopes, J. Maroco, J. Pereira. 2007. Deficit irrigation in grapevines improves water-use efficiency while controlling vigour and production Quality. *Annals of Applied Biology* 150: 237-252.
- Chile Oliva. 2017. Pauta técnica para la aplicación de orujos y alperujos. Asociación de Productores de Aceite de Oliva – CORFO. Santiago, Chile.
- Cifre, J., J. Bota, J. Escalona, H. Medrano, J. Flexas. 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.) an open gate to improve water use efficiency? *Agriculture Ecosystems and Environment* 106: 159-170.

- CIREN. 2005. Estudio agrológico IV región: Descripciones de suelo, materiales y símbolos. Santiago, Chile. 300p.
- Cochard, H., L. Coll, X. Le Roux, T. Améglio. 2002. Unraveling the effects of plants hydraulics on stomal clousure during water stress in walnut. *Plant Physiology* 128: 282-290.
- CORFO (Corporación de Fomento de la Producción). 2015. Sistema nacional de referencia sobre demandas de agua por la agricultura. Santiago de Chile, AGRIMED. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 39p.
- Crane, T.A., C. Roncoli, G. Hoogenboom. 2011. Adaptation to climate change and climate variability: The importance of understanding agriculture as performance. *NJAS - Wagening. Journal of Life Science* 57(3): 179–185.
- Díaz-Espejo, A., A.S. Walcroft, J.E. Fernández, B. Hafidi, M.J. Palomo, I.F. Giron. 2006. Modeling photosynthesis in olive leaves under drought conditions. *Tree Physiology* 26(11): 1445–1456.
- Dirección General de Aguas. 2019. Pronóstico de caudales de deshielo, Temporada de riego 2019-2020, disponible en <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=590>.
- Dirección Meteorológica de Chile. 2016. Zonificación Agroclimática de Chile. Dirección Meteorológica de Chile, Subdirección Climatología y Meteorología Aplicada, Sección Meteorología Agrícola. 53p.
- Dos Santos, T., C. Lopez, M. Rodrigues, C. De Souza, J. Maroco, J. Pereira, J. Silva, M. Chaves. 2003. Partial rootzone drying: effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (*Vitis vinifera*). *Functional Plant Biology* 30: 663-671.
- El-Ansary, D., G. Okamoto. 2007. Vine water relations and quality of ‘muscat of alexandria’ table grapes subjected to partial root-zone drying and regulated deficit irrigation. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 76(1): 13-19.
- Ennahli, S., S. Kadir, H. Khatmanian, D. Scurlock, H. Hanine. 2015. Physiological and biochemical responses to root-zone drying of three grape cultivars. *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 27: 141-156.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2005. The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production. 1st ed. 80 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio Riego y Drenaje de FAO N°56, Roma, Italia.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2012. Crop yield response to water. 1st ed. 550 p.
- Fernández, J. 2013. Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance. *Environmental and Experimental Botany* 103: 158-179.
- Fernandes-Silva, A., A. López-Bernal, T. Ferreira, F. Villalobos. 2016. Leaf water relations and gas exchange response to water deficit of olive (cv. Cobrançosa) in field grown conditions in Portugal. *Plant Soil* 402: 191-209.
- Ferreira, R., G. Sellés, E. Fereres. 2012. Avocado. pp: 442-447. In: Steduto, P., T. Hsiao, E. Fereres, D. Raes (eds). Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage paper 66. Rome, Italy.

- Ferreira, R., G. Sellés, H. Silva, R. Ahumada, I. Muñoz, V. Muñoz. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 41(7): 1109-1118.
- Ferreira, R., G. Sellés, I. Sellés. 2001. Riego deficitario controlado en uva de mesa: estrategias de riego para enfrentar situaciones de escasez de agua en frutales. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Boletín N° 60. Santiago de Chile. 44p.
- Fichet T., J. Henríquez. 2013. Aportes al conocimiento del cultivo del olivo. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Serie Ciencias Agronómicas N°21. 266 p.
- Flexas, J., J. Bota, F. Loreto, G. Cornic, T. Sharkey. 2004. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology* 6: 1-11.
- Franck, N., V. Muñoz-Aravena. 2014. Frutales para zonas áridas y semiáridas. 1ª ed. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 224 p.
- Franks, P., P. Drake, R. Froend. 2007. Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. *Plant, Cell and Environment* 30: 19-30.
- Fuentes, S., T. Nguyen, P. Marschner. 2013. Effect of incorporated or mulched compost on leaf nutrient concentrations and performance of *Vitis vinifera* cv. Merlot. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13(2): 485-497.
- Fundación Chile. 2018. Escenarios Hídricos 2030. Radiografía del agua. Brecha y riesgo hídrico en Chile. Fundación Chile – BID. Santiago, Chile.
- Garay, A. 2020. Efectos de poda y enmiendas al suelo sobre la fisiología de olivos y propiedades físicas del suelo bajo condición de sequía en la región de Coquimbo. Tesis Ing. Agrónomo y Magíster en Manejo de Suelos y Aguas. Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Agronómicas. 50 p.
- Garreaud, R. D., C. Alvarez-Garretón, J. Barichivich, J. P. Boisier, D. Christie, M. Galleguillos, C. LeQuesne, J. McPhee, M. Zambrano-Bigiarini. 2017. The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Science* 21: 6307–6327.
- Ghobadi, M., S. Taherabadi, M. Ghobadi, G. Mohammadi and S. Jalali-Honarmand. 2013. Antioxidant capacity, photosynthetic characteristics and water relations of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to drought stress. *Industrial Crops and Product* 50: 29-38.
- Gindaba, J., S.J.E. Wand. 2005. Comparative effects of evaporative cooling, kaolin particle film, and shade net on sunburn and fruit quality in apples. *Horticultural Science* 40: 592-596.
- Glynn, P., C. Fraser and A. Gillian. 2003. Foliar salt tolerance of Acer genotypes using chlorophyll fluorescence. *Journal Arboriculture* 29: 61-65.
- Goldhamer, D., D. Dunai, L. Ferguson. 1994. Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Horticulturae* 356: 172-176.
- Gómez del Campo, M. y H. Rapoport. 2008. Descripción de la iniciación floral, floración, cuajado, caída de frutos y endurecimiento del hueso. *Revista Agropecuaria* 907: 400-406.
- Gómez del Campo, M. 2013. Summer deficit-irrigation strategies in a hedgerow olive orchard cv. "Arbequina": effect on fruit characteristics and yield. *Irrigation Science* 31: 259-269.

- González, M., H. Perales, M. Salcedo. 2008. La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica* 27: 119-129.
- Grassi, G., F. Magnani. 2005. Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. *Plant Cell Environment* 28(7): 834–849.
- Gucci, R., G. Caruso, C. Gennai, S. Esposito, S. Urbani, M. Servili. 2019. Fruit growth, yield and oil quality changes induced by deficit irrigation at different stages of olive fruit development. *Agricultural Water Management* 212: 88-98.
- Gucci, R., E. Fereres, D. Goldhamer. 2012. Olive. pp: 300-313. In: Steduto, P., T. Hsiao, E. Fereres, D. Raes (eds). *Crop yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage paper 66. Rome, Italy.
- Guerfel, M., O. Baccouri, D. Boujnah, W. Chaibi, M. Zarrouk. 2009. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae* 119: 257-263.
- Guo S., Y. Zhou, N. Song, Q. Shen. 2006. Some physiological processes related to water use efficiency of higher plants. *Agricultural Sciences in China* 5(6): 403-411.
- Hernandez-Santana, V., C. Rodriguez-Dominguez, J. Fernández, A. Diaz-Espejo. 2016. Role of leaf hydraulic conductance in the regulation of stomatal conductance in almond and olive in response to water stress. *Tree Physiology* 36: 1-11.
- Hernandez-Santana, V., J. Fernández, M. Cuevas, A. Perez-Martin, A. Diaz-Espejo. 2017. Photosynthetic limitations by water deficit: Effect on fruit and olive oil yield, leaf area and trunk diameter and its potential use to control vegetative growth of super-high density olive orchards. *Agricultural Water Management* 184: 9–18.
- Horn. R., H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research* 102 (2): 201-208.
- Hueso, S., G. Brunetti, N. Senesi, K. Farrag, T. Hernández, C. Garcia. 2012. Semiarids soils submitted to severe drought stress: influence on humic acid characteristics in organic-amended soils. *Journal of Soils and Sediments* 12: 503-512.
- Hueso, S., T. Hernández, C. García. 2011. Resistance and resilience of the soil microbial biomass to severe drought in semiarid soils: The importance of organic amendments. *Applied Soil Ecology* 50(Supplement C): 27–36.
- Hugalde, I., H. Vila. 2014. Comportamiento isohídrico o anisohídrico en vides.... ¿Una controversia sin fin? *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 39(1): 75-82.
- Iniesta, F., L. Testi, F. Orgaz, F. Villalobos. 2009. The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy* 30: 258-265.
- Intrigliolo, D. S., J. R. Castel. 2008. Effects of irrigation on the performance of grapevine cv. Tempranillo in Requena, Spain. *American Journal of Enology and Viticulture* 59: 30-38.
- Jimenez-Casas, M., J. Zwiazek. 2013. Effects of branch pruning and seedling size on total transpiration and tissue Na and Cl accumulation in *Pinus leiophylla* seedlings exposed to salinity. *Forest Science* 59: 407-415
- Kader, M., M. Senge, M. Mojid. 2017. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil & Tillage Research* 168: 155-166.
- Katerji, N., M. Mastrorilli, G. Rana. 2008. Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy* 28: 493-507.

- Kim, J. H., S. J. Kim, S. H. Cho, W. S. Chow, C. H. Lee. 2005. Photosystem I acceptor side limitation is a prerequisite for the reversible decrease in the maximum extent of P700 oxidation after short-term chilling in the light in four plant species with different chilling sensitivities. *Physiologia Plantarum* 123: 100–107.
- Kremer, C., L. Reyes, T. Fichet, V. García de Cortázar, J. Haberland. 2017. Physiological and production responses of olive (*Olea europaea* L.) cv. Frantoio under regulated deficit irrigation on a semiarid mediterranean weather condition (Cholqui, Maipo Valley, Chile). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo* 50(1): 73-83.
- Lara E. 2019. 25% de fruticultores dice que situación es "insostenible" debido a sequía en Chile, según encuesta, Bío Bío Chile. Disponible en <https://www.biobiochile.cl/especial/arrayan/noticias/2019/11/18/25-de-fruticultores-cree-que-situacion-es-insostenible-debido-a-sequia-en-chile-segun-encuestas.html>
- Li, H., Q. Wang, L. Su, B. Shi, G. Zhou. 2017. Light response characteristic of photosynthesis rate and stomatal conductance in red globe grape. *Agricultural Research in the Arid Areas* 35(4): 230-236.
- Mancosu, N., R. Snyder, G. Kyriakakis, D. Spano. 2015. Water scarcity and future challenges for food production. *Water* 7: 975–992.
- Marino, G., F. Pernice, F. Marra, T. Caruso. 2016. Validation of an online system for the continuous monitoring of tree water status for sustainable irrigation managements in olive (*Olea europaea* L.). *Agricultural Water Management* 177: 298-307.
- Medrano, H., J. Escalona, J. Bota, J. Gulías, J. Flexas. 2002. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: the interest of stomal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany* 89: 895-905.
- Montes, C., J. Pérez-Quezada, A. Peña-Neira, J. Tonietto. 2012. Climatic potential for viticulture in Central Chile. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 18: 20–28.
- Moore, A. D., M.J. Robertson, R. Routley. 2011. Evaluation of the water use efficiency of alternative farm practices at a range of spatial and temporal scales: A conceptual framework and a modelling approach. *Agricultural Systems* 104: 162–174.
- Mora, M., B. Schnettler, T. Fichet, C. Silva, L. Estrada. 2013. Desarrollo estratégico del Mercado del aceite de oliva en Chile. pp. 227-262. T. Fichet y J.L. Henríquez. (Eds) In: *Aportes al conocimiento del cultivo de olivo en Chile. Serie Ciencias Agronómicas N°21. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile.*
- Moriana, A., F. Orgaz, M. Pastor, E. Fereres. 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of American Society of Horticultural Science* 128: 425-431.
- Mossad, A., A. Scalisi, R. Lo Bianco. 2017. Growth and water relations of field-grown ‘Valencia’ orange trees under long-term partial rootzone drying. *Irrigation Science* 271: 1-16.
- Munizaga, S. 2019. Efecto del déficit hídrico mediante desecamiento parcial de raíces en vid variedad Red Globe sobre el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua. Memoria Ing. Agrónomo. Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Agronómicas. 36 p.
- National Research Council. 2010. A pivotal time in agriculture. In: *Toward sustainable agricultural systems in the 21st century.* National Academies Press. Washington. USA.
- Niu, W., L. Liu, X. Chen. 2013. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. *Irrigation Science* 31(4): 545-555.
- ODEPA. (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2018. Región de Coquimbo. Información regional 2018. Santiago, Chile: ODEPA. 15 p.

- ODEPA. (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2018. Catastro frutícola. <https://reportes.odepa.gob.cl/#/catastro-superficie-fruticola-regional>
- ODEPA. (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2015. Información regional 2015 Región de Coquimbo. Santiago, Chile: ODEPA. 17 p.
- ODEPA, Distribución de la superficie frutal por provincias, disponible en <https://reportes.odepa.gob.cl/#/catastro-superficie-fruticola-regional>, consultado en febrero 2020
- OPIA (Observatorio para la Innovación Agraria, Agroalimentaria y Forestal). 2016. Programa de desarrollo para la sustentabilidad ambiental de la Región de Coquimbo: Componente Caprino, disponible en https://www.opia.cl/static/website/601/articulos-77321_archivo_04.pdf
- Pascual, I., M. C. Antolin, C. García, A. Polo, M. Sánchez-Díaz. 2007. Effect of water deficit on microbial characteristics in soil amended with sewage sludge or inorganic fertilizer under laboratory conditions. *Technology* 98: 29–37.
- Provedo. 2012. Ciclo anual del olivo: La fenología. Reportaje N°21. España: Viveros Provedo. 9p.
- Puertas, C., E. Trentacoste, J. Morábito, J. Perez-Peña. 2011. Effects of regulated deficit irrigation during stage III of fruit development on yield and oil quality of olive trees (*Olea europaea* L. ‘Arbequina’). *Acta Horticulturae* 889: 303-309.
- Quintana, R. 2019. Efectos de la aplicación de enmiendas orgánicas y manejos de chapoda en las propiedades físicas del suelo y la condición de la vid cv Chardonnay sometida a sequía. Tesis Ing. Agrónomo y Magíster en Manejo de Suelos y Aguas. Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Agronómicas. 51 p.
- Rasaei, B., M. E. Ghobadi, M. Ghobadi, A. Najaphy. 2013. Reducing effects of drought stress by application of humic acid, mycorrhiza and Rhizobium on chickpea. *International Journal of Agricultural and Crop Science* 5(16): 1775-1778.
- Red Agrícola. 2016. Lecciones de la sequía en la Región de Coquimbo. Revista RedAgrícola, noviembre 2016. Disponible en <http://www.redagricola.com/cl/lecciones-la-sequia-la-region-coquimbo-estamos-terremoto-todavia-no-termina-francisco-gonzalez-fruticultor-presidente-la-asociacion-canalistas-del-embalse-cogoti/>
- Red Agrícola. 2019a. Ajustes de gestión del agua en Limarí dan respiro a los regantes. Revista RedAgrícola, octubre 2019. Disponible en <http://www.redagricola.com/cl/ajustes-de-gestion-del-agua-en-limari-dan-respiro-a-los-regantes/>
- Red Agrícola. 2019b. Estrategias agronómicas para enfrentar la sequía en frutales. Revista RedAgrícola, octubre 2019. Disponible en <http://www.redagricola.com/cl/estrategias-agronomicas-para-enfrentar-la-sequia-en-frutales/>
- Rojas, G., A. Posadas, R. Quiroz, R. Holle, M. Malaga. 2007. Secado parcial de raíces: una promisoriosa técnica de riego en papa (*Solanum tuberosum* L.), *Revista Zonas Áridas* 11: 206-218.
- Romero, P., J. Pérez, F. Del Amor, A. Martínez, I. Dodd, P. Botía. 2014. Partial root zone drying exerts different physiological responses on field-grown grapevine (*Vitis vinifera* cv. Monastrell) in comparison to regulated deficit irrigation. *Functional Plant Biology* 41: 1087–1106.
- Romero, P., J. Fernández, R. Gil-Muñoz, P. Botía. 2016. Vigour-yield-quality relationships in long-term deficit irrigated winegrapes grown under semiarid conditions. *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 28: 23-51.

- Sadras, V. 2009. Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. *Irrigation Science* 27: 183-190.
- Sadras, V., H. Schultz, J. Girona, J. Marsal. 2012. Grapevine. pp: 460-485. In: Steduto, P., T. Hsiao, E. Fereres, D. Raes (eds). *Crop yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage paper 66. Rome, Italy.
- Sánchez-Díaz, M., J. Aguirreolea. 2008. *Transpiración y control estomático*. Segunda edición. Madrid, España: McGRAW-HILL Interamericana. 667p.
- Santibáñez, F., P. Santibáñez, R. Cabrera, L. Solís, M. Quiroz, J. Hernández. 2008. Estudio Final (cap. 1). En: *Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático*. Santiago de Chile, AGRIMED. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 181p.
- Santibáñez, F., V. Santibáñez, C. Caroca, P. Morales, P. Gonzales, N. Gajardo, P. Perry, C. Melillán. 2014. *Atlas del cambio climático en las zonas de régimen árido y semiárido: Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana*. Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 138 p.
- Santibáñez, F., P. Santibáñez, C. Caroca, P. González. 2017. *Atlas agroclimático de Chile. Tomo II: Regiones de Atacama y Coquimbo*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Agrimed. 42p.
- Seguel, O., V. Beyá-Marshall, B. Baeza. 2020. Uso de enmiendas para mejorar las condiciones físicas de suelo. pp: 25-37. En: Beyá-Marshall, V., M. Galleguillos (eds.) *Bases para la optimización del uso del agua de riego en paltos y cítricos*. Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.
- Seguel, O., C. Parra, I. Homer, C. Kremer, V. Beyá-Marshall. 2019. Efecto del ácido húmico sobre las propiedades físicas de un Haplohúmul cultivado con trigo. *AgroSur* 47(3): 11-22.
- Seguel, O., N. Franck y J. Toro. 2013. Efecto acumulado en el suelo de la aplicación de enmiendas húmicas en camellones con cítricos, Región de Coquimbo. *Revista Riego y Drenaje* 12(5): 33-35.
- Sellés, G., R. Ferreyra, I. Sellés, G. Lemus. 2006. Efecto de diferentes regímenes de riego sobre la carga frutal, tamaño de fruta y rendimiento del olivo cv. Sevillana. *Agricultura Técnica (Chile)* 66(1): 48-56.
- Sellés, G., R. Ferreyra, C. Aspillaga, C. Zúñiga. 2012. Requerimientos de riego en uva de mesa: experiencias en el valle del Aconcagua. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). *Boletín INIA* N° 242. Santiago de Chile. 80p.
- Sethi, V.P., S. K. Sharma. 2007. Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy* 81(12): 1447–1459.
- Shi, C., B. Dong, Y. Qiao, X. Guan, F. Si, X. Zheng, M. Liu. 2015. Physiological and morphological basis of improved water-use-efficiency in wheat from partial root-zone drying. *Crop Science* 54: 2745-2751.
- Sneh, M. 2006. *El riego por goteo*. Tel Aviv, Israel. MASHAV. 200 p.
- Song Z., H. Gao, P. Zhu, C. Peng, A. Deng, C. Zheng. 2014. Organic amendments increase corn yield by enhancing soil resilience to climate change. *The Crop Journal* 3: 110-117.
- Souvignet, M., J. Heinrich. 2010. Future temperatures and precipitations in the arid northern-central Chile: A multi-model downscaling approach. In 6th Alexander von Humboldt International Conference on Climate Change, Natural Hazards, and Societies, March 15-19, Merida, Mexico.
- Taiz, L., E. Zeiger. 2006. *Fisiología vegetal*. Universitat Jaume I. Vol 1. 1338 p.

- Trentacoste, E. R., O. Contreras-Zanessi, V. Beyá-Marshall, C.M. Puertas. 2018. Genotypic variation of physiological and morphological traits of seven olive cultivars under sustained and cyclic drought in Mendoza, Argentina. *Agricultural Water Management* 196: 48–56.
- Uribe, J., R. Cabrera, A. de la Fuente, M. Paneque. 2012. Atlas bioclimático de Chile. Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile. CORFO - Ministerio de Bienes Nacionales. 229p.
- Van Leeuwen, C., O. Tregoat, X. Choné, B. Bois, D. Pernet, J. Gaudillere. 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 43(3): 121-134.
- Vásquez, A. 2019. Efecto de riego deficitario controlado sobre el comportamiento fisiológico, rendimiento y calidad del fruto de olivo. Memoria Ing. Agrónoma. Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Agronómicas. 42 p.
- Zhang, X., A. Zhu, W. Yang, X. Xin, J. Zhang, S. Ge. 2018. Relationships between soil macroaggregation and humic carbon in a sandy loam soil following conservation tillage. *Journal of Soils and Sediments* 18(3): 688-696.
- Zúñiga-Espinoza, C, C. Aspillaga, R. Ferreyra, G. Sellés. 2015. Response of table grape to irrigation water in the Aconcagua valley, Chile. *Agronomy* 5: 405-417.

9. Apéndice



Imagen 9.1. Días de campo en los predios de los asociados.



Imagen 9.2. Actividad de capacitación en la Estación Experimental las Cardas, a cargo del Centro de Estudios de Zonas Áridas, CEZA.