



UNIVERSIDAD
DE CHILE

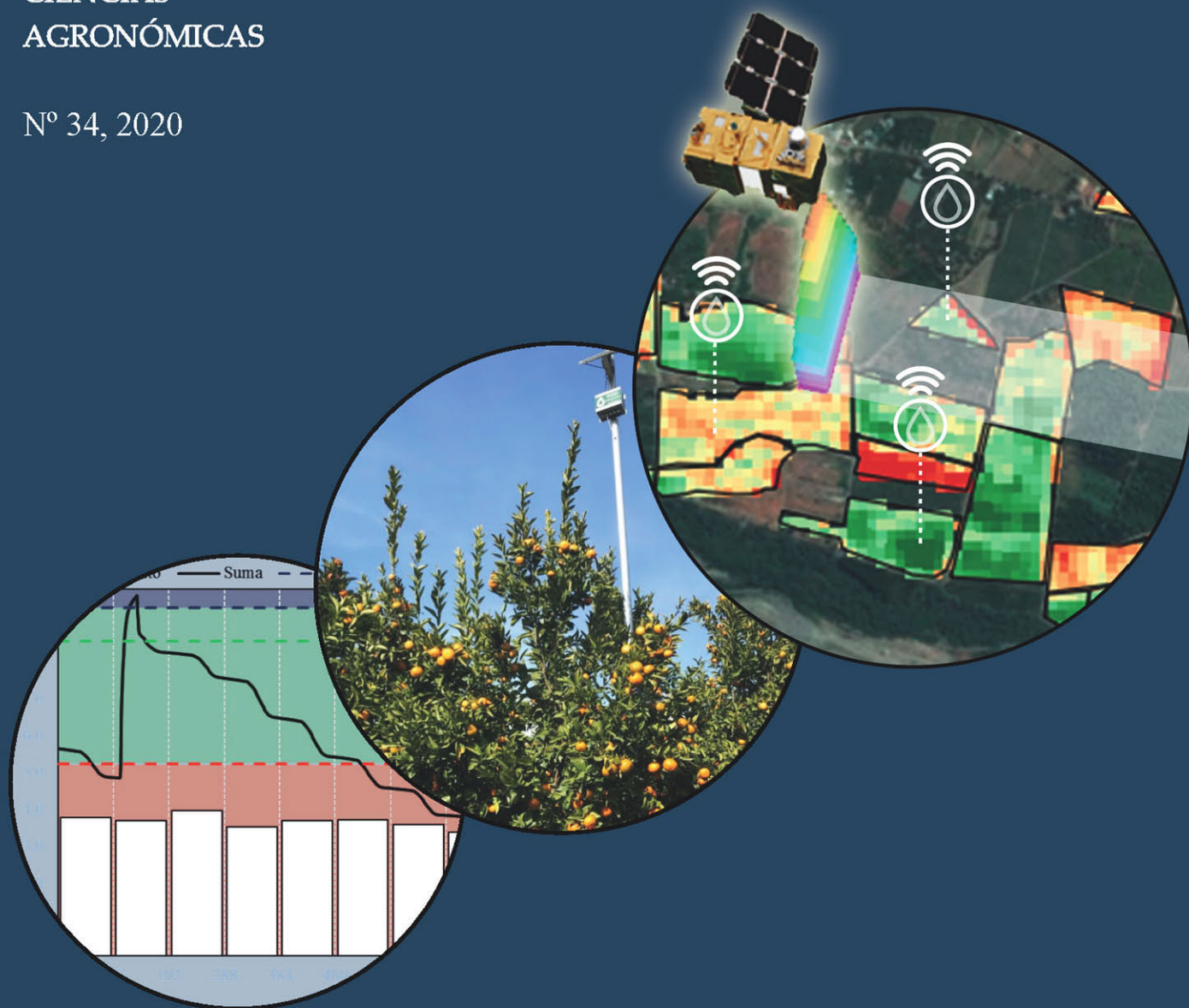
OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO EN PALTOS Y CÍTRICOS

Editores

Víctor Beyá-Marshall y Mauricio Galleguillos T.

SERIE
CIENCIAS
AGRONÓMICAS

Nº 34, 2020





UNIVERSIDAD
DE CHILE

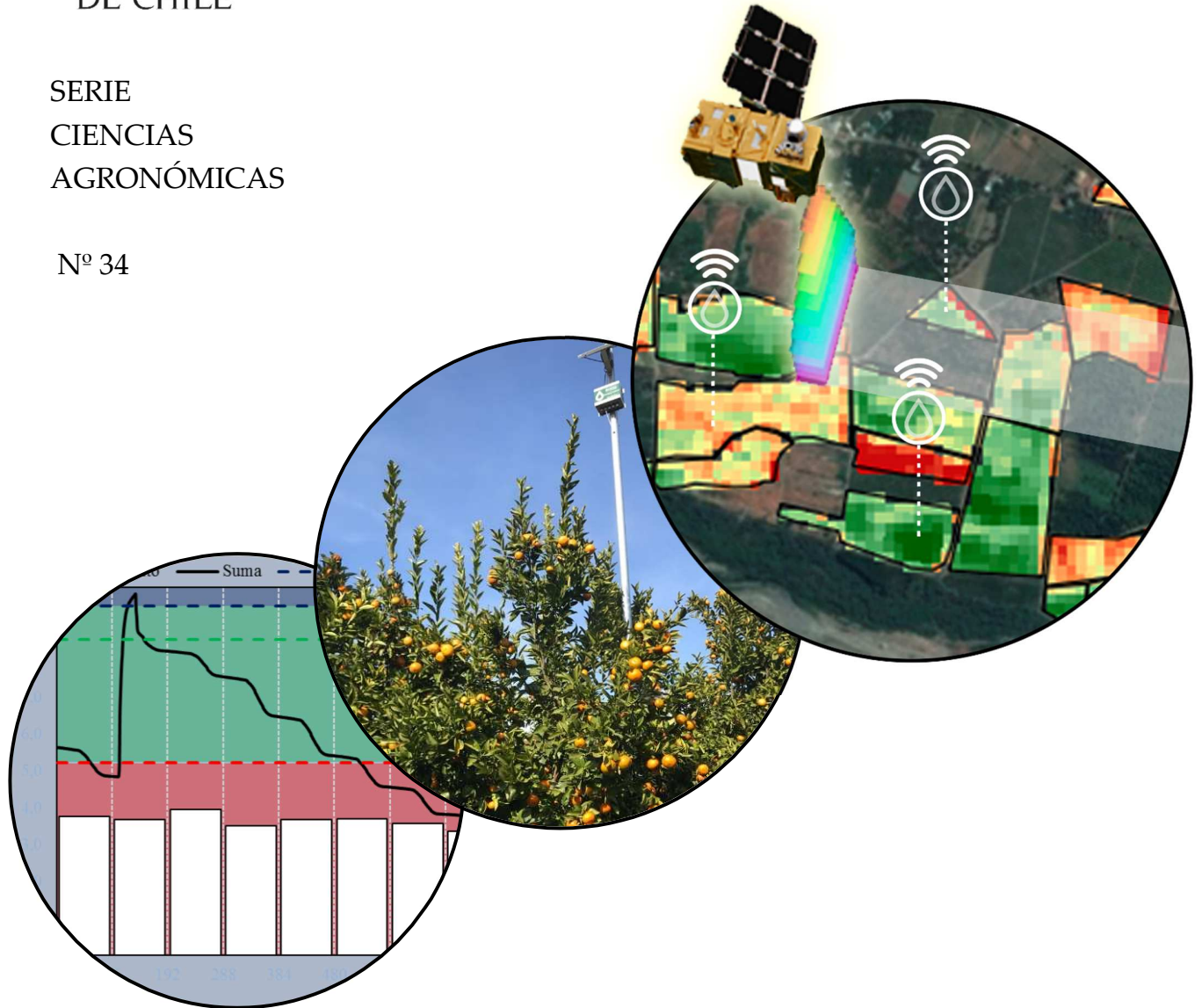
SERIE
CIENCIAS
AGRONÓMICAS

Nº 34

OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO EN PALTOS Y CÍTRICOS

Editores

Víctor Beyá-Marshall y Mauricio Galleguillos T.



UNIVERSIDAD DE CHILE

SERIE CIENCIAS AGRONÓMICAS N° 34

OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO EN PALTOS Y CÍTRICOS

Víctor Beyá-Marshall y Mauricio Galleguillos T.

EDITORES



UNIVERSIDAD DE CHILE



Santiago - Chile, 2020

Editores: Víctor Beyá-Marshall y Mauricio Galleguillos T.

Comité revisor: Gabino Reginato M. y Thomas Fichet L.

OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO EN PALTOS Y CÍTRICOS

Santiago, Universidad de Chile

Facultad de Ciencias Agronómicas, julio de 2020

Serie Ciencias Agronómicas N°34

176 páginas

Financiamiento

Fondo de Innovación para la Competitividad del Gobierno Regional de O'Higgins y su Consejo Regional, enmarcado en la Estrategia Regional de Innovación

ISBN SERIE: 978-956-19-0363-0

ISBN LIBRO: 978-956-19-1182-6

P.I. LIBRO: 5485

Facultad de Ciencias Agronómicas

Universidad de Chile

Casilla 1004, Santa Rosa 11.315

La Pintana, Santiago

Edición: 330 ejemplares

Diseño: Gráfica Marmor

Impresión: Gráfica Marmor

AUTORES

Brian Baeza Sandoval
Ing. Agr.
Universidad de Chile

Mauricio Galleguillos Torres
Ing. Agr., M.Sc., Ph.D.
Universidad de Chile

Víctor Beyá Marshall
Ing. Agr., M.Sc
Universidad de Chile

Cristián Kremer Fariña
Ing. Agr., Ph.D.
Universidad de Chile

Chris Bustamante Acevedo
Ing. Agr., M.Sc
Universidad de Chile

Estefanía Pizarro Arias
Ing. Agr., M.Sc
Universidad de Chile

Rodrigo Callejas Rodríguez
Ing. Agr., Dr.
Universidad de Chile

Óscar Seguel Seguel
Ing. Agr., Dr.
Universidad de Chile

Andrés Ceballos Comisso
Ing. Rec. Nat. Renov.
Universidad de Chile

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	8
PRÓLOGO	9
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 1. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DE SUELO Y SU RELACIÓN CON EL POTENCIAL PRODUCTIVO DE PALTOS Y CÍTRICOS EN LA REGIÓN DE O'HIGGINS	12
Víctor Beyá-Marshall, Óscar Seguel S. y Brian Baeza S.	
<i>Las zonas productoras de paltos y cítricos en la Región de O'Higgins.....</i>	<i>12</i>
<i>Condiciones y propiedades físicas del suelo</i>	<i>13</i>
<i>Condiciones físicas de suelo óptimas para paltos y cítricos</i>	<i>15</i>
<i>Diagnóstico de las condiciones físicas de suelo en los huertos de paltos y cítricos estudiados</i>	<i>20</i>
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	<i>23</i>
CAPÍTULO 2. USO DE ENMIENDAS PARA MEJORAR LAS CONDICIONES FÍSICAS DE SUELO	26
Óscar Seguel S., Víctor Beyá-Marshall y Brian Baeza S.	
<i>Enmiendas orgánicas y propiedades físicas de suelo.....</i>	<i>26</i>
<i>Ensayos de enmiendas de suelo en la zona de Peumo.....</i>	<i>27</i>
<i>Resultados en limoneros 'Eureka'</i>	<i>31</i>
<i>Resultados en paltos 'Champion'</i>	<i>35</i>
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	<i>38</i>
CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE RIEGO TECNIFICADO: DIAGNÓSTICO, MANTENCIÓN Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS.....	41
Brian Baeza S., Víctor Beyá-Marshall y Cristián Kremer F.	
<i>Diagnóstico de sistemas de riego tecnificado usados en huertos de paltos y cítricos de la Región de O'Higgins</i>	<i>41</i>
<i>Métodos de riego tecnificado.....</i>	<i>41</i>
<i>Componentes de un sistema de riego localizado</i>	<i>44</i>
<i>Capacidad del sistema de riego.....</i>	<i>59</i>
<i>Control y diagnóstico en el cabezal de riego</i>	<i>61</i>
<i>Mantenimiento y limpieza de la red de distribución.....</i>	<i>65</i>
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	<i>70</i>

CAPÍTULO 4. BASES PARA EL CÁLCULO DE NECESIDADES DE RIEGO, USO E INTERPRETACIÓN DE ELEMENTOS TECNOLÓGICOS PARA LA GESTIÓN DEL RIEGO EN PALTOS Y CÍTRICOS	74
Brian Baeza S., Víctor Beyá-Marshall, Chris Bustamante A., Rodrigo Callejas R. y Cristián Kremer F.	
<i>Necesidades de agua de riego</i>	74
<i>Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc)</i>	75
<i>Programación del riego</i>	81
<i>Tecnologías para la optimización del riego</i>	83
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	99
CAPÍTULO 5. DETERMINACIÓN DEL MOMENTO OPORTUNO DE RIEGO MEDIANTE SONDAS FDR Y POTENCIAL HÍDRICO EN PALTOS Y CÍTRICOS: EFECTOS EN LA PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD DE LA FRUTA.....	103
Víctor Beyá-Marshall, Cristián Kremer F. y Brian Baeza S.	
<i>Sitios de estudio y metodología</i>	104
<i>Resultados</i>	112
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	120
CAPÍTULO 6. RELACIONES HÍDRICAS EN PALTOS Y CÍTRICOS	123
Victor Beyá-Marshall, Cristián Kremer F. y Brian Baeza S.	
<i>Fundamentos de la relación suelo-agua-planta-atmósfera</i>	123
<i>Relaciones hídricas en paltos y cítricos</i>	125
<i>Metodología de evaluación</i>	129
<i>Planillas del estatus hídrico esperado para paltos y cítricos en condiciones óptimas</i> ..	132
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	134
CAPÍTULO 7. MODELAMIENTO DEL BALANCE HÍDRICO EN SISTEMAS PRODUCTIVOS BAJO RIEGO Y ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA	138
Estefanía Pizarro A. y Mauricio Galleguillos T.	
<i>Modelamiento del balance hídrico</i>	138
<i>¿Qué es la modelación de procesos?</i>	138
<i>Base física de los modelos</i>	139
<i>Puesta en marcha de modelos (parametrización)</i>	139
<i>Huella hídrica estimada mediante modelación</i>	140
<i>Posibilidad de elaboración de escenarios de uso del agua</i>	141
<i>Caso de estudio: modelación de transferencias hídricas en limoneros</i>	141
<i>Conclusión y recomendaciones</i>	148

CAPÍTULO 8. USO E INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES COMO HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES..... 151

Andrés Ceballos C. y Mauricio Galleguillos T.

Nociones fundamentales de la teledetección 151

Adquisición de datos remotos 154

Propiedades de los sensores remotos 155

Propiedades radiativas de los cultivos 155

La imagen digital 159

Generalidades de una plataforma geoespacial 161

Conclusiones y recomendaciones 165

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más sincera gratitud al Gobierno Regional de O'Higgins y a su Consejo Regional por el apoyo al proyecto 'Plataforma geoespacial para la optimización del recurso hídrico en cultivos de paltos y cítricos de agricultores pequeños y de subsistencia' (IDI 30474710). Ello permitió realizar investigación y transferencia tecnológica para los pequeños productores de paltos y cítricos de la Región. Así también, por haber accedido a compartir los resultados del proyecto la publicación en la Serie Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, la que esperamos sea de utilidad para estudiantes de Agronomía, técnicos, fruticultores, docentes, asesores, empresarios y productores de paltos y cítricos.

A los productores y productoras, en especial a Manuel Ibarra C., José Cartagena S., José Olea L, Sergio Cartagena C., Eduardo Marambio H., Carlos Gutiérrez R., Hernán Vicencio, Ana Yáñez A., quienes incentivaron y participaron activamente en el desarrollo de este proyecto. A Don José Ortega y Rodrigo Gómez (Fundo Los Molinos) y Erick Leiva (Sofruco), por su tremenda colaboración en el desarrollo de ensayos y actividades de transferencia tecnológica. A los profesores del Liceo Jean Buchanan de Larraín (Peumo), Jaime Clavel, Juan Francisco Boscoso y a su directora, Cecilia Rodríguez, por su colaboración y participación en actividades de transferencia tecnológica a estudiantes y productores. A los técnicos de Prodesal Peumo, Felipe Jerez, Wladimir Zamorano y Robert Marín, quienes siempre apoyaron al desarrollo y difusión del proyecto. A Ricardo Quiroz (Coopeumo), por su contribución en aumentar la red de estaciones meteorológicas de libre acceso para los productores. A Tomás Vicente, gerente comercial de Wiseconn, por apoyar con el servicio de telemetría, con su plataforma de visualización y control de datos DropControl, de manera gratuita para los productores. A los estudiantes y egresados de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Chile, Emilia Arcos, Catalina Orquera, Lucas Riveros, Roberto Correa y Cristián Guevara, por su contribución en la ejecución y evaluación de ensayos de riego y enmiendas orgánicas. A los académicos Gabino Reginato M. y Thomas Fichet L. y la Ing. Agr. Lucía Michel por su exhaustiva y constructiva revisión del presente libro.

En especial, agradecemos y dedicamos este libro a los pequeños productores de las comunas de Peumo, Pichidegua y Las Cabras, con quienes compartimos, colaboramos, aprendimos y avanzamos hacia una fruticultura sostenible en la Región.

PRÓLOGO

La agricultura familiar campesina (AFC) es un segmento social y económico de gran importancia, representa un universo del orden de las 280.000 explotaciones, equivalentes a casi el 85% del total de unidades productivas del país. La realidad de estos productores indica que existe una alta brecha tecnológica entre agricultores, quienes difieren en el acceso a información y tecnología, siendo usualmente el factor limitante el alto costo, lo que atenta contra las posibles mejoras de su competitividad. Por otro lado, la mayoría de los productores de la AFC poseen una edad avanzada, por lo que incorporar tecnología y herramientas nuevas es un desafío mayor. En los últimos diez años, Chile se ha enfrentado a una sequía extensa y prolongada, la cual ha limitado la producción agrícola, principalmente en la zona centro y norte del país y, de acuerdo con las proyecciones de cambio climático, todo indica que el déficit será más profundo en el futuro. En este sentido, el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), principal institución gubernamental de apoyo a la pequeña agricultura, ha avanzado fuertemente en la incorporación de diversas técnicas y sistemas de riego tecnificado, con miras a ser más eficientes en el uso del recurso hídrico. No obstante, para lograr una adecuada adaptación, frente a los adversos escenarios, se requiere conjugar esfuerzos en diversas dimensiones, en especial, para la agricultura familiar campesina, al ser un sector altamente vulnerable a la escasez hídrica.

En este escenario, una de las regiones más relevante en la producción de alimentos del país, y que se verá afectada fuertemente por la escasez hídrica, es la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Para enfrentar este problema, y mantener la fortaleza del sector frutícola de la Región, la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, a través del Centro Regional de Estudios Agronómicos (UCHILECREA), desarrolló el proyecto "Plataforma geoespacial para la optimización del recurso hídrico en cultivos de paltos y cítricos de agricultores pequeños y de subsistencia", el cual fue apoyado y financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) del Gobierno Regional de O'Higgins. El objetivo del proyecto fue desarrollar y transferir una plataforma de precisión para optimizar el recurso hídrico de paltos y cítricos, a través de la generación de nuevas herramientas y la implementación de tecnología, con el fin último de mejorar la competitividad de la pequeña agricultura de la región.

Este trabajo se realizó durante dos temporadas y, dado el alto interés concitado, contó con la estrecha colaboración de pequeñas, medianas y grandes empresas ligadas a la producción de paltos y cítricos de la región. Como resultado, en este libro se describen, en 8 capítulos, diversas investigaciones que tributan a la adaptación frente a la escasez hídrica, representando una contribución para garantizar el desarrollo presente y futuro del país. Su contenido tiene el propósito de clarificar conceptos y entregar las bases para optimizar el uso del recurso hídrico de estos cultivos, al mejorar la condición física del suelo y aumentar la eficiencia de los sistemas productivos, facilitar el uso y la interpretación de la tecnología, y motivar a los productores a la innovación para asegurar la competitividad de sus huertos.

Los autores

INTRODUCCIÓN

Desde el año 2010, el territorio comprendido entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía han presentado un déficit de precipitaciones cercano al 30%. Esta disminución de las lluvias ocurre en una de las décadas más cálidas de los últimos 100 años, provocando que el déficit hídrico se acentúe, debido al aumento de la evaporación del agua desde lagos, embalses y cultivos, el aumento de la superficie plantada, la cual demanda más agua, y al aumento de la población, la que consume más agua y alimentos. La persistencia y extensión de la actual sequía es un evento extraordinario, por lo que se le ha denominado como “Megasequía”, y que está asociada al fenómeno del cambio climático (Garreaud et al., 2017; 2020).

Los cítricos y paltos representan cultivos importantes para la fruticultura nacional, en especial para las regiones de la zona centro-norte de Chile; Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana son las regiones que presentan mayor superficie plantada, representando el 81% y 94 % de la superficie nacional de cítricos y paltos, respectivamente (ODEPA, catastros entre 2017-2018). No obstante, a pesar de esta importante representatividad territorial, estos cultivos han sido afectados por intensos periodos de sequía, o más bien, se enfrentan a un proceso de aridización, dada la magnitud y temporalidad de la falta de agua. Esto ha dificultado satisfacer la importante demanda hídrica de estas especies y, por consecuencia, se ve limitado el potencial productivo. En este escenario, la reciente sequía en la zona, la cual se ha prolongado por más de 10 años en la Región de Coquimbo, pone en riesgo la continuidad de estos cultivos, lo que podría implicar una reconversión productiva. De esta manera, la Región de O’Higgins, que representa una superficie nacional de cítricos y paltos de 17,6% y 4,7% respectivamente, toma especial relevancia como proveedora actual y futura de estas especies, tanto para el mercado interno como para exportación (ODEPA, catastros entre 2017-2018). Si bien la Región de O’Higgins, por su localización geográfica, presenta mayores precipitaciones que la zona centro-norte, durante el último tiempo ha presentado episodios severos de déficit hídrico, como lo ocurrido en la temporada 2012-2013 y 2018-2019, donde se registró un déficit de precipitación del 50% y un 77%, respectivamente, con respecto a un año normal (463 mm promedio). La magnitud y frecuencia de estos episodios y su creciente proyección futura comprometen la subsistencia de la agricultura de pequeña escala y genera urgencia en implementar medidas que optimicen el recurso hídrico.

En la Región de O’Higgins, la producción de paltos y cítricos ha sido uno de los tradicionales y principales rubros de las comunas de Peumo, Las Cabras, San Vicente de Tagua Tagua y Pichidegua, donde la mayor parte de la superficie pertenece a productores pequeños y de subsistencia, que abastecen al mercado interno y, a su vez, son fuente de empleo agrícola del sector (ODEPA-Ministerio Agricultura-CIREN, 2013). Sin embargo, las metodologías de control del riego utilizadas por estos agricultores son nulas o presenta altos grados de ineficiencia; entre estas metodologías se destaca: la observación de calicatas y la determinación subjetiva del contenido de agua en el suelo, al tacto (Callejas et al., 2014). A su vez, gran parte de los huertos están ubicados sobre suelos de clases texturales finas “suelos pesados”; suelos de clase textural franco arcillo limosa, franco limosa y

arcillosa, lo que implica que el manejo del riego debe ser muy cuidadoso, sobre todo en el cultivo de palto, especie altamente susceptible a la baja aireación, baja porosidad, exceso de agua y compactación.

En este sentido, existe un grupo importante de agricultores que están conscientes de la situación. Ellos están organizados en distintas instituciones, como AFRUPAL S.A (Asociación de Productores de Frutas y Paltas), COOPEUMO (Cooperativa Campesina Intercomunal Peumo), usuarios de INDAP y PRODESAL, y tienen gran interés en mejorar la competitividad de sus cultivos a través de la innovación de procesos.

De esta manera, el objetivo de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, a través de UCHILECREA, ha sido disminuir la brecha tecnológica en las prácticas de riego, mediante el establecimiento de una plataforma de transferencia tecnológica, lo que ha permitido entregar herramientas e instrumentos para la gestión del riego, además de apoyar permanente a los agricultores, generando un polo de innovación y desarrollo de los cultivos.

Referencias

- CALLEJAS, R.; J. VERA; M. RÍOSECO; F. PROHENS; H. OSORIO; P. PINO; J. NAVARRETE Y R. GÁLVEZ. 2014. Generación e integración de tecnologías destinada al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras de fruta en Chile. *Aqua-LAC*, 6 (2): 71 – 83.
- ODEPA-CIREN. Catastros frutícolas, principales resultados, Región de O'Higgins/ Julio 2018. Revisado el 2 de mayo de 2019 en: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/CatastroOhiggins2018.pdf>
- GARREAUD, R.; C. ÁLVAREZ-GARRETON; J. BARICHIVICH; J.P. BOISIER; D. CHRISTIE; M. GALLEGUILLOS; C. LE QUESNE; J. MCPHEE Y M. ZAMBRANO-BIGIARINI. 2017. The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 98: 1–37.
- GARREAUD, R.; J. BOISIER; R. RONDANELLI; A. MONTECINOS; H. SEPÚLVEDA AND D. VELOSO-ÁGUILA. 2020. The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40: 421–439.

CAPÍTULO 1. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DE SUELO Y SU RELACIÓN CON EL POTENCIAL PRODUCTIVO DE PALTOS Y CÍTRICOS EN LA REGIÓN DE O'HIGGINS

Víctor Beyá-Marshall, Óscar Seguel S. y Brian Baeza S.

Las zonas productoras de paltos y cítricos en la Región de O'Higgins

Como se mencionó anteriormente, la producción de paltos y cítricos son actividades agrícolas históricas de la pequeña agricultura de las comunas de Peumo, Pichidegua, Las Cabras y San Vicente de Tagua Tagua. Si bien estas comunas pertenecen al extenso Valle del Cachapoal, sus condiciones geomorfológicas y cercanía al río Cachapoal, generan un microclima benéfico que les permiten tener una baja frecuencia de heladas, siendo una de las principales razones de su característica microclimática. De hecho, según Santibáñez et al. (2017), la localidad de Peumo se caracteriza por presentar temperaturas que varían, en promedio, entre 29,5°C la máxima (enero) y 4,6°C la mínima (julio), con un promedio de seis heladas por año, una precipitación media anual de 636 mm y un período seco de 7 meses y una evapotranspiración potencial anual de 1.375 mm. Sus suelos bajo cultivo corresponden en su mayoría a Mollisoles e Inceptisoles (CIREN, 2002), de origen aluvial y aluvio-coluvial, profundos, estratificados y planos a ligeramente inclinados, correspondientes a terrazas antiguas del río Cachapoal, aunque también se utilizan en agricultura suelos que ocupan una posición del piedmont, con aportes coluviales de los suelos graníticos de los cerros que rodean a esta especial microzona. Estos suelos, si bien presentan una alta variabilidad, tanto en profundidad como espacialmente, predominan las texturas medias a finas; es decir, suelos de clase textural franca, franco limosa a franco arcillo limosa (Cuadro 1). En este sentido, en especies como los paltos y cítricos, el mal manejo de este tipo de suelos, asociado a una errónea gestión del riego, repercute rápidamente en el crecimiento y desarrollo de las raíces y, por consiguiente, en la productividad de estos frutales.

Cuadro 1. Caracterización de las propiedades físicas de los suelos, en los primeros 50 cm de profundidad (valores promedio n=3), de la Región de O'Higgins cultivados con paltos y cítricos.

Comuna	Sector	Serie de suelo	Cultivo	Clase textural	Da (g/cm ³)	Macroporosidad (%)	CC (%)	PMP (%)
Peumo	Aguas Claras	La Rosa	Palto	FA	1,42	10,0	38,9	25,4
Peumo	Codao	La Rosa	Palto	F	1,52	8,6	37,7	23,3
Peumo	Gulutren	La Rosa	Limonero	F	1,31	16,8	29,2	20,4
Peumo	La Rosa	La Rosa	Naranja	FA	1,37	10,2	36,8	23,5
Pichidegua	Patagua Cerro	Larmahue	Naranja	FA	1,47	5,6	52,6	26,2
Pichidegua	Santa Amelia	Millahue	Naranja	Fa	1,28	14,9	39,4	13,7
Pichidegua	Santa Amelia	Palquiales	Limonero	Fa	1,66	17,6	24,0	15,2
Peumo	La Rosa	Pataguas	Naranja	FA	1,35	14,1	31,1	21,5
Peumo	Aguas Claras	Peumo	Palto	FL	1,28	13,5	37,5	14,7
Peumo	Codao	Peumo	Mandarino	F	1,56	13,6	32,5	19,9
Peumo	La Cantera	Peumo	Palto	F	1,46	18,5	29,6	15,5
Peumo	La Granja	Peumo	Palto	F	1,34	19,4	27,6	15,9
Peumo	Gulutren	Pimpinela	Palto	F	1,35	3,6	45,6	21,0
Malloa	El Tambo	T. aluvial A-Z	Naranja	F	1,33	19,7	27,1	14,9
San Vicente TT	Los Rastrojos	Zamorano	Naranja	FAL	1,20	16,9	35,1	28,2

Da: Densidad aparente; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; T. aluvial A-Z: Terraza aluvial Antivero-Zamorano; San Vicente de TT: San Vicente de Tagua Tagua.

Condiciones y propiedades físicas del suelo

El suelo es un sistema complejo, variable y altamente dinámico, tanto temporal como espacialmente, donde las prácticas agronómicas juegan un papel fundamental en su conservación (Hillel, 2003). Las condiciones físicas de los suelos toman un papel crítico en la productividad de cualquier cultivo y/o frutal y, en particular, en paltos y cítricos; ambas especies, pero sobre todo el palto, son altamente sensibles a condiciones físicas desfavorables de suelo (compactación, bajos niveles de macroporosidad y alta resistencia mecánica), las cuales tiene un impacto directo en el crecimiento y desarrollo de las raíces y, por lo tanto, la producción (Nel y Bennie, 1984; Ferreyra et al., 2006). Las propiedades físicas del suelo, tales como textura, densidad aparente, distribución y tamaño de poros, y las características morfológicas (profundidad efectiva, estructura y estratificación) tienen un efecto directo en el crecimiento de las raíces, debido a que su interacción es la que determina las condiciones de aireación, hídricas, térmicas y mecánicas de los suelos, las cuales impactan directamente en el crecimiento radical (Letey, 1985). En este sentido, la cantidad de agua que existe en el sistema poroso del suelo es la que afecta de mayor manera las condiciones físicas del suelo. Es así como, por ejemplo, un exceso de agua generará una falta de oxigenación en la zona de raíces y condiciones de baja temperatura, además de una baja resistencia mecánica, dejando el suelo susceptible a la compactación; al contrario, un bajo contenido de agua generará un estrés hídrico y una alta resistencia mecánica,

dificultando el crecimiento de las raíces (Seguel et al., 2015). De esta manera, el riego debe mantener una condición de suelo en un adecuado equilibrio agua-aire para la planta.

La condición física del suelo depende fuertemente de dos propiedades inherentes a él: la textura y la estructura. La textura corresponde a la proporción de partículas de arena, limo y arcilla, teniendo directa relación con la facilidad de labranza, la capacidad de almacenamiento y flujo de agua. La estructura del suelo corresponde al ordenamiento de las partículas de arena, limo y arcilla, las cuales se agrupan y ordenan formando unidades mayores, llamadas agregados. La importancia de los agregados es que permiten la existencia de poros gruesos o macroporos (dado el espacio entre estos), los que permiten el flujo rápido del agua dentro del suelo y la renovación del aire hacia las raíces. Por lo tanto, una buena estructura es necesaria para el adecuado desarrollo de los cultivos. La estructura se favorece en suelos con contenidos de arcilla mayor a un 15%, pero es la materia orgánica la que da la estabilidad final, de ahí su importancia en todo sistema productivo (Figura 1).

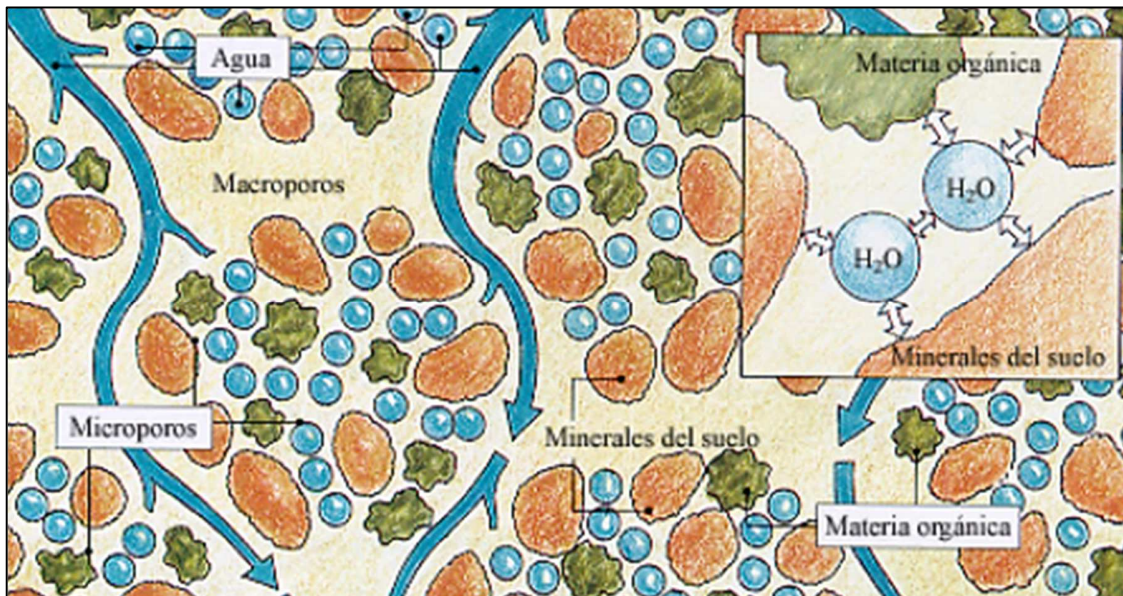


Figura 1. Componentes de la estructura del suelo. Los minerales del suelo y la materia orgánica forman las unidades estructurales o agregados. Los microporos dentro de los agregados y los macroporos entre los agregados llevan aire, agua y facilitan la penetración de las raíces (adaptado de Jacobsen et al., 1992).

La densidad aparente (D_a) es una forma sencilla de evaluar la condición física del suelo, dado que se relaciona con la porosidad (Figura 2) y la resistencia mecánica. Valores altos de densidad indican compactación y, por lo tanto, existe una baja porosidad gruesa (de renovación de oxígeno al sistema radical) y una excesiva resistencia mecánica, ambas condiciones negativas para los frutales, especialmente para paltos y cítricos. Cabe señalar que esta propiedad deber ser interpretada según su clase textural, dado que, como se

observa en la Figura 2, para una misma D_a , por ej. $1,4 \text{ g/cm}^3$, en un suelo de texturas medias a finas la macroporosidad es cercana a 12%; no obstante, para el mismo valor de D_a en un suelo de textura moderadamente gruesa la macroporosidad es cercana al 20%. El cambio de uso de suelo, desde vegetación natural a cultivos agrícolas, favorece la pérdida de materia orgánica (MO), generando un deterioro estructural que se traduce en una densificación, es decir, un aumento de la resistencia mecánica y una pérdida de porosidad, principalmente gruesa, la cual caerá por debajo del 15%, considerado como umbral crítico para frutales (Dexter, 1988). Estas alteraciones tienen consecuencias negativas del tipo productivas (menor rendimiento y mayor incidencia de enfermedades, como *Phytophthora*) y ambientales, como por ejemplo una menor infiltración de agua que generará escurrimiento superficial, con arrastre de partículas y nutrientes del suelo (Jordán et al., 2010).

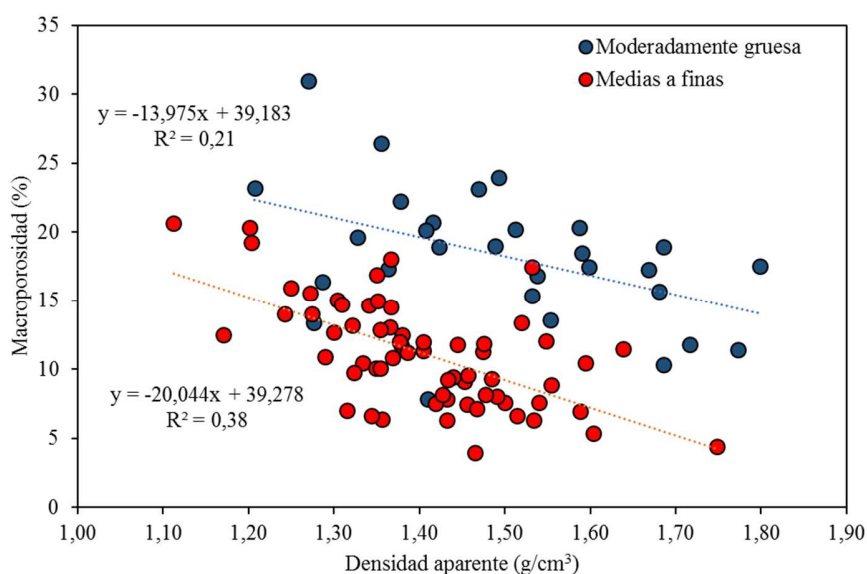


Figura 2. Macroporosidad (%) del suelo en función de la densidad aparente (g/cm^3), para suelos de textura medias a finas (>20% de arcilla y <40% de arena) y moderadamente gruesos (<20% de arcilla y >40% de arena). Ajustes significativos al 95% de confianza.

Condiciones físicas de suelo óptimas para paltos y cítricos

El palto, en sus orígenes, evolucionó en suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles; Cuadro 2), los cuales se consideran como óptimos para su crecimiento, debido a las propiedades físicas que presentan (Aguilera-Montañez y Salazar-García, 1991), las cuales incluyen una baja densidad aparente ($0,4\text{-}0,8 \text{ g cm}^{-3}$) y una alta capacidad de aire (cerca al 46%), dependientes de la mineralogía y los altos contenidos de materia orgánica (4–8%); además se desarrolló idealmente en suelos de pH ácidos, entre 5 a 6 (Ferreyra et al., 2006; Wolstenholme, 2013). Debido a que los paltos evolucionaron en suelos de alta capacidad de

aire y pluviometría, las raíces son poco profundas (30-40 cm), extensamente suberizadas (leñosas), con una baja conductividad hidráulica y una menor frecuencia de pelos radicales en relación a otros frutales, lo que los hace poco eficientes en su capacidad de absorber agua y muy sensibles a la falta de oxígeno (Ferreyra et al., 2006; Schaffer et al., 2013). De hecho, las raíces del palto requieren tasas de difusión de oxígeno superiores a $0,20 \mu \text{ mol O}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ para su crecimiento (Stolzy et al., 1967), lo que se puede asegurar con un nivel de macroporosidad de suelo superior a 17%. Estos valores están muy por encima de las condiciones de aireación del suelo de la mayoría de los huertos de Peumo (Cuadro 1) donde, junto con la dominancia de texturas finas, existe una tendencia a regar en exceso, lo que genera una baja concentración de oxígeno o hipoxia. Períodos cortos, deficientes en oxígeno, normalmente derivan en una reducción en el consumo de agua (Figura 3), inhibición de la expansión de las hojas, reducción en el crecimiento de la raíz y de los brotes, necrosis de la raíz y una moderada a severa abscisión de hojas (Figura 4) (Stolzy et al., 1967; Schaffer et al., 1992). Según Ferreyra et al. (2006), el palto presenta un buen desarrollo radical con niveles de poros con aire cercanos al 30% y presenta síntomas de asfixia radicular con niveles de aire en el suelo inferiores al 17%. Por su parte, para los cítricos, los valores mínimos de macroporosidad para un adecuado desarrollo de las raíces son 12 a 15% (Patt et al., 1966; Nel y Bennie, 1984; Santana et al., 2006) (Figura 5A), en tanto valores bajo 12% repercuten fuertemente en la productividad (Figura 5B).

Cuadro 2. Características generales de los suelos plantados con palto en Chile, en comparación con la zona de origen de este cultivo.

Orden y propiedades	Suelo de la zona de origen del palto	Suelos de la Región de Valparaíso	Suelos de la Región de O'Higgins
Orden de suelo	Andisol	Mollisol e Inceptisol	Mollisol e Inceptisol
Da (g cm^{-3})	0,4 a 0,8	1,3 a 1,5	1,2 a 1,66
Macroporosidad (%)	33 a 58	10 a 20	8 a 19
pH	3,5 a 5,5	7 a 8	6,5 a 8

Da: Densidad aparente; Adaptado de Gil et al. (2009), complementado con información propia.

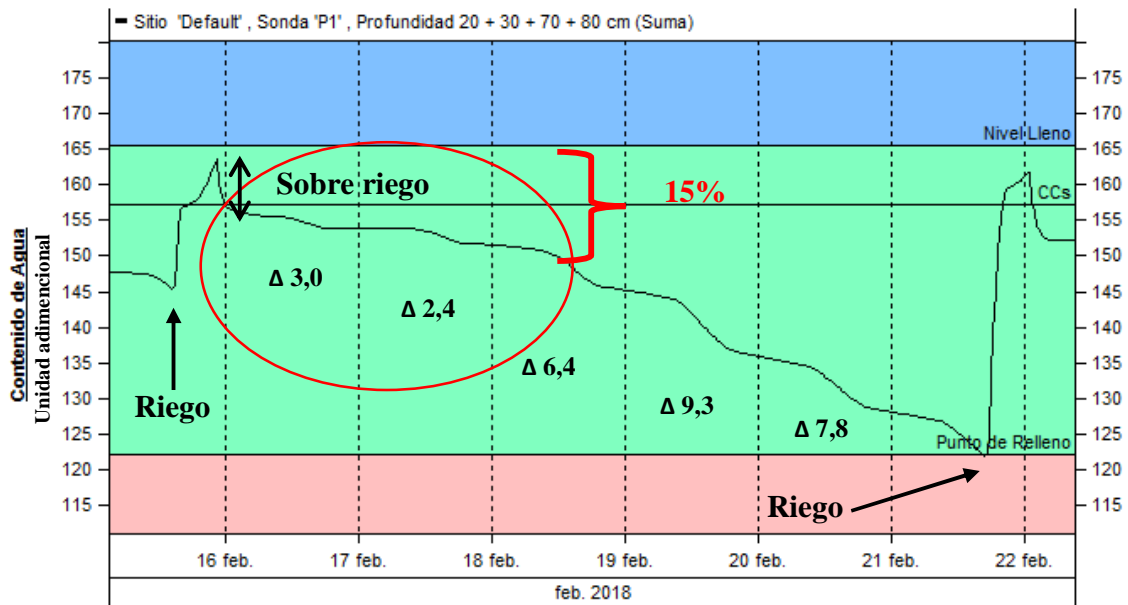


Figura 3. Reducción del consumo de agua por efecto de la falta de aireación o hipoxia (círculo rojo: dos días con menos de un 15% de poros con aire), generado por sobreriego en Naranjo Lane Late/Citrumelo. Peumo, Región de O'Higgins. Todos los días fueron soleados con una evapotranspiración potencial promedio de 5 mm/día. Color azul, verde y rosado, indican niveles de humedad en el suelo saturado, adecuado y con estrés hídrico, respectivamente.



Figura 4. Síntomas de hipoxia radical en paltos plantados en suelos franco arcillosos con menos de 12% de macroporosidad, Peumo. A: Raíces con coloración rojiza. B y C: Pocas raíces finas (< 2mm) y de mala calidad. D, E y F: Epinastia, amarillamiento de hojas, hojas pequeñas y angostas, árboles desfoliados, fruta de bajo calibre.

En relación con la resistencia a la penetración (RP), los paltos son más sensibles a los impedimentos mecánicos, viéndose limitado su crecimiento de raíces con valores de 1,5 MPa (Figura 6), mientras que los cítricos, en general, toleran valores hasta de 2 MPa. En el Cuadro 3 se presentan las condiciones de suelo adecuadas para un buen desarrollo y crecimiento de estos frutales; comparativamente se observan los altos niveles de densidad aparente y baja macroporosidad en los suelos de la zona de estudio (Cuadro 1). No obstante, existen portainjertos que pueden tolerar condiciones físicas de suelo más desfavorables, por lo que los valores del Cuadro 3 son sólo una guía para la interpretación de los análisis de suelo.

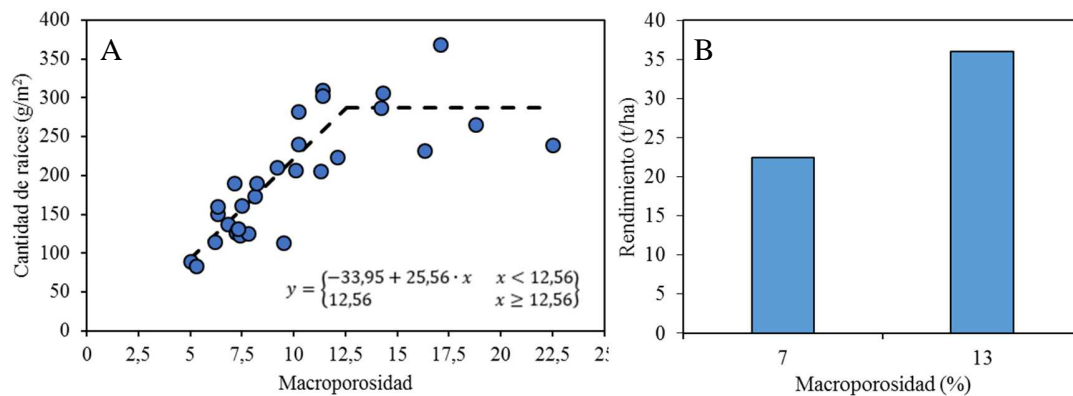


Figura 5. (A) Crecimiento de raíces en función de la macroporosidad y (B) su efecto en la productividad de naranjos (diferentes variedades) plantados sobre naranjo amargo (Adaptado de Patt et al., 1965).

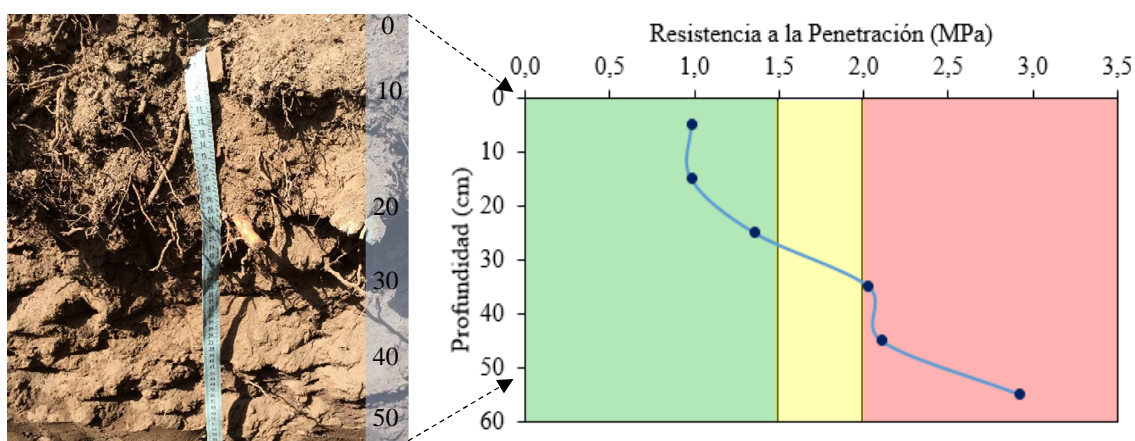


Figura 6. Distribución del crecimiento de raíces de palto en profundidad y resistencia a la penetración en el camellón de suelo. Se observa que la mayor parte de las raíces se encuentra en los primeros 30 cm (zona verde), donde los valores de resistencia a la penetración son menores a 1,5 MPa. En profundidad la compactación aumenta, inhibiendo la exploración de las raíces del palto. Colores verde, amarillo y rojo indican rangos de resistencia a la penetración adecuados, restrictivos y limitantes para el crecimiento de raíces, respectivamente.

Cuadro 3. Condiciones físicas, químicas y biológicas adecuadas para el desarrollo de paltos y cítricos.

Propiedades	Palto	Cítricos
Profundidad (cm)	>50	>65
Textura	Mg a M	Mg a M
Densidad aparente (g cm ⁻³)*	<1,2	<1,4
Macroporosidad (%)	>20	>12
Porosidad total (%)		>35
Resistencia a la penetración (MPa)	<1,5	<2
Contenido de arcilla (%)	<35	<45
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	<1,2	<1,7
Cloruro (meq L ⁻¹)	<5**	<10***
Carbonatos (% cal activa)	<2	<5
RAS (Relación de Adsorción de Sodio)	<6	<8
pH	5,5 a 6,5 (tolerable 7,5)	5,5 a 8,5
Materia orgánica (%)*	>2	>1,2

M= Franco limosa, franca, franco arcillo arenosa, franco arcillosa, franco arcillo limoso, Mg=Franco arenosa, F= Arcillo limosa y Arcillosa. *Suelo de texturas medias a finas. ** Mexícola.*** Citrumelo; Macrophylla <15 y Carrizo citrange < 5. (Nel y Bennie 1984; Abercrombie, 1990; Agustí, 2003; Ferreyra et al., 2006; Santana et al., 2006; Wolstenholme, 2013).

Diagnóstico de las condiciones físicas de suelo en los huertos de paltos y cítricos estudiados

En vista de todos estos antecedentes y considerando que la productividad de estos frutales es baja en la zona de Peumo, comprometiendo la competitividad de los pequeños productores, en el marco del proyecto se realizó un diagnóstico de las condiciones físicas de suelo de 16 productores en el área de estudio, con el objeto de establecer limitantes productivas desde el punto de vista físico. Para ello, se tomaron muestras disturbadas y no disturbadas por horizonte de suelo a distintas profundidades del perfil, evaluando textura, densidad aparente (Da), distribución de tamaño de poros y retención de agua, mientras que en terreno se midió la resistencia a la penetración (RP).

Los suelos correspondieron en su mayoría a mollisoles e inceptisoles, de origen aluvial y aluvio-coluvial, con profundidades que varían entre 75 y 105 cm, aunque en varios casos se construyeron camellones. Los contenidos de arcilla variaron entre un 11 y un 41%, sin una tendencia dominante en profundidad, aunque con una alta variación entre horizontes (datos nos mostrados). La principal limitante correspondió al bajo nivel de poros gruesos o macroporos (>50 µm) (Figura 7), los cuales no superaron el 15% en el 60% de los casos (Cuadro 1), lo que es atribuido a la compactación por tránsito en condiciones de alta humedad, la errónea preparación de los camellones y, posiblemente, al bajo nivel de materia orgánica. Esto se reflejó en elevada resistencia la penetración (RP) y densidad aparente (Da) (Figura 6) (Cuadro 1), aunque esta última se relaciona más con el contenido

de limo que con el de arcilla (datos no mostrados). Los niveles de D_a variaron entre 1,2 y 1,60 Mg m^{-3} , con la mayoría de los predios con valores por cercanos al valor crítico de 1,4 Mg m^{-3} , en texturas medias a finas (Daddow y Warrington, 1983) en los primeros 50 cm de profundidad; además la RP aumentó en profundidad y superó los 2 MPa por debajo de los 35 cm (Figura 6). Finalmente, la altura de agua aprovechable varió entre 69 y 264 mm, por lo que el potencial productivo de los frutales se debiese expresar de manera adecuada, si los manejos se orientan a remediar y prevenir la compactación.

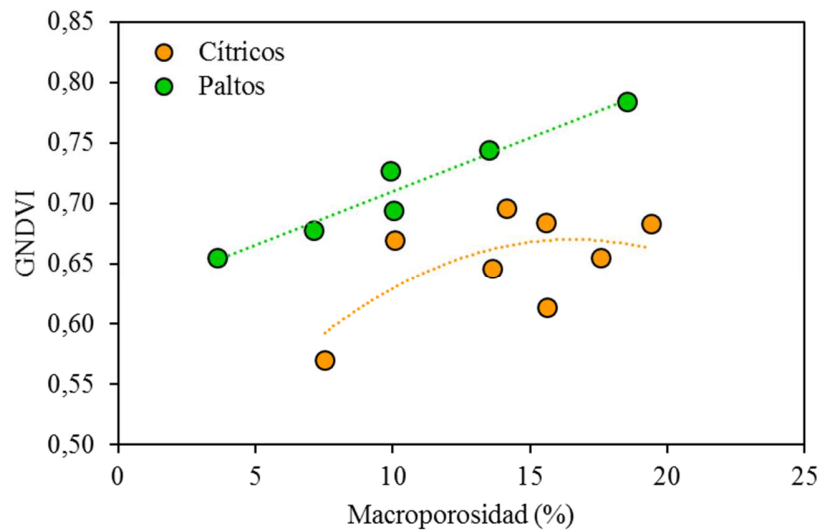


Figura 7. Vigor de huertos de paltos y cítricos, expresado como índice GNDVI (Vegetación de Diferencia Normalizada Verde), en función de la macroporosidad (%) de diferentes suelos productivos de la Región de O'Higgins.

Si bien es conocido que el contenido de arcilla aumenta la capacidad de retención de agua del suelo, se observó una baja relación entre el porcentaje de arcilla y la capacidad de campo del suelo, entendida ésta como la capacidad máxima de retención de agua una vez haya drenado libremente el exceso de agua del suelo (Figura 8). Esto indica una baja estructuración del suelo, debido a la compactación, para los valores bajo la línea de tendencia de la Figura 8 (valores esperados de capacidad de campo estarían cercanos a la línea de tendencia). Por su parte, el punto de marchitez permanente (PMP: contenido de agua del suelo en el cual las plantas se marchitan) tuvo una mejor relación con el contenido de arcilla, por lo que es más dependiente de la textura y no se ve tan afectado por la condición estructural, como es el caso de la capacidad de campo.

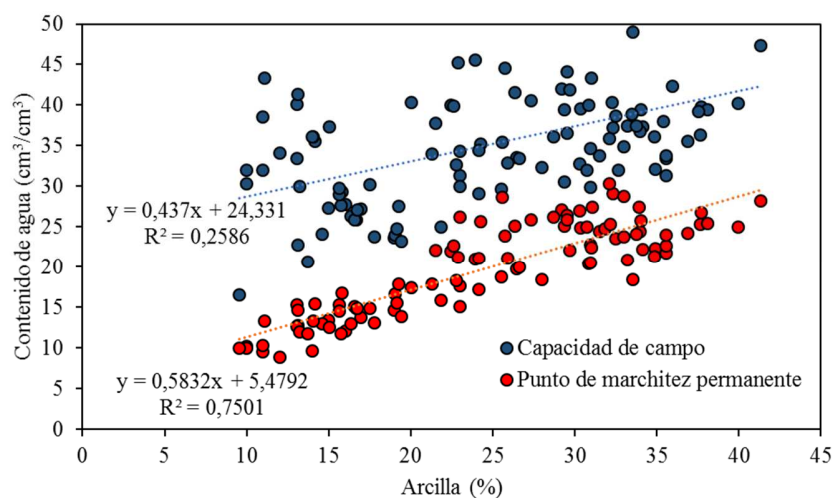


Figura 8. Contenido de agua (cm^3/cm^3) a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) en función del contenido de arcilla (%), en suelos cultivados con paltos y cítricos, Región de O'Higgins.

Por otra parte, la utilización de camellones en las plantaciones es una práctica generalizada en los predios estudiados. Lo que se realiza con el objetivo de aumentar el volumen de suelo explorado; no obstante, el 90% de ellos presentan serios problemas de preparación y, por lo tanto, de estratificación y compactación (Figura 6), observando discontinuidad hidráulica en el perfil (Figura 9), sintomatología que se asocia a un “efecto macetero”. Cabe señalar que esta condición del camellón, asociado a riegos excesivos, es una de las principales causas de los problemas de hipoxia radical en la zona y, por lo tanto, de la baja producción. Esta condición conduce a errores graves en la gestión del riego, debido a que el agua no logra infiltrar, ni distribuirse homogéneamente en el perfil (Figura 9B), lo que genera zonas de saturación en superficie (primeros 30 a 40 cm) con escurrimiento del agua hacia entre las hileras, lejos de la zona radical. En estas condiciones, las raíces suelen concentrarse en las paredes del camellón (Figura 4C), donde existe una mejor relación agua/aire, pero, al estar expuesto a la exposición del sol, se seca rápidamente, generando estrés hídrico, entrando en un círculo vicioso de exceso y falta de agua. Otro síntoma de exceso de agua es la presencia de musgo y de especies como la “chufa” (*Cyperus esculentum*), dado que esta planta se presenta con mayor intensidad en aquellas áreas donde hay un drenaje pobre del suelo.

En este contexto, es estrictamente necesario realizar manejos que promuevan la incorporación de materia orgánica al suelo, ya sea a través de los rastrojos de cosecha, la adición de estiércol animal o el uso de enmiendas líquidas comerciales aplicadas con el sistema de riego (Seguel et al., 2003; Seguel et al., 2015).

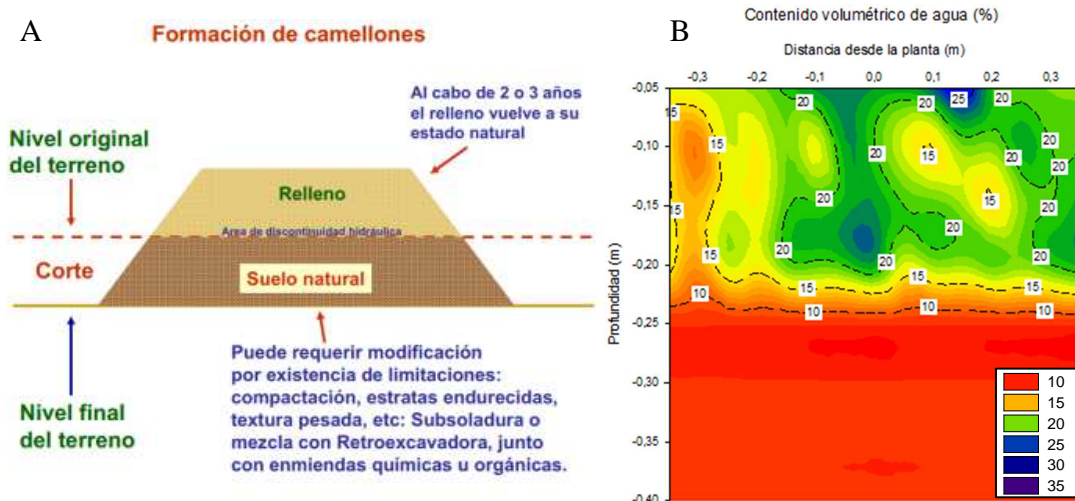


Figura 9. (A) Diagrama que muestra una incorrecta formación del camellón, sin un subsollado previo a la preparación y/o con una inadecuada mezcla del perfil, lo que provoca una discontinuidad para el paso del agua y el aire (Diagrama de Ing. Agr. Óscar Carrasco, Prof. U de Chile). (B) Evaluación del contenido de agua (%) en un camellón plantado con paltos con síntomas de asfixia radical. A los 25 cm de profundidad se aprecia una disminución abrupta del contenido de agua producto de la discontinuidad por la mala construcción del camellón.

Conclusiones y recomendaciones

La calicata es una de las herramientas claves en cualquier proceso productivo, la información que se puede obtener de éstas es muy importante a la hora de la toma de decisiones de manejo, identificar problemas y sus causas, y, sobre todo, la corrección rápida y oportuna de las distintas labores de campo.

En los huertos de paltos y cítricos evaluados, la principal limitante de productividad encontrada correspondía al bajo nivel de poros gruesos o macroporos ($>50 \mu\text{m}$). Detectándose valores muy por debajo de lo necesario para un correcto desarrollo de los cultivos. Las causas de esta condición se deberían, principalmente, a las clases texturales medias a finas y, posiblemente, a un bajo nivel de materia orgánica, lo que, sumado a un manejo deficiente del suelo, generó en el mediano plazo una compactación por tránsito en condiciones de alta humedad y, a su vez, a una preparación inadecuada de camellones.

Se considera necesario incrementar la cantidad y calidad de las raíces de los huertos frutales, con la finalidad de aumentar la productividad de estos. Para ello, se deben mejorar las condiciones físicas de suelo y la gestión del riego, evitando condiciones de hipoxia/anoxia por riegos excesivos, sobre todo, en suelos de texturas finas.

Referencias

- ABERCROMBIE, R. 1990. Root distribution of avocado trees on a sandy loam soil as affected by soil compaction. *Acta Horticulturae*, 275: 505-512.
- AGUILERA-MONTAÑEZ, J. AND S. SALAZAR-GARCÍA. 1991. The avocado industry in Michoacán, Mexico. *South African Avocado Growers' Association Yearbook* 14: 94–97.
- AGUSTÍ, M. 2003. *Citricultura*, 2ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 422 p.
- CIREN, 2002. *Descripciones de suelo, Materiales y Símbolos - Estudio Agrológico de la VI Región*. Pub. CIREN N°114. 595 p.
- DEXTER, A. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 11: 199-238.
- DADDOW, R AND G. WARRINGTON. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. *Watershed Systems Development Group, USDA Forest Service*. 17p
- FERREYRA, R.; G. SELLES; P. MALDONADO; J. CELEDÓN; C. BARRERA Y P. GIL. 2006. La asfixia radicular y el manejo del riego en paltos. Seminario Internacional manejo del riego y suelo en el cultivo del palto. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. La Cruz, Chile, 27- 28 de septiembre.
- GIL, P.; G. SELLES; R. FERREYRA Y C. BARRERA. 2009. *Manual de riego para paltos y cítricos*. 146p. Centro Regional de Investigación La Cruz, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Cruz, Chile.
- HILLEL, D. 2003. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Academic Press. 494p.
- JACOBSEN, C., KEITH, K AND KAMEL. 1992. *Understanding soil ecosystem relationships*. Dept. of Primary Industries, Queensland, Australia. 48p.
- JORDÁN, A.; M. ZAVALA AND J. GIL. 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* 81: 77-85.
- LETEY, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- NEL, D. AND A. BENNIE. 1984. Soil factors affecting tree growth and root development in a citrus orchard. *South African Journal of Plant and Soil*, (2): 39-47.
- PATT, L.; D. CARMELI AND I. ZAFRIR. 1965. Influence of soil physical conditions on root development and on productivity of citrus trees. *Soil Science*, 102: 82 – 84.

- SANTANA, M.; L. DA S. SOUZA; L. SOUZA AND L. FONTES. 2006. Soil physical attributes and citrus root system distribution as indicators of cohesive layers in soils of coastal table lands in the state of Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30: 1-12.
- SANTIBÁÑEZ, F.; P. SANTIBÁÑEZ; C. CAROCA. Y P. GONZÁLEZ. 2017. Atlas agroclimático de Chile: Estado actual y tendencias del clima. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. 205p.
- SCHAFFER, B.; P. ANDERSEN AND R. PLOETZ. 1992. Responses of fruit trees to flooding. *Horticultural Reviews*, 13: 257-313.
- SCHAFFER, B.; P. GIL; M. MICKELBART AND A. WHILEY. 2013. Ecophysiology. In: Schaffer B., Wolstenholme B. and Whiley A. (ed.): *The avocado: botany, production and uses*, 2nd ed. Pp. 168-199. CABI Publishing, Wallingford, England.
- STOLZY, L.; G. ZENTMYER; L. KLOTZ AND C. LABANAUSKAS. 1967. Oxygen diffusion, water and *Phytophthora cinnamomi* in root decay and nutrition of avocado. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 90: 67-76.
- SEGUEL, O.; G. ARANCIBIA Y R. CALLEJAS. 2015. El manejo físico del suelo para la adecuada producción de frutillas. En: Callejas, R y Díaz, M. (eds). *Cultivo de la frutilla con identidad regional: Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Provincia de Cardenal Caro*. Serie Ciencias Agronómicas N° 26, 89p.
- SEGUEL, O.; V. GARCÍA DE CORTÁZAR Y M. CASANOVA. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* 63(3): 287-297.
- WOLSTENHOLME, B. 2013. Ecology: climate and soils. In: Schaffer B., Wolstenholme B. and Whiley A. (ed.): *The avocado: botany, production and uses*, 2nd ed. Pp. 168-199. CABI Publishing, Wallingford, England.

CAPÍTULO 2. USO DE ENMIENDAS PARA MEJORAR LAS CONDICIONES FÍSICAS DE SUELO

Óscar Seguel S., Víctor Beyá-Marshall y Brian Baeza S.

Enmiendas orgánicas y propiedades físicas de suelo

La agricultura moderna privilegia el laboreo continuo y el uso de fertilizantes inorgánicos, lo que ha ido en desmedro de la disponibilidad de materia orgánica (MO) en los suelos, afectando sus propiedades físicas, como la porosidad, la capacidad de retención de agua y la estabilidad de agregados, entre otras (Sierra y Rojas, 2002), lo que determina procesos de degradación de suelos más complejos, como la erosión y la compactación. Según Pan et al. (2009), los sistemas agrícolas modernos no podrán ser sustentables si no consideran dentro de sus manejos habituales el reciclaje de la MO generada en el campo y/o la aplicación de enmiendas externas, lo cual se compensa económicamente al disminuir los costos en fertilizantes y otros insumos (Karlen et al., 2013). Al respecto, existe una gran cantidad de alternativas de enmiendas orgánicas, las que se diferencian en su composición, estado, velocidad de acción, etc., de manera que cada una de ellas presenta ventajas y desventajas en términos comparativos (Cuadro 1).

El estiércol es una enmienda ampliamente utilizada en la agricultura (Rojas et al., 2010), siendo también usado como materia prima para la elaboración de compost. La aplicación del estiércol como enmienda orgánica contribuye a cambios positivos en las propiedades físicas del suelo, tales como disminución de la densidad aparente y una mayor estabilidad de los agregados (Seguel et al., 2003) y, si bien es de rápida acción, su uso excesivo puede generar contaminación de aguas con nitratos (Céspedes, 2005) y problemas en ciertos cultivos sensibles a la salinidad (Seguel et al., 2013), como el palto. Como alternativa, **el compost** es un material estabilizado, de mayor persistencia y sin problemas de salinidad (Abiven et al., 2009), pero, al requerir un proceso extra para su elaboración, por lo general posee un costo mayor que el estiércol. Ambos tipos de enmienda, al ser sólidas y utilizarse en altas dosis, presentan dificultades en su incorporación al suelo, especialmente en sistema frutales, donde puede haber un daño de raíces y donde la aplicación en cobertera no siempre logra buenos efectos (Baginsky et al., 2010).

Los ácidos húmicos son subproductos de la descomposición de la materia orgánica, y corresponden a grupos orgánicos de alta complejidad en su estructura molecular, muy reactivos con las partículas minerales del suelo (Imbufe et al., 2005). Hoy en día se extraen concentrados de ácidos húmicos, los que son comercializados como enmiendas orgánicas, que se aplican diluidas en agua, lo que facilita su incorporación al suelo mediante el riego. La utilización de estos productos genera mejoras en las propiedades físicas de los suelos, disminuyendo la densidad aparente y aumentando la porosidad, la estabilidad de agregados y la velocidad de infiltración (Seguel et al., 2012); por otra parte, poseen efectos nutricionales y son promotores de la actividad microbiológica benéfica en el suelo (Shehata

et al., 2011). Sin embargo, dadas las bajas dosis de aplicación, sus efectos perduran un corto plazo, entre tres y seis meses, por lo que son necesarias aplicaciones sucesivas en cada temporada (Seguel y Vargas, 2013).

Otra alternativa para mantener la estructura del suelo la constituyen los **cultivos de cobertura** (Baginsky et al., 2010), ya que aportan residuos orgánicos que aumentan la retención de agua y los macroporos del suelo (Warrick, 2002; Trükmann et al., 2006). En Chile, el uso de cultivos de cobertura en parrones en la Región de Atacama permitió disminuir la resistencia a la penetración y aumentar la estabilidad de agregados, reduciendo la compactación (Baginsky et al., 2010; Seguel et al., 2011). Dentro de las especies utilizadas como cubiertas vegetales anuales, las más utilizadas son aquellas pertenecientes a las familias de las leguminosas, gramíneas y brasicáceas, donde las leguminosas (chícharo, haba, vicia, lupino, arveja, trébol), además, establecen una relación simbiótica con la bacteria *Rhizobium* sp., la cual permite fijar nitrógeno atmosférico, junto con disminuir la resistencia mecánica del suelo con su sistema radical pivotante, que incluso llega a soltar horizontes compactados, con sus raíces que alcanzan el metro de profundidad (Baginsky et al., 2010).

Cuadro 1. Principales efectos físicos en el suelo de las enmiendas orgánicas, y su intensidad (+++ efecto muy marcado).

Tipo enmienda	Suelo arcilloso	Suelo franco	Suelo arenoso
Estiércol	Aireación de suelo +++	Aireación de suelo ++	Retención de agua +++
Compost	Aireación de suelo ++	Aireación de suelo ++	Retención de agua +++
Residuos frescos	Prevención compactación +++	Traficabilidad +++	Retención de agua +
Ácidos húmicos	Estructuración con aumento de poros gruesos y retención de agua +++	Estructuración (resultado menos predecible) ++	Retención de agua + Estructuración +++
Cultivos de cobertura	Estructuración con aumento de poros gruesos y retención de agua ++	Estructuración (resultado menos predecible) +	Retención de agua ++ Estructuración ++

Ensayos de enmiendas de suelo en la zona de Peumo

Tal como se señaló en el Capítulo 1, gran parte de los problemas de los paltos y cítricos de la zona de Peumo se debe al mal manejo del riego y a la deteriorada condición física del suelo (compactación, falta de estructuración, baja macroporosidad y inadecuada preparación de camellones), conduciendo a frecuentes situaciones de hipoxia (bajo oxígeno) y, en casos más graves, anoxia radical (ausencia de oxígeno). En este contexto, se establecieron ensayos de uso de enmiendas orgánicas en suelos representativos de la zona con paltos y limones con bajo vigor y con claros síntomas de asfixia radical (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características de los huertos bajo ensayo.

Especie	Variedad/Portainjerto	Sistema de conducción	Marco de plantación (m2)	Serie de suelo
Limonero	Eureka/Citrumelo	Copa	6 x 3	La Rosa
Palto	Champion/Mexícola	Copa	5 x 3	La Rosa

En cada huerto se realizó una caracterización del suelo previo a la aplicación de las enmiendas (tres calicatas por especie). Posteriormente, durante el mes de diciembre de cada temporada de estudio, se evaluó el impacto de las diferentes enmiendas en las propiedades del suelo y la productividad de los árboles. En la caracterización del suelo se observó que ambos huertos presentaron niveles altos de D_a , cercanos a $1,4 \text{ g/cm}^3$, y bajos niveles de macroporosidad (Cuadro 3), en particular el sector con paltos, el cual presentó una compactación superficial (0-20 cm); en tanto los limoneros presentaron una compactación en profundidad. A su vez, en ambos huertos se observó una preparación del camellón inapropiada, generándose un efecto “macetero”, como se describió en el capítulo anterior (Capítulo 1, Figura 7; Figura 11), siendo una de las principales causas de la asfixia radicular observada.

Cuadro 3. Caracterización de las propiedades física de los huertos bajo ensayo.

Especie	Prof. (cm)	D_a (Mg m^{-3})	CC (% v/v)	PMP (% v/v)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clase textural	Macro porosidad (%)
Palto	0-20	1,42	36,6	20,4	27,6	37,3	35,1	FA	9,9
	20-50	1,35	34,3	15,4	28,0	37,5	34,5	FA	14,8
Limonero	0-10	1,31	29,1	19,3	21,4	34,0	44,6	F	16,8
	10-30	1,35	29,4	17,6	21,6	30,2	48,1	F	14,4
	30-50	1,49	29,0	19,0	23,6	34,2	42,2	F	14,3

D_a : Densidad aparente; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; FA: Franco arcilloso; F: Franco. Macroporosidad ($>50 \mu\text{m}$).

De esta manera, el objetivo de ambos ensayos fue disminuir la compactación y resistencia mecánica, disminuyendo el efecto “macetero”, y aumentar la cantidad de poros gruesos, que permitiesen una mejor aireación de las raíces y mayor infiltración de agua. Cabe señalar que, dada la baja condición de vigor de los huertos, la relación hoja/madera era baja, encontrándose gran parte de las ramas muertas y/o con daños por golpe de sol, por lo que se realizó una poda de renovación previo al establecimiento de los ensayos, de manera de equilibrar la copa con las raíces (Figura 1A). En el caso del huerto de limoneros, se realizó una poda a todo el huerto, mientras que, en paltos, la poda fue a tocón (eliminación de toda la copa) y en hileras por medio (Figura 1B). Así, la primera temporada (2017-2018) se evaluó el efecto de las enmiendas en paltos podados y no podados, mientras que en la

segunda temporada (2018-2019), a la hilera no podada inicialmente se le realizó la misma poda de renovación.

En los tratamientos se utilizaron distintas enmiendas orgánicas: compost (Biofert®); ácido húmico (Pow Humus®) y un activador biológico (Bioaminol®). Además, se estableció haba (*Vicia faba*) como cultivo de cobertura (cuadros 4 y 5).

El Biofert ® es un producto sólido, tamizado fino y estabilizado, con un alto contenido de materia orgánica altamente humificada (23% de M.O), mientras que Pow-Humus WSG-85® es un producto altamente soluble, con un contenido de ácido húmico de 85%, en base al mineral leonardita. Por su parte, Bioamino-L® corresponde a una enmienda con alto contenido de materia orgánica no húmica, ácidos fúlvicos, polipéptidos de alta calidad biológica, macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio) y micronutrientes (zinc, manganeso, hierro) de fácil asimilación.

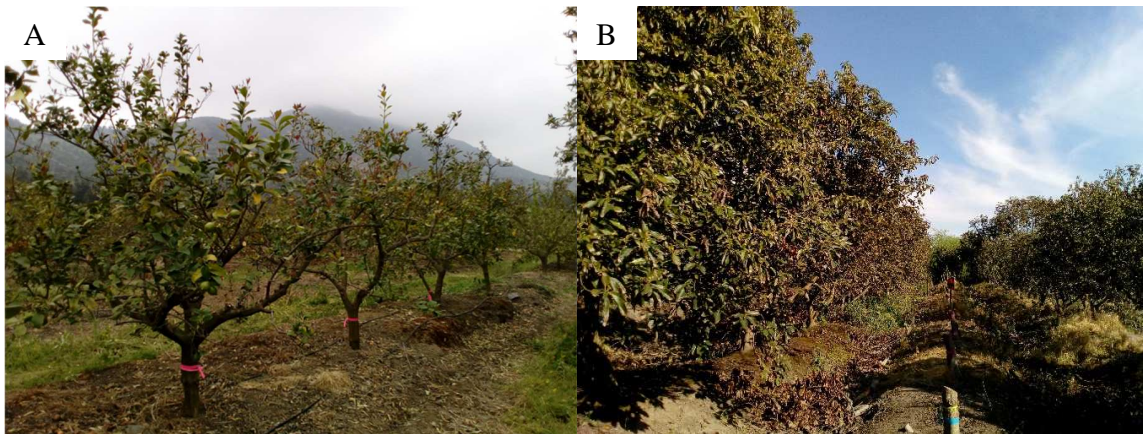


Figura 1. (A) Poda de renovación en limones 'Eureka' y en (B) paltos 'Champion'.

La aplicación del compost se realizó sobre el camellón mezclando superficialmente la enmienda con el suelo (Figura 2A). En el caso de las enmiendas líquidas, Ac. húmico y Bioaminol, en la primera aplicación se asperjó con una bomba de espalda manual (Figura 2B), para luego, en las siguientes aplicaciones, aplicar la dosis correspondiente bajo el gotero. El criterio de la primera aplicación fue para que la lluvia ayudara a incorporar la enmienda, mientras que en las siguientes fue el riego el que favoreció la incorporación en el perfil. La siembra de haba (2.222 plantas/ha) se realizó en septiembre y julio, en la primera y segunda temporada, respectivamente (Figura 2C y 2D), siendo segada en noviembre de cada año, dejando el rastrojo en la superficie del camellón.

Cuadro 4. Programa de aplicación de enmiendas orgánicas evaluadas en limonero.

Tratamiento	Programa de aplicación 2017-2018					
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
Testigo						
Ac. húmico	10 kg/ha		20 (kg/ha)			
Bioaminol-L		40 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)
Compost		5,5 (t/ha)				
Compost+Ac. húmico		5,5 (t/ha)	15 (kg/ha)*			
Programa de aplicación 2018-2019						
Testigo						
Ac. húmico	10 kg/ha		20 (kg/ha)			
Bioaminol-L		40 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)
Compost	16 (t/ha)					
Compost+Ac. húmico	8 (t/ha)		15 (kg/ha)*			

* dosis de Ac. húmico

Cuadro 5. Programa de aplicación de enmiendas orgánicas y cultivo de cobertura evaluado en palto.

Tratamiento	Programa de aplicación 2017-2018					
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
Testigo						
Ac. húmico	10 kg/ha		20 (kg/ha)			
Bioaminol-L		40 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)
Compost		15 (t/ha)				
Compost+Ac. húmico		7,5 (t/ha)	15 (kg/ha)*			
Cultivo de cobertura (haba) siembra		desarrollo	siega			
Programa de aplicación 2018-2019						
Testigo						
Ac. húmico	10 kg/ha		20 (kg/ha)			
Bioaminol-L		40 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)	20 (L/ha)
Compost	20 (t/ha)					
Compost+Ac. húmico	10 (t/ha)		15 (kg/ha)*			
Cultivo de cobertera (haba) desarrollo			siega			

* dosis de Ac. húmico

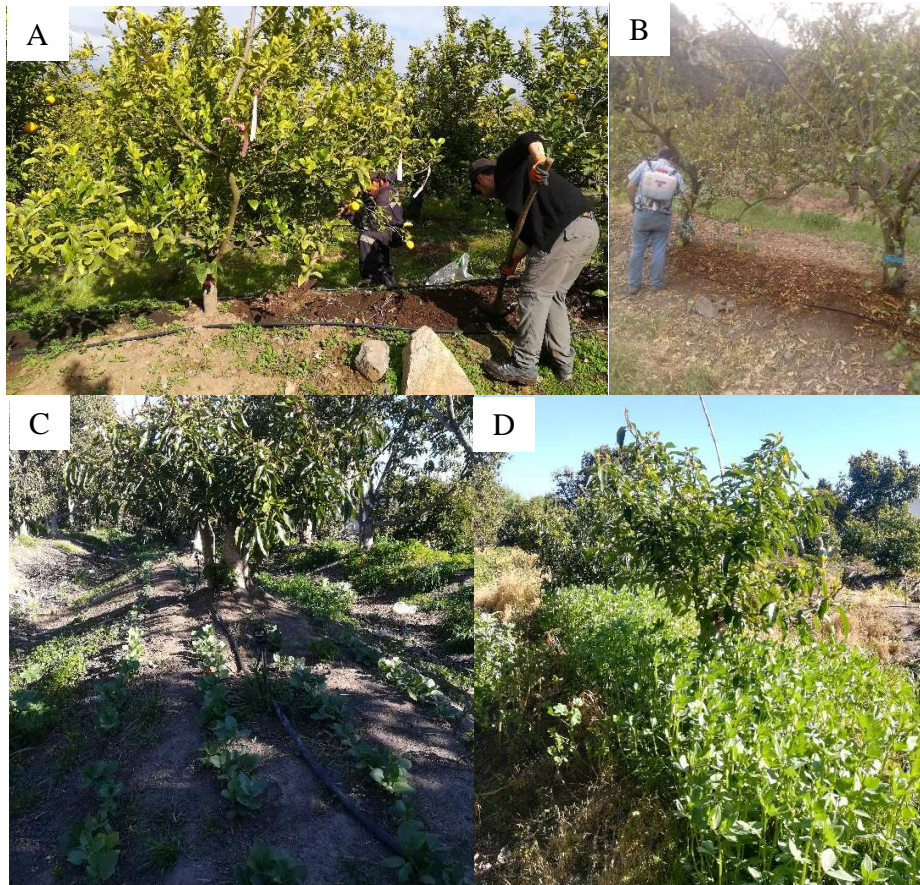


Figura 2. Aplicación de enmiendas sólidas y líquidas sobre la hilera de plantación y manejo de la cubierta vegetal de haba (*Vicia faba*).

Resultados en limoneros ‘Eureka’

La aplicación de enmiendas generó respuestas diferentes en ambas temporadas; no obstante, en general, lograron una disminución de la densidad aparente, siendo la combinación de compost con ácido húmico la que, en la segunda temporada, generó una disminución significativa en todo el perfil (Figura 3B), lo que se tradujo en una mayor macroporosidad, manteniendo un buen nivel de aireación (mayor a 15%) (Figura 3D). En este sentido, la adición de ácido húmico al compost habría favorecido la mineralización del residuo orgánico, movilizándolo los ácidos orgánicos dentro del suelo, permitiendo mejorar la estructuración en profundidad, favoreciendo así el flujo rápido del agua dentro del suelo y la renovación del aire hacia el sistema radical.

Por su parte, la aplicación de Bioaminol mostró un efecto descompactador en superficie (primeros 10 cm), pero no en profundidad (Figura 3A). La primera temporada mostró un aumento de la macroporosidad en todo el perfil (Figura 3C); no obstante, en la segunda temporada no se observó tal respuesta, aunque generó un aumento de los poros de agua útil o aprovechable (PAU), los cuales se asocian a la capacidad del suelo de retener agua

disponible para el cultivo (Figura 3F). Respuesta inversa se observó en los tratamientos de ácido húmico, compost y compost + ácido húmico, donde la primera temporada aumentaron los poros de almacenamiento de agua (PAU, Figura 3E), pero en la segunda temporada aumentó la macroporosidad y no los PAU. En este sentido, es probable que el Bioaminol, al ser una enmienda orgánica de fácil descomposición, en la primera temporada haya estimulado la actividad y biomasa de microorganismos (hongos y bacterias), los que producen sustancias (azúcares complejos y ácidos orgánicos) que ayudan a adherir partículas y formar agregados que permiten una mayor macroporosidad. En la segunda temporada, su efecto fue en los PAU, lo que podría atribuirse a que el aumento de la actividad microbiana generó un aumento de MO que, a lo largo de 2 temporadas, logró ser MO más estable, mejorando la retención de agua. Por su parte, la adición de compost, ácido húmico y la combinación de ambos, tuvo una rápida respuesta en los PAU la primera temporada, mientras que al año siguiente no se observó un efecto claro.

En terreno, se observó, visualmente, mayor crecimiento de raíces en todos los tratamientos con enmiendas (Figura 4) y mayor actividad de la mesofauna (como lombrices) en los tratamientos donde se aplicó compost, indicando una mejora sustantiva en la calidad biológica del suelo (Socarrás, 2013). En este sentido, esta enmienda orgánica es un sustrato para la mesofauna del suelo, promoviendo abundante actividad de lombrices que ayudan a mezclar el material en profundidad, mejorando el nivel de porosidad y MO en el perfil.

En síntesis, tras dos años de aplicación de diferentes enmiendas orgánicas, se generaron efectos positivos en la condición física del suelo, lo que permitió un leve aumento de la producción de limones (Figura 5), aunque sin diferencias significativas con el testigo. Esto avala la necesidad de mantener estos manejos en el tiempo, de manera tal de generar mayores resultados a largo plazo.

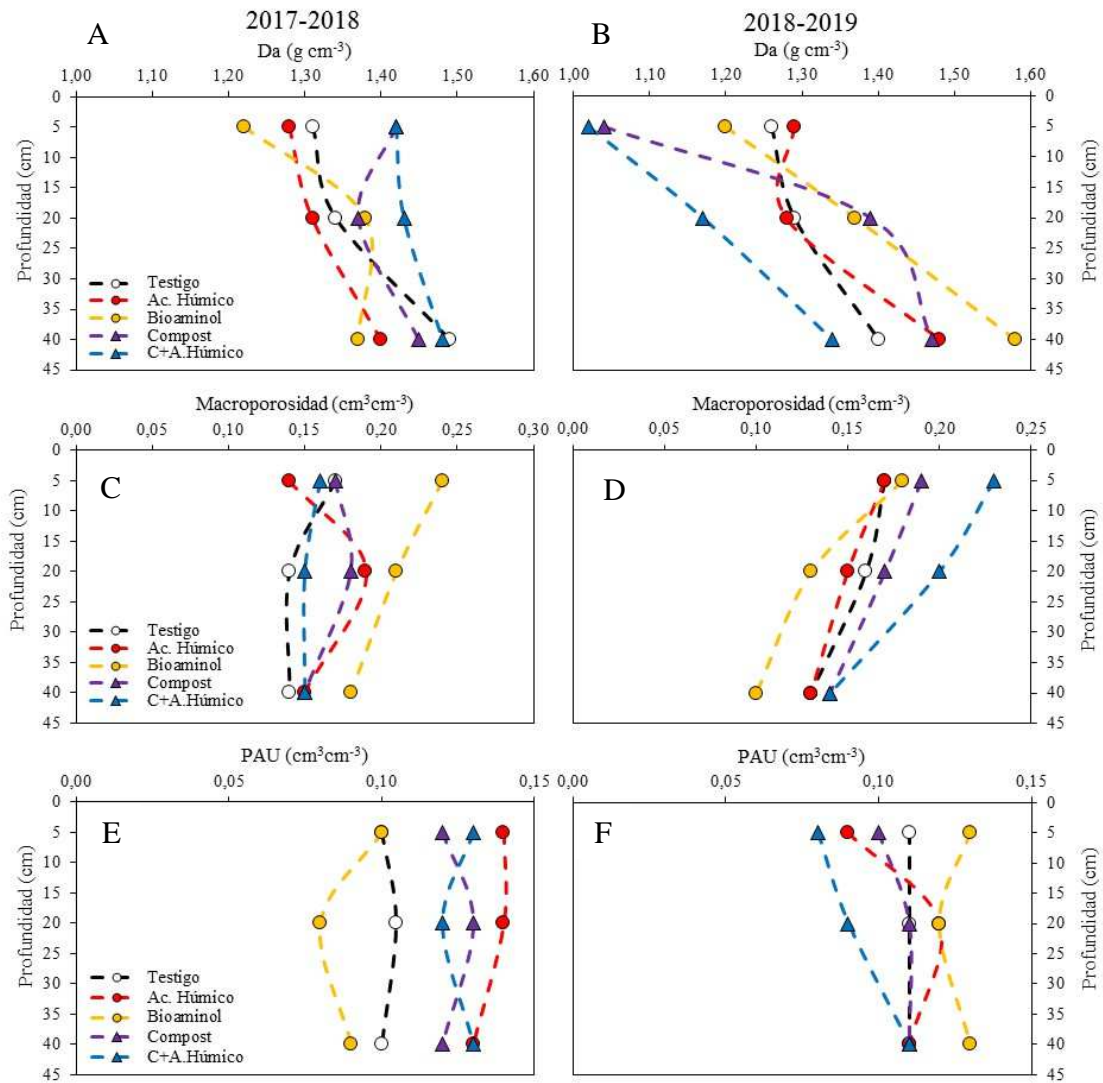


Figura 3. (A y B) Densidad aparente (Da), (C y D) macroporosidad y (E y F) PAU, poros de agua útil, en un suelo plantado con limoneros con diferentes tratamientos de enmiendas orgánicas durante dos temporadas. Primera temporada (izquierda) y segunda temporada (derecha).



Figura 4. Crecimiento de raíces y actividad de lombrices durante la segunda temporada en un suelo tratado con enmiendas orgánicas. (A): Compost; (B): Bioaminol; (C). Poros y coprolitos (heces) de lombrices, en círculos rojos, en tratamiento con compost; (D); Compost + Ac. Húmico.

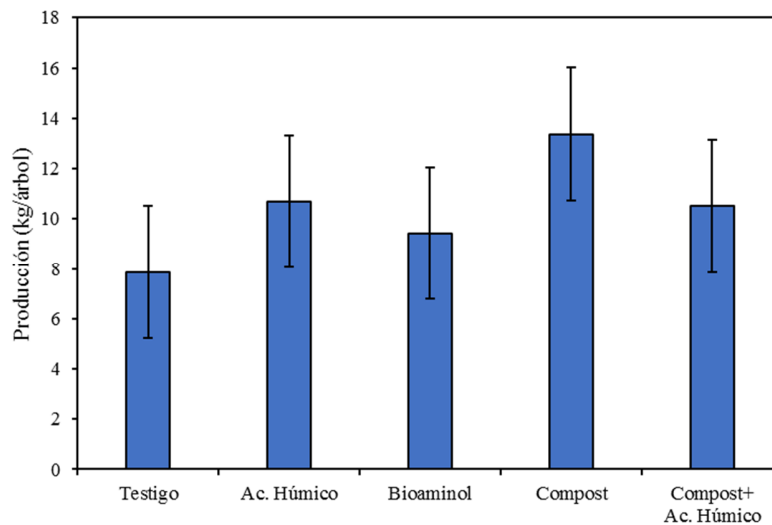


Figura 5. Producción de limones en árboles ‘Eureka’/‘Citrumelo’, al cabo de dos temporadas, bajo diferentes tratamientos de enmiendas orgánicas al suelo.

Resultados en paltos ‘Champion’

Los tratamientos con compost, al ser aplicados en superficie, promovieron una baja densidad aparente en la primera temporada (Figura 6A), pero el efecto desapareció en el tiempo. Al cabo de dos temporadas, los tratamientos orgánicos disminuyeron la densidad aparente en profundidad (30-50 cm), desde $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ en el control, a $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ (promedio de los tratamientos orgánicos) (Figura 6B), con una mayor cantidad de poros gruesos de aireación y mayor contenido de agua aprovechable en todo el perfil en el tratamiento con Bioaminol (Figura 6F); por su parte, la resistencia mecánica disminuyó en profundidad en los tratamientos de ácido húmico y cultivo de cobertura (Figura 7A), lo que permitió una mejor distribución del bulbo de mojado en profundidad (Figura 7B).

A nivel aéreo, en la segunda temporada, los tratamientos que habían sido podados en septiembre de 2018 no mostraron grandes diferencias en crecimiento vegetativo (Figura 8); no obstante, dos años después de la poda (septiembre 2017), se observó un mayor desarrollo vegetativo en los tratamientos con compost, Ac. húmico y Bioaminol, mientras que el tratamiento con cobertura presentó una menor área foliar, lo que se atribuye a una posible competencia por agua y nutrientes. En este sentido, si bien el cultivo de cobertura fue uno de los que generó una mejora sustancial de la resistencia a la penetración en profundidad (Figura 7A), con una mejor distribución del agua de riego (Figura 7B), es importante considerar el aumento de demanda de nutrientes y agua por parte del cultivo de cobertura, por lo que en estos casos es necesario aumentar la fertilización y el aporte de agua para evitar la competencia entre ambos cultivos.

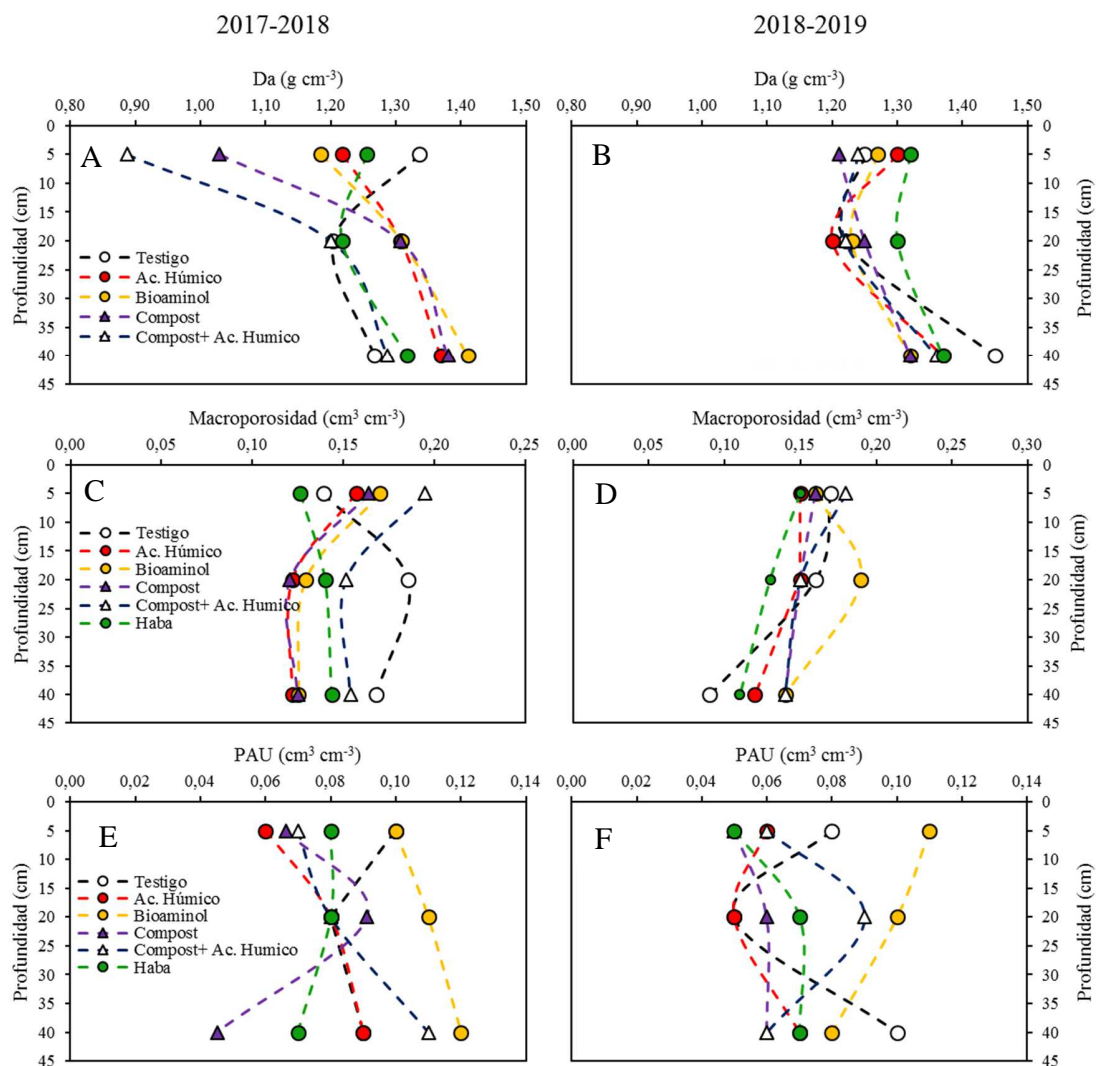


Figura 6. (A y B) Densidad aparente (D_a), (C y D) macroporosidad y (E y F) PAU, poros de agua útil, en un suelo plantado con paltos con diferentes tratamientos de enmiendas orgánicas. Primera temporada en la columna izquierda, segunda temporada columna derecha.

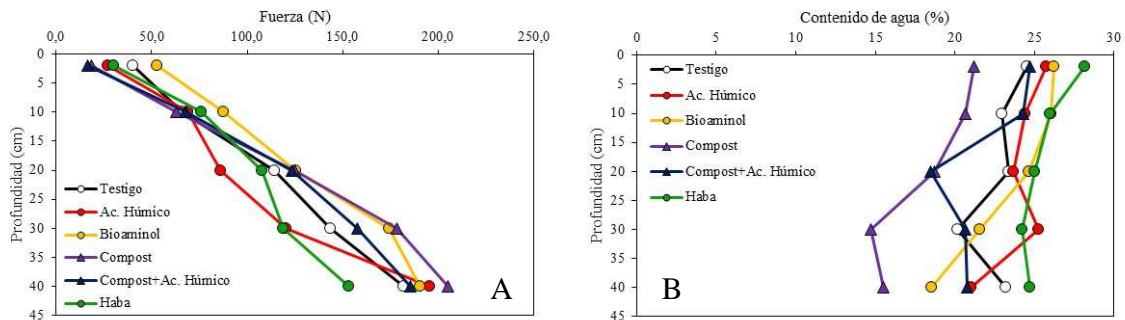


Figura 7. Resistencia a la penetración (A) y distribución del contenido de agua en profundidad (B), en un suelo de clase textural media a fina tratado con diferentes tratamientos de enmiendas orgánicas. Evaluaciones realizadas en diciembre posterior a un riego.

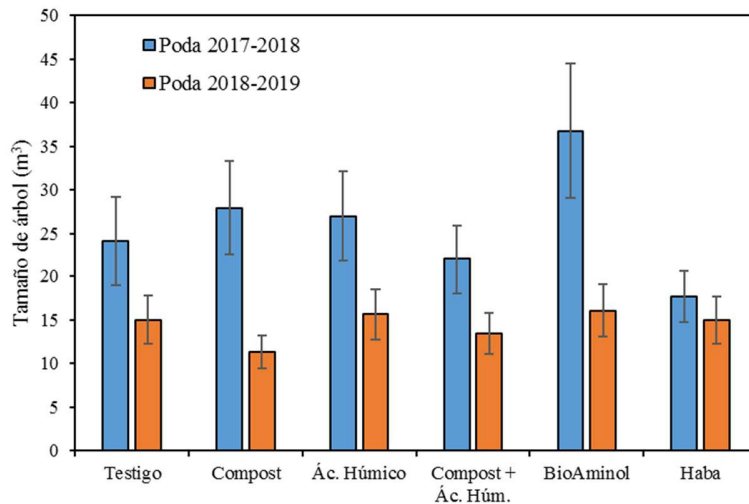


Figura 8. Volumen de la copa de paltos con poda de rejuvenecimiento, creciendo en suelo con diferentes tratamientos de enmiendas orgánicas y cultivo de cobertura. Poda de renovación realizada en septiembre de 2017 y 2018. Evaluación realizada en abril de 2019.

El efecto del Bioaminol, con mayor retención de agua aprovechable para el cultivo, se complementa con el aporte de micronutrientes y compuestos de fácil descomposición, que activan la actividad microbiana del suelo, generando una mayor actividad de raíces y entrega de nutrientes. En este sentido, el concepto de manejar un “suelo vivo” toma una mayor relevancia, dado que no sólo se requiere aportar los nutrientes que está demandando la planta, sino que las condiciones físicas (estructura), las cuales, como se mencionó anteriormente, son fundamentales para un correcto desarrollo de las plantas. Sin embargo, es la biología del suelo (macro y microorganismos) y la materia orgánica la que, en gran

parte, permite que el sistema suelo funcione de manera óptima, al mantener los agregados, evitar la compactación, mantener una buena relación agua/aire, liberar nutrientes y evitar el ingreso de patógenos, entre muchas otras funciones.

Conclusiones y recomendaciones

Antes de realizar cualquier manejo en un huerto de paltos o cítricos decaídos, se debe buscar las causas del decaimiento. Debido al tipo de suelos existentes en la mayor parte donde se cultivan estos frutales en la zona (texturas medias a finas) y al abuso que se ha dado al riego y al tránsito en condiciones de suelo húmedo, el decaimiento está asociado, generalmente, al exceso de agua y a la falta de oxigenación de las raíces, problemas acrecentados por una deteriorada condición física del suelo, lo que genera asfixia radical y mayor incidencia de *phytophthora*.

Si bien la poda de rejuvenecimiento fue el factor que generó la mayor respuesta vegetativa, al equilibrar la relación de biomasa aérea/subterránea, la mejora de las propiedades físicas del suelo, mediante la aplicación de enmiendas y/o cultivo de cobertura con alta capacidad de enraizamiento, garantizaría que, en el mediano a largo plazo, la recuperación productiva del huerto sea efectiva y sostenible en el tiempo.

La implementación de enmiendas, cuanto los costos lo permitan, debe ser lo más frecuentemente posible en los huertos; su aplicación debe ser considerada dentro de los ítems fijos dentro de la estructura de costos y ser considerada una inversión más que como un gasto. Una condición adecuada del sistema suelo permitiría tener una producción resiliente y sostenible en el tiempo, lo que se lograría con la aplicación constante de enmiendas orgánicas al suelo.

Referencias

- ABIVEN, S., C. MENASSERI AND S. CHENU. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1): 1-12.
- BAGINSKY C. O. SEGUEL Y A. CONTRERAS. 2010. Impacto en la utilización de cultivos y enmiendas orgánicas sobre la funcionalidad del suelo. Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N° 17. 122 p.
- CÉSPEDES, C. 2005. Agricultura orgánica, principios y prácticas de producción. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán, Chile: INIA. 131p.
- ELLIES, A.; R. GREZ Y C. RAMÍREZ. 1995. Cambios en las propiedades humectantes de suelos sometidos a diferentes manejos. *Turrialba*, 45(1 -2): 42-48.

- IMBUFE, A.; A. PATTI; D. BURROW; A. SURAPANENIC; W. JACKSON AND A. MILNER. 2005. Effects of potassium humate on aggregate stability of two soils from Victoria, Australia. *Geoderma*, (125): 321–330.
- KARLEN, D.; J. KOVAR; C. CAMBARDELLA AND T. COLVIN. 2013. Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. *Soil & Tillage Research*, 130: 24–41.
- PAN, G.; P. SMITH AND W. PAN. 2009. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129: 344-348.
- ROJAS, L.; P. LARRAÍN; F. RIVEROS; C. SIERRA; A. CHIANG; L. MARTÍNEZ Y E. ALCAÍNO. 2010. Producción integrada de hortalizas en la Región de Coquimbo, Centro Regional de Investigaciones Intihuasi. Boletín N°211. La Serena, Chile: INIA. 144p.
- SEGUEL, O.; C. BAGINSKY; A. CONTRERAS; J. COVARRUBIAS; L. GONZÁLEZ AND L. POBLETE. 2013. Physical properties of a fine textured haplocambid after three years of organic matter amendments management. *Journal of Soils Science and Plant Nutrition*, 13 (3): 690-705.
- SEGUEL, O., BAGINSKY C., CONTRERAS, A., COVARRUBIAS, J., GONZÁLEZ, L. AND SANDOVAL, M. 2011. Changes in physical properties of a typic haplocambid by annual crop culture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11 (1): 1-15.
- SEGUEL, O. Y D. VARGAS. 2013. Efecto del uso de ácido húmico sobre las propiedades hidráulicas e hidrofobia del suelo. *Red Agrícola*, 54: 28-29.
- SEGUEL, O.; E. MARÍN Y A. MICHAUD. 2012. Mejoramiento de propiedades físicas del suelo mediante ácido húmico y rastrojo de trigo. *Red Agrícola*, 46: 12-13.
- SEGUEL, O.; E. FARIÁS; W. LUZIO; M. CASANOVA; I. PINO; A. PARADA; X. VIDELA AND A. NARIO. 2015. Physical properties of soil after change of use from native forest to vineyard. *Agro Sur*, 43(2): 23-39.
- SEGUEL, O. V. GARCÍA DE CORTÁZAR Y M. CASANOVA. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica*, 63(3): 287-297.
- SHEHATA, S.; A. GHARIB; M. EL-MOGY; A. GAWAD AND E. SHALABY. 2011. Influence of compost, amino and humic acids on the growth, yield and chemical parameters of strawberries. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(11): 2304-2308.
- SIERRA, C. Y C. ROJAS. 2002. La materia orgánica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos. pp: 5-26. En: Rojas, C. (Ed). *Tecnologías y prácticas en el manejo de los recursos naturales para la recuperación de los suelos degradados*. Santiago, Chile: INIA. 168p.

SOCARRÁS, A. 2013. Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. *Pastos y Forrajes*, 36(1): 5-13.

TRÜKMANN, K.; E. REINTAM; J. KUHT AND V. RÄÄTS. 2006. Growing of mugwort (*Artemisia vulgaris* L.), canadian thistle (*Cirsium arvense* L.) and yellow lupine (*Lupinus luteus* L.) on compacted soil. In: HORN, R; H. FLEIGE; S. PETH AND X. PENG (Eds). *Soil management for sustainability. Advances in Geoecology*. 38. IUSS. Catena Verlag. Reiskirchen. Germany, pp: 362-369.

WARRICK, A. (Ed.). 2002. *Soil Physics Companion*. CRC Press. Boca Ratón, USA. 389p.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE RIEGO TECNIFICADO: DIAGNÓSTICO, MANTENCIÓN Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Brian Baeza S., Víctor Beyá-Marshall y Cristián Kremer F.

Diagnóstico de sistemas de riego tecnificado usados en huertos de paltos y cítricos de la Región de O'Higgins

Durante el desarrollo del proyecto, se realizó el diagnóstico del sistema de riego de 42 productores de las comunas de Peumo, Pichidegua y Las Cabras. De ellos, sólo el 51% contó con un equipo de riego en estado “Excelente”, es decir que el caudal de riego diseñado es similar al entregado (>94% de uniformidad); un 22% estuvo en “Bueno” (86 a 94% de uniformidad de riego); un 16% en el rango “Aceptable” (80 a 86% de uniformidad del riego), y un 11% presentó serios problemas de uniformidad (<80%). Los casos más críticos de baja uniformidad se observaron en productores que tienen un sistema de riego muy antiguo (más de 15 años), en el que se presentan problemas asociados al cambio o adición de goteros de diferente caudal, taponamiento y desgaste de goteros y/o goteros de caudal regulable. Por otro lado, se constató que un 22% de los agricultores entregaba más agua de lo que debía: un 32% se encontraba con un riego subóptimo (80 a 95% de eficiencia); un 14% estaba en condiciones inaceptables (<80% de eficiencia), y sólo un 32% presentaba condiciones excelentes. Por su parte, sólo el 25% de los sistemas de riego diagnosticados cuentan con la presión adecuada para asegurar un flujo turbulento, mientras que el resto tiene presiones subóptimas, lo que no sólo aumenta la probabilidad de obturación de los emisores, debido a la acumulación de partículas finas por decantación, sino que conduce a un menor aporte de agua al sistema. Las principales causas de esta falta de presión son: el uso de una bomba de riego de menor potencia, poca mantención de los filtros y/o la incorporación de nuevas líneas de riego. En general, la baja uniformidad y presión de operación provocan un ineficiente manejo del recurso hídrico. Por ello, en este capítulo se entregan indicaciones para el diagnóstico, mantención y solución a los principales problemas de riego de los productores.

Métodos de riego tecnificado

El agua es un recurso limitado que es compartido por distintos agentes económicos, como son la agricultura, industria, minería y consumo humano. En los últimos 10 años, el recurso ha disminuido su disponibilidad, ya sea por un aumento en su demanda, malas prácticas en su uso y por un escenario de cambio climático que, en el caso de Chile, se ha manifestado en una disminución de las precipitaciones (lluvia, nieve) (Garreaud et al., 2020). La agricultura consume más del 88% del recurso (Escenarios hídricos 2020, 2019), por lo tanto, es de su competencia liderar la adaptación a esta nueva realidad y que permita un desarrollo sostenible de la actividad (Santos et al., 2010; Carrazón, 2007).

La baja eficiencia de los riegos tradicionales, también llamados “gravitacionales” (surcos, bordes, inundación), entendiéndose eficiencia como la producción (kg) por m³ de agua de riego utilizado (Martínez y Peralta, 2000), es uno de los problemas clave que se debe abordar para mantener la sostenibilidad de la agricultura. En palabras simples, la introducción de tecnología de riego más eficiente viene asociada a la “promesa” de una producción igual o mayor, pero con menos agua utilizada. La “promesa” es válida, sin embargo, si el operador usa adecuadamente esta tecnología.

El riego localizado de alta frecuencia (RLAF) se refiere, usualmente, a un riego tecnificado, diseñado para regar con una alta frecuencia (una o más veces al día), y con el agua de riego localizada cerca de la planta. Los exponentes más populares de este riego, en el cultivo de paltos y cítricos, son microaspersión (paltos) y goteo (paltos y cítricos), con un rango de eficiencia (con un buen manejo) de un 85 a 90%. Éstos operan humedeciendo sólo una parte del volumen de suelo (riego localizado), entre un 40 a 70% de la superficie, generando un bulbo húmedo, donde las raíces obtienen el agua y los nutrientes (Podestá et al., 2011). El sistema consiste en una unidad de bombeo, que genera presión, y un sistema de transporte del agua a través de una red de tuberías y mangueras con emisores (boquillas, goteros, microaspersores, etc), que entregan el agua a las plantas.

En la microaspersión, el agua aplicada simula una lluvia fina sobre el suelo; los caudales de los emisores utilizados varían entre 20 a 110 L/h con diámetros de mojamiento de 1 a 10 m. Debido a su mojamiento se recomienda en cultivos que poseen sistemas radicales superficiales y extendidos (Ej.: paltos), cuando se desea promover un desarrollo lateral de raíces, o para generar ambientes más húmedos bajo la copa (alternativa en invierno para control de heladas). Debido al alto caudal aplicado por el emisor, se recomienda tener cuidado en su elección y el traslape en suelos con una baja tasa de infiltración (ricos en arcilla), para evitar que el agua se acumule en superficie o, en suelos con altas pendientes (mayores a 20%), para evitar riesgos de erosión. En general, la microaspersión se adapta mejor en suelos poco profundos y con alta velocidad de infiltración (suelos arenosos), debido a que estos suelos tienen una baja capacidad de retención de agua y requieren aplicaciones más frecuentes de riego (Maldonado, 2001).

En el riego por goteo los caudales de los emisores varían entre 1 y 16 L/h; en este tipo de sistemas se incluye el riego por exudación, cintas, microtubos, entre otros. Es un sistema que permite aplicar el agua gota a gota de forma controlada. A diferencia de la microaspersión, el humedecimiento del suelo por el emisor cubre una menor superficie, por lo que el número de emisores utilizados por hectárea es mayor. La selección del emisor, en lo referente a su caudal y distanciamiento (número de emisores por planta), está íntimamente relacionada a la textura del suelo, al traslape deseado y al requerimiento diario de agua del cultivo (evapotranspiración del cultivo (ETc)). En texturas finas (franco arcilloso, franco limoso, etc) la tasa de infiltración es baja y el bulbo de mojamiento tiene un desarrollo más horizontal que vertical (Figura 1A), por lo tanto, se debe seleccionar un emisor de bajo caudal (2 a 4 L/h) y se deben posicionar más distanciados (0,7 a 1,2 m); por el contrario, en suelos arenosos la tasa de infiltración es mayor, favoreciendo bulbos más verticales que horizontales (Figura 1B), por lo tanto, se puede seleccionar goteros de un mayor caudal sin riesgo de inundación, aunque se recomienda goteros de menor caudal (2 a 4 L/h) para evitar pérdidas por percolación, y más cercanos (0,4 a 1 m). En general, el riego

por goteo tiene mejor comportamiento en suelos con baja tasa de infiltración (suelos arcillosos), debido a que la entrega de agua es lenta, permitiendo que el suelo logre absorber el agua.

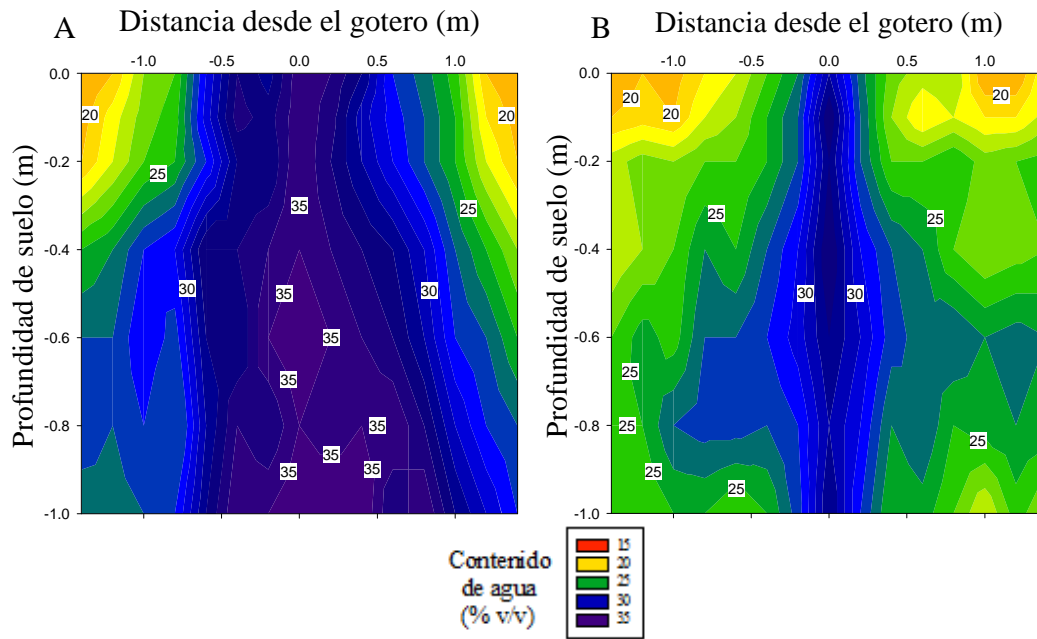


Figura 1. Patrón de humedecimiento del suelo después de un riego de 4 horas con un sistema de riego por goteo con emisores de 4 L/h para dos tipos de suelo. (A) Calicata de un metro de profundidad, suelo franco arcilloso regado una vez por semana de la localidad de Rastrojos. (B) Calicata de un metro de profundidad, suelo franco arenoso regado dos veces por semana de la localidad de Pencahue, San Vicente de Tagua Tagua.

Las principales ventajas de un riego tecnificado de alta frecuencia son:

- Controlar la humedad del suelo en la zona de mayor concentración de raíces.
- Determinar con exactitud el tiempo y frecuencia de riego
- Distribución y entrega homogénea del agua al cultivo, permitiendo la obtención de mayores y mejores rendimientos.
- Automatizar el sistema de riego, facilitado su manejo.
- Agregar un sistema de inyección de fertilizantes.
- Incrementar la eficiencia del uso del agua.
- Disminuir los efectos de escurrimiento superficial y la percolación profunda.
- Cuantificar caudales y volúmenes de agua aplicados, conociendo los componentes del balance hídrico.

Componentes de un sistema de riego localizado

En general, un sistema de riego está compuesto por:

- a) Cabezal de riego
- b) Red de distribución
- c) Electroválvulas
- d) Emisores

Cabezal de riego

El cabezal de riego se define como el espacio físico que contiene los elementos para generar presión y caudal, filtraje, fertilización, regulación y control del equipo de riego.

Fuente de presión (energía). Los equipos tecnificados necesitan una fuente de presión para operar adecuadamente. Tanto los filtros, emisores, como válvulas solenoides necesitan presiones de operación mínimas; un buen diseño considera estos requerimientos y otros de relevancia (ej.: pérdidas de carga; será explicado en secciones posteriores). La fuente de presión puede ser natural, en donde la energía es generada por la diferencia de cota o altura hidrostática entre la fuente de agua y el cultivo, o una fuente de presión mecánica, donde generalmente se utiliza una bomba.

El motor de la bomba (eléctrico o de combustión) hace girar el rodete y el trabajo de éste se transforma en presión y caudal del agua, lo que dependerá del diseño, la potencia (kVA) requerida para su operación, diámetro del rodete y las revoluciones por minuto (rpm) a la cual trabaja. Por lo tanto, la correcta operación de un sistema de riego tecnificado depende de la selección de la bomba adecuada, es decir, que cumpla con los requerimientos de caudal y presión que el sistema en su conjunto necesita para una operación eficiente. Las empresas especializadas en diseño e instalación de riegos tecnificados conocen la operación de los equipos y proporcionan la información que justifica el diseño que ofrecen. Como clientes, es recomendable exigir la memoria de cálculo del diseño, planos, potencia y caudales por sector, etc., que sirvan de respaldo para auditar la propuesta de sistema y, posteriormente, identificar posibles fallas en el mismo.

Estación de filtrado. Los filtros tienen por objetivo impedir que las impurezas o partículas en suspensión en el agua de riego ingresen a la red de tuberías, evitando, así, el taponamiento u obturación de los emisores. La selección del tipo de filtro es función del caudal y de la calidad física del agua de riego disponible, la cual varía según su origen (canal, tranque, pozo o noria), época del año y tamaño de las partículas; aguas con mayor cantidad de partículas en suspensión (arena, limo, arcilla) requieren mayor capacidad de filtrado, como lo son el agua proveniente de canales, ríos o quebradas, que en periodos de deshielo (verano) contienen mayor cantidad de partículas en suspensión. Por otro lado, aguas provenientes de pozos profundos o norias son de una calidad física más estable, aunque también pueden presentar variaciones debido a la fluctuación del nivel freático.

La obturación de los emisores también puede ser provocada por partículas orgánicas (algas, bacterias o restos de plantas) o químicas, como sales de baja solubilidad que precipitan o

sales provenientes de los mismos fertilizantes. Esto vuelve al sistema ineficiente, provocando que la entrega de agua por los emisores no sea uniforme, comprometiendo el desarrollo del cultivo (Boswell, 1990). Adicionalmente, la durabilidad de los componentes del sistema se ve reducida y el costo de mantenimiento se eleva.

Para la correcta selección del tipo y tamaño de filtros se deben considerar los siguientes aspectos:

- a) Tipo, tamaño y concentración de las partículas en suspensión, determinada por un análisis físico de agua (Cuadro 1).
- b) Caudal del diseño y pérdida de carga nominal del filtro.

Cuadro 1. Caracterización de las partículas en suspensión en el agua de riego. Keller y Bleisner. 1990

Clasificación	Diámetro de partículas	
	(mm)	(micrones)
Arena grano muy grueso	1,00-2,00	1.000-2.000
Arena grano grueso	0,50-1,00	500-1.000
Arena grano medio	0,25-0,50	250-500
Arena grano fino	0,1-0,25	100-250
Arena grano muy fino	0,05-0,1	50-100
Limo	0,002-0,05	2-50
Arcilla	0,002	2
Bacterias	0,0004-0,002	0,4-2
Virus	<0,0004	<0,4

1.000 micrones = 1 mm.

Caudal de diseño y pérdida de carga nominal del filtro. El filtro requiere de una presión mínima de operación para que circule el agua a través de él y ejerza su función filtrante. La presión de operación requerida dependerá del tipo de filtro y su origen, y varían entre 1 a 2 bar. Por ser un componente que dificulta el paso del agua (singularidad) se genera una pérdida de presión, o también llamada “pérdida de carga nominal”; como norma general se recomienda que ésta no sea superior a los 0,35 bar o 3,5 metros de columna de agua (m.c.a), cuando el filtro está completamente limpio. Al comenzar a operar el riego, los filtros comienzan a acumular partículas; a medida que el filtro se ensucia, el paso del agua se ve dificultado, aumentando la pérdida de carga. Esto provoca que la presión disponible para la operación del resto del sistema, conducción y emisores, disminuya. Esto no es un problema hasta que la pérdida supera un rango máximo que altera el caudal emitido y, por consiguiente, la eficiencia del riego. El valor umbral se considera de 0,5 bar. Una manera práctica para identificar el momento de realizar una limpieza es instalar dos manómetros, uno en la entrada de agua de los filtros (aguas arriba) y otro a la salida (aguas abajo); si la diferencia entre los manómetros es igual o superior al umbral se debe realizar un “lavado” de los filtros (Figura 2).



Figura 2. Disposición de manómetros en la estación de filtrado. En (A), manómetro aguas arriba, presión de 2,3 bares; en (B), manómetro aguas abajo, presión de 1,7 bares. El momento de realizar la limpieza de los filtros es cuando el diferencial de presión entre ambos manómetros supera los 5 m.c.a (0,5 bares). En la figura el diferencial llega a los 0,7 bares, cometiéndose el error de trabajar con el filtro sucio.

Filtro de malla. El filtro de malla está compuesto por dos cilindros, uno externo o carcasa, que constituye el cuerpo de la unidad, y uno interno que actúa como soporte de la malla. Este tipo de filtros se utilizan habitualmente para retener partículas inorgánicas, como arenas de distintos tamaños. No se recomienda utilizarlos con aguas con alto contenido de partículas inorgánicas finas (limo y arcilla) o residuos orgánicos, dado que estos obstruyen rápidamente los orificios de la malla.

La capacidad de un filtro de malla para retener, de acuerdo al tamaño de las partículas, se expresa en unidades “Mesh”, lo cual equivale al número de orificios que tiene la malla por pulgada lineal. Así, cada número Mesh posee un diámetro de orificio que se relaciona con el tamaño de las partículas que logra retener; en el Cuadro 2 se entrega la relación entre el número Mesh y el diámetro de partículas a retener.

Cuadro 2. Diámetros de partículas equivalentes al tamaño de orificio para diferentes categorías Mesh. Lopez et al. (1992).

Número mesh	Diámetro equivalente (mm)	Clasificación
16	1,180	Arena grano muy grueso
20	0,850	Arena grano grueso
30	0,600	Arena grano medio
40	0,425	Arena grano medio
100	0,150	Arena grano fino
140	0,106	Arena grano fino
170	0,090	Arena grano muy fino
200	0,075	Arena grano muy fino
270	0,053	Arena grano muy fino
400	0,038	Limo

Limpieza del filtro de malla. En un filtro de malla completamente limpio, la pérdida de carga nominal (diferencial de presión entre la entrada y salida del filtro) varía entre 1 a 3 m.c.a (0,1 a 0,3 bares), dependiendo del modelo del filtro. Estos deben limpiarse cuando el diferencial de presión supera los 5 m.c.a (0,5 bares); para la limpieza del filtro se debe sacar la malla, sumergirla en agua limpia y eliminar todas las partículas que quedan retenidas en los orificios con una escobilla suave y detergente. No es recomendable limpiar el filtro con agua bajo presión, ya que esto podría dañar la malla, deformarla o incluso romperla. Utilizar una escobilla es especialmente importante, ya que las partículas finas (limo y arcilla), generalmente, se incrustan en los orificios, por lo que no es fácil eliminarlas sólo sumergiendo la malla en agua limpia.

Filtro de arena o grava

Los filtros de arena se utilizan frecuentemente cuando la fuente de agua contiene alta concentración de partículas finas en suspensión, como, por ejemplo, partículas de limo, arenas finas o partículas orgánicas. Tienen la capacidad de atrapar y retener niveles importantes de residuos sin aumentar significativamente la pérdida de carga.

Se trata de dos o más depósitos conectados en paralelo con una entrada y una salida de agua en común. Dentro de estos depósitos se encuentra una masa de arena angular (no es la arena de playa o lecho de río) o de grava por la que circula el agua, dejando las partículas retenidas entre los espacios o poros que quedan entre ellas. Estos poros no son de un diámetro uniforme, provocando que las partículas de mayor tamaño queden retenidas en la superficie de la grava y que las de menor tamaño queden retenidas en profundidad; finalmente, el agua limpia se colecta en el fondo del estanque del filtro, para continuar su dirección al sector de riego. Un ejemplo de los distintos tipos de arena disponible y su capacidad filtrante se indica en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Arenas disponibles y capacidad filtrante. Martínez (2001).

Material	Clase	Diámetro efectivo		Diámetro de poros		Mesh
		mm	Micrones	mm	Micrones	
Granito Molido	8	1,5	1500	0,214	214	70
Granito Molido	11	0,78	780	0,111	111	140
Arena de Sílice	16	0,66	660	0,094	94	170
Arena de Sílice	20	0,46	460	0,066	66	230
Arena de Sílice	30	0,27	270	0,039	39	400

La capacidad de flujo o caudal máximo de un filtro está determinada por el diámetro del cilindro y la tasa de filtrado, parámetros expresados en unidades de longitud (pulgadas) y caudal/área (galones/minuto/pie² o L/s/m²). Para el diseño de la estación de filtrado se debe conocer la calidad del agua a utilizar (tipo, tamaño y concentración de partículas presentes). Para esto se debe realizar un análisis físico de agua y, en base a esto, se seleccionará la tasa

de filtración necesaria (Cuadro 4), para luego relacionarlo con el caudal a filtrar y los diámetros disponibles en el mercado (Cuadro 5); en caso de necesidades de caudales mayores se debe sumar una nueva unidad de filtro.

Cuadro 4. Tasa de filtración para el diseño de filtros en función del contenido de sólidos en suspensión en el agua. Nakayama y Bucks (1991).

Nivel de partículas en suspensión	Concentración (mg/L)	Tasa de filtración (galones/min/pie ²)	Tasa de filtración (L/s/m ²)	Diámetros de cilindro (pulgadas)
Leve	0-10	25-30	17,0-20,4	30-48
Moderado	10-100	20-25	13,6-17,0	24-30
Severo	100-400	15-20	10,2- 13,6	18-24

Cuadro 5. Caudales máximos (L/s) por unidad de filtro en función de la tasa de filtrado. Martínez (2001).

Tasa de filtración (galones/min/pie ²)	Diámetro del filtro (pulgadas)				
	18	24	30	36	48
	Caudal máximo (L/s)				
15	1,70	2,96	4,67	6,69	11,93
20	2,21	3,98	6,18	8,89	15,84
25	2,78	4,98	7,76	11,17	19,81
30	3,34	5,93	9,28	13,38	23,79

Limpieza del filtro de arena. Para la limpieza de los filtros de arena se debe hacer circular el flujo de agua en sentido contrario al filtrado, manipulando la apertura y el cierre de las válvulas; esta operación se conoce como “retrolavado” (Figura 3). El agua que previamente es filtrada es utilizada para lavar la arena del filtro en proceso de retrolavado. Este es uno de los motivos por el cual no se recomienda la instalación de un solo filtro de arena, ya que cuando se ejecuta el retrolavado, el agua que fluye en sentido contrario no ha pasado previamente por un proceso de filtrado, limpiando la arena del estanque con agua cargada de partículas en suspensión. En estos casos, se puede complementar con un filtro de malla o anillas. El agua sucia que proviene del lavado del filtro tiene escape por la tubería de retrolavado o desagüe; ésta puede ser vertida en un estanque para su reciclado o en un canal de derrame donde no produzca problemas.

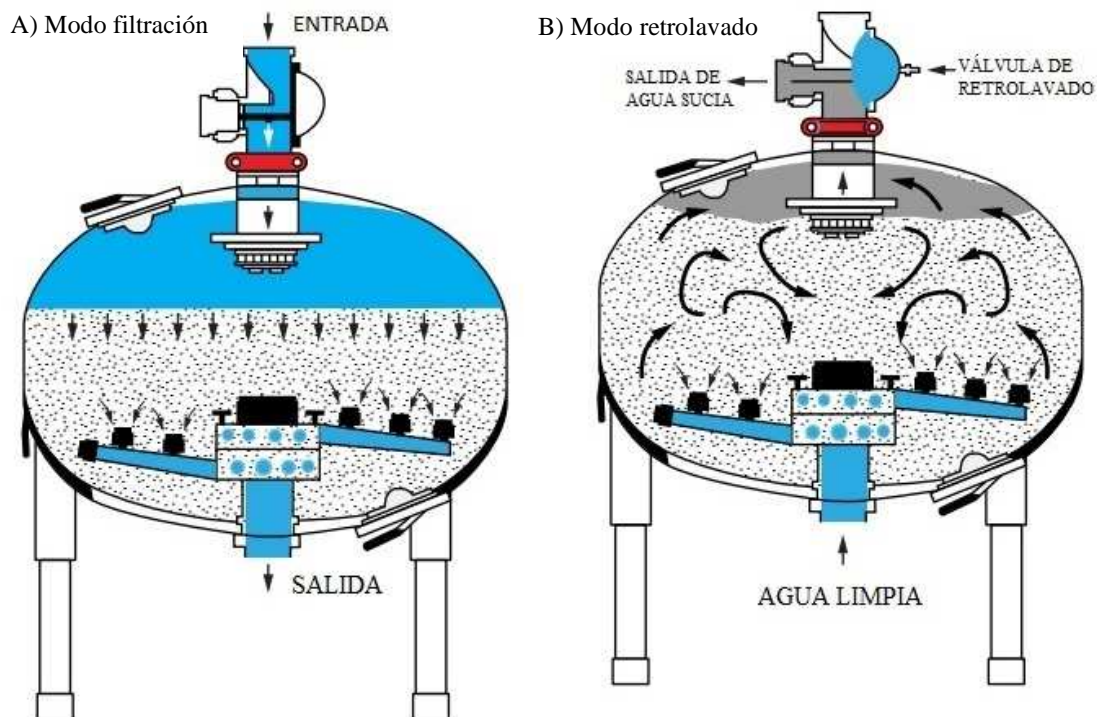


Figura 3. En (A) filtro de arena en modo filtración y, en (B), filtro de arena en modo retrolavado. Boswell (1990).

El retrolavado puede durar entre dos a cinco minutos y, mientras se esté ejecutando, no habrá paso de agua al sistema, por lo tanto, este periodo debe ser descontando del tiempo de riego. El momento de ejecutar un retrolavado puede ser automatizada a través de un programador o "filtrón", ajustando los retrolavados a un determinado tiempo de funcionamiento del sistema o cada vez que se cumpla el diferencial de presión entre la entrada y la salida de los filtros, normalmente 0,5 bares.

Adicionalmente a los retrolavados, al comienzo de la temporada de riego (o con mayor frecuencia si las condiciones del agua lo demandan), se recomienda abrir la compuerta de los filtros y remover la arena depositada al interior. Al remover la arena se debe observar si ésta se encuentra cementada o aglutinada; si este es el caso, se debe reemplazar la arena. Luego, con una manguera, se debe inyectar agua a presión para remover todas las impurezas que el retrolavado no logró limpiar, hasta que el agua salga limpia y la arena vuelva a su color original (blanco).

Al final de la temporada de riego, se recomienda abrir nuevamente la compuerta de los filtros, extraer toda la arena y comprobar el desgaste de las paredes interiores del filtro, aprovechando la oportunidad de aplicar pintura antióxido si fuese necesario. Antes de incorporar la arena, se debe revisar si los bordes de las partículas están redondeados; el tipo de arena que se utiliza estos filtros es de bordes afilados, lo que provoca que se generen poros o canales de diferente diámetro y tortuosidad entre ellas, facilitando la captura de

partículas de diferentes tamaños. Si los bordes de las arenas se encuentran redondeados es recomendable reemplazarla.

Filtro de anilla

Las anillas son discos de plástico con pequeños surcos o ranuras en su superficie; éstos van dispuestos uno sobre otro en un soporte o eje cilíndrico, formando un cuerpo poroso que tiene la capacidad de retener partículas de diferente tamaño. El agua pasa a través de los pequeños espacios o canales que quedan entre los discos, reteniendo las partículas grandes en la superficie externa y las partículas finas en las ranuras internas de los discos. La calidad de filtrado va a depender del número de ranuras de cada disco.

La forma de las ranuras no es uniforme, por lo que los pequeños surcos que se forman entre dos anillas tienen diferente tortuosidad y tamaño. Los filtros de anillas se clasifican según su equivalencia en unidades Mesh, asignándole la capacidad de filtrado como si se tratara de un filtro de malla (Cuadro 2).

Limpieza del filtro de anillas. A medida que las anillas van reteniendo partículas, el filtro se va ensuciando y el flujo de agua se va dificultando. Si el filtro no se limpia a tiempo, la pérdida de carga puede ser excesiva, el sistema comienza a tener un mayor gasto energético y esto podría provocar una menor entrega de agua al cultivo. Por esto, es importante conocer la pérdida de carga nominal del filtro, o diferencial de presión entre la entrada y salida de los filtros limpios. Como norma general, en filtros de anillas la pérdida de carga nominal corresponde a 2 m.c.a (0,2 bares); cuando dicho valor alcanza los 5 m.c.a (0,5 bares) es tiempo de realizar la limpieza del filtro.

Para limpiar un filtro de anillas, de forma manual, se debe abrir la carcasa, quitar el soporte donde se encuentran las anillas, separar los discos con la mano y someterlos a agua bajo presión. Si luego de utilizar agua bajo presión aún queda suciedad entre las anillas, se recomienda utilizar una escobilla suave y detergente para remover las partículas que quedan incrustadas.

En la actualidad, existen filtros de anillas adaptados para retrolavado. Su funcionamiento es similar al retrolavado de un filtro de arena, en donde el flujo inverso del agua previamente filtrada limpia las anillas. Por ello es recomendable utilizar al menos dos filtros de anillas conectados en paralelo o complementar con un filtro de malla, para no utilizar agua sin filtrar en el proceso de limpieza. El procedimiento consiste en un sistema automático que separa las anillas para que el agua remueva fácilmente las impurezas que han quedado en las ranuras de los discos.

Red de distribución

La red de distribución hace referencia al conjunto de tuberías que conducen el agua desde la fuente (pozo, noria o tranque) hasta el cultivo. Las tuberías más utilizadas en los sistemas de riego son de policloruro de vinilo (PVC), debido a su resistencia y plasticidad, en piezas que se unen fácilmente mediante adhesivos. También, al nivel de submatrices y laterales se

utilizan las de polietileno (PE), que tienen la ventaja de unirse mediante componentes mecánicos, lo cual facilita su desmontaje para la reparación o reemplazo.

Las tuberías en un sistema de riego se clasifican en:

Succión o aspiración. Generalmente de PVC o fierro forjado, es la tubería que conduce el agua desde la fuente hasta la entrada de la bomba, para que luego sea impulsada a los sectores de riego. En el extremo contrario a la bomba, se debe instalar una válvula de pie, que tiene como función permitir el ingreso del agua a la tubería de succión, pero cerrarse e impedir que el agua salga, para evitar que se pierda la columna de agua en el interior de la tubería y que la bomba no succione aire en el siguiente riego. Esta válvula cuenta con un filtro de malla o “canastillo” que retiene las impurezas de la fuente de agua, impidiendo que éstas lleguen a la entrada de la bomba. Dado que es común que este filtro se ensucie, es recomendable que la tubería de succión esté acoplada a la bomba con una unión americana, para desmontarla fácilmente y poder limpiar este filtro.

La tubería de succión debe ser recta, lo más corta posible, y ojalá en una a dos medidas superior al diámetro de succión de la bomba; nunca menor y, por ningún motivo, se debe doblar o torcer (Figura 4). Cuando la fuente de agua requiera succión, o sea, esté por debajo del nivel de la bomba, y con el fin de evitar bolsas de aire en la parte horizontal de la tubería, se debe instalar con una leve inclinación descendiente desde la bomba hacia la fuente de agua. Como norma general, la distancia vertical entre el centro de la bomba y el espejo de agua de la fuente no debe superar los 6 metros de largo; sin embargo, para el diseño se debe tener en cuenta el modelo de la bomba y su altura neta de aspiración requerida ($NPSH_r$). Esta información debe ser proporcionada por la empresa diseñadora del sistema. Si la tubería es de PVC, se recomienda pintar de color blanco para protegerla de la radiación solar directa.



Figura 4. Tubería de succión en noria. (A) soporte inadecuado que provoca una inclinación excesiva hacia la fuente de agua succionando el agua desde el borde del espejo de agua

de la noria y en (B) tubería torcida antes de entrar a la caseta de riego. Esto disminuye la eficiencia de succión del agua por la bomba, afectando la presión de operación.

Matriz o principal. Es la tubería de mayor diámetro, generalmente de PVC y bajo tierra, que conduce el caudal requerido hasta las válvulas que permiten el paso del agua a un determinado sector de riego. Para limpiar esta tubería es recomendable instalar una salida o desagüe con una válvula manual en su extremo.

Auxiliar o secundaria. Dependiendo de la topografía del terreno y el diseño del sistema, se puede necesitar una tubería que conduzca el agua hasta un sector de riego con el objetivo de disminuir las pérdidas de carga. Esta tubería generalmente se utiliza en sistemas de riego instalados en laderas de cerros, con la finalidad de disminuir la dispersión de caudales y presiones necesarias para los diferentes sectores, facilitando la elección de la bomba. Esta tubería puede ser del mismo diámetro que la matriz, incluso menor, pero nunca mayor que una terciaria o submatriz. Cuando es utilizada, en su extremo se instala la válvula que permite el paso del agua al sector de riego.

Submatriz, terciaria o portalaterales. Estas tuberías generalmente comienzan a partir de la válvula del sector de riego y distribuyen el agua hacia los emisores a través de las laterales, cintas o mangueras. Son de menor diámetro que la matriz y la auxiliar. Sin embargo, se pueden combinar diferentes diámetros en el diseño, con el objetivo de disminuir las pérdidas de carga.

Laterales o porta emisores. Generalmente son de polietileno (PE). En estas mangueras van insertos los emisores. En el mercado existe una amplia diversidad de laterales, lisas o con emisores incorporados, con goteros autocompensados, antidrenantes, exudantes, etc. Para sistemas con microaspersores, estos se acoplan a las laterales a través de un microtubo y son alineados y fijados al suelo con una estaca.

Automatización

Para facilitar la gestión del sistema, la mayoría de los proyectos de riego tecnificado incluyen una estación de automatización. Se trata de un dispositivo capaz de encender o apagar la bomba y enviar pulsos eléctricos a los solenoides de las electroválvulas para abrir y cerrar el flujo del agua a los diferentes sectores de riego. A través de este dispositivo se programa la frecuencia y el tiempo de riego de cada sector.

La mayoría de los programadores disponibles en el mercado funcionan entre 24 y 60 volts requiriendo transformadores y baterías (dependiendo del fabricante y el modelo del programador). A su vez, los programadores envían pulsos eléctricos de 24 a 30 volts, para accionar las electroválvulas que dan el paso del agua a un sector de riego en particular.

Para diagnosticar el funcionamiento de estos componentes (programador y electroválvulas) se debe contar con un multímetro de mano, seleccionando la opción voltímetro, con el sector de riego funcionando; se debe situar el terminal negro en la posición C del programador (entrada común) y el terminal rojo en la posición del sector que se está regando, asegurando un buen contacto de los terminales, como se muestra en la Figura 5. Los valores obtenidos deberían variar entre 22 a 30 volts. De igual forma, para diagnosticar

el funcionamiento eléctrico de los solenoides de las válvulas en terreno, se debe disponer los terminales del multímetro en cada cable de conexión del solenoide (Figura 5); la lectura entregada debería variar entre 22 y 30 volts, pues lecturas bajo los 22 volts no permitirán accionar el pistón del solenoide, provocando que la válvula no abra.

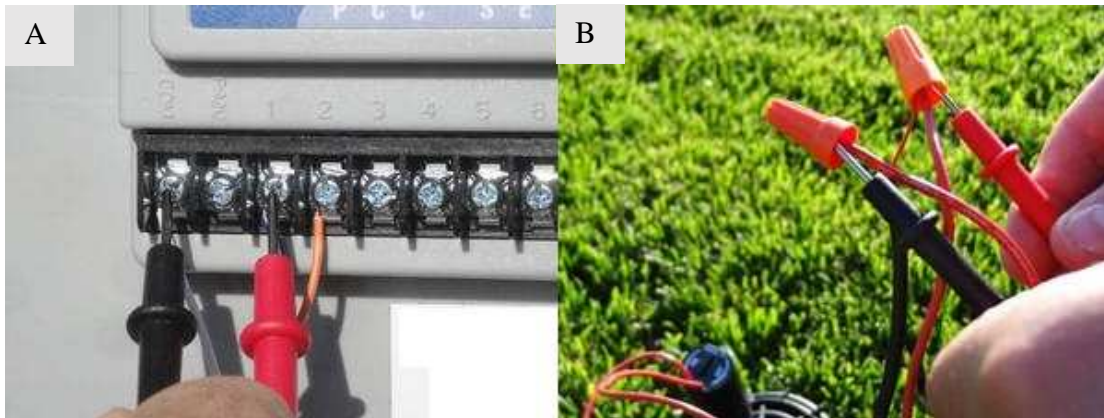


Figura 5. (A) Evaluación de voltaje en el programador de riego y (B) en el cableado de las electroválvulas. Ambos lugares deben ser evaluados con un multímetro de mano.

Electroválvulas

En la actualidad, la mayoría de los sistemas de riego incluyen electroválvulas, dispositivos encargados de abrir o cerrar el paso del agua a un sector de riego, al ser accionados mediante pulsos eléctricos que envía el programador, lo que permite automatizar el proceso de riego, ahorrando tiempo en la operación del sistema. Un componente importante de la electroválvula es el solenoide; se trata de una bobina capaz de transformar el pulso eléctrico en energía mecánica, provocando el movimiento ascendente o descendente de un pistón interno, que modula la apertura o cierre de la válvula.

Es importante conocer el funcionamiento de una electroválvula, ya que, al igual que todos los componentes del sistema de riego, con el paso del tiempo se deterioran. El diagnóstico de sus componentes indica si es necesario reemplazarla, reponer alguna de sus piezas defectuosa o, simplemente, realizar una limpieza, debido a la acumulación de residuos en su interior. En la Figura 6 se muestran los componentes y se describe su funcionamiento de una electroválvula.

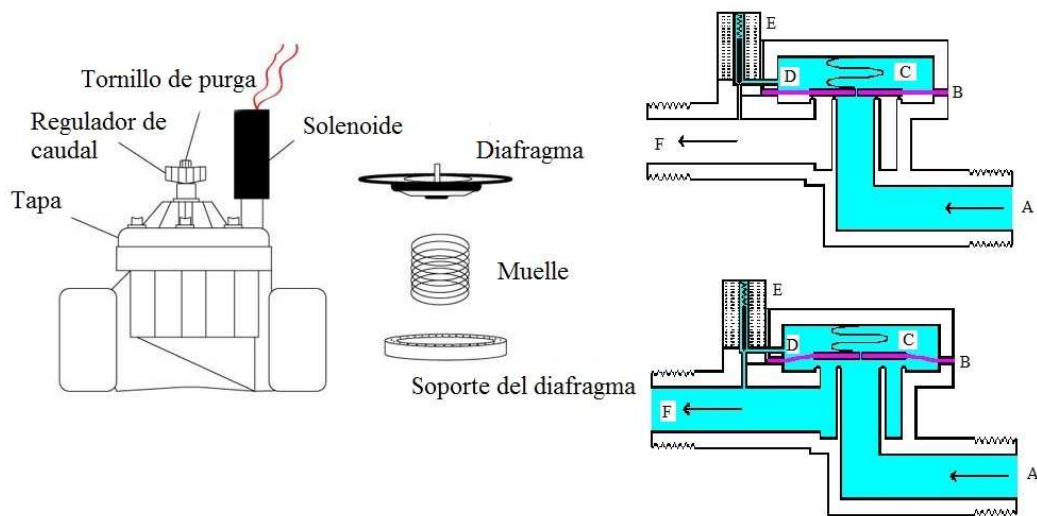


Figura 6. A la izquierda, componentes de una electroválvula y a la derecha mecanismo de funcionamiento. (A) entrada de agua, (B) diafragma, (C) cámara de presión, (D) canal de agua al solenoide, (E) solenoide y (F) salida de agua al sector de riego

El agua, al llegar a la electroválvula, ejerce fuerza contra el centro del diafragma (Figura 6B). Un pequeño orificio en él permite que el agua fluya a través de la cámara de presión (Figura 6C) hasta llegar al solenoide. Cuando la válvula está cerrada, el solenoide (Figura 6E), a través de su pistón interno, impide que el agua salga de la cámara de presión, provocando que el diafragma quede rígido, ejerciendo presión a la parte inferior de la cámara, impidiendo que el agua pase por la válvula. Al recibir el pulso eléctrico, el solenoide (Figura 6E) levanta su pistón, permitiendo que se libere el agua de la cámara de presión (Figura 6D); esto provoca que el diafragma suba y se abra el paso del agua al sector de riego (Figura 6).

En el caso que la válvula no abra o no cierre correctamente, se debe verificar el voltaje que llega al solenoide con un multímetro de mano (Figura 5). Si los valores de voltaje son correctos, se deben revisar los componentes internos de la válvula.

Antes de revisar la válvula, se debe desactivar el programador para que no se ejecuten riegos mientras se procede al diagnóstico. Es muy importante cortar el suministro de agua, para no correr riesgos de abrir la válvula bajo presión, ya que puede ser peligroso. Asegurado esto, se debe desatornillar el solenoide (cilindro superior que lleva los cables) y limpiar con un cepillo la parte inferior de éste (donde se encuentra el pistón), luego volver a atornillar el solenoide y probar un riego de forma manual para verificar si el pistón se retrae cuando recibe energía o darle un impulso con una batería portátil, si no funciona se debe reemplazar el solenoide. Si el solenoide funciona correctamente, se debe revisar el interior de la válvula, quitando los tornillos de la tapa. Luego se debe quitar el muelle y el diafragma y limpiarlos con agua, retirando cualquier residuo, examinando detalladamente el diafragma; este debe carecer de perforaciones, roturas o pliegues. Por último, se debe

armar nuevamente la válvula y ejecutar un riego manual, si la válvula no responde debe ser reemplazada.

Emisores

Son los dispositivos que van insertos en las laterales, encargados de entregar el agua de forma controlada.

Los emisores se clasifican de acuerdo al caudal de descarga (L/h) y por la presión que necesitan para su funcionamiento (bar). Existen emisores autocompensados, que mantienen un caudal estable o con mínimas variaciones dentro de ciertos rangos de presión, y los no autocompensados, en donde la relación entre la presión y el caudal es lineal, es decir, que a mayor presión los emisores entregarán mayor caudal. Existen algunos modelos de emisores de caudal regulable, a través del giro de su tapa; a medida que se atornilla la tapa el caudal será menor. Estos emisores no son autocompensados, por lo que, al regularlos, es muy difícil que todos entreguen un caudal similar; son ampliamente utilizados en sistemas de riego para paisajismo, donde se asocian especies con diferentes requerimientos hídricos; no son recomendados en sistemas de riego de frutales, donde se busca uniformidad en la aplicación.

Los caudales en cintas de riego varían entre 0,3 y 1,5 L/h por emisor. Para las mangueras de polietileno (PE), que comúnmente se utilizan en riego de frutales, los caudales varían entre 1 a 25 L/h (comúnmente se utilizan de 2 a 4 L/h), y para microaspersores se desde 20 a 110 L/h (comúnmente se utilizan de 20 a 35 L/h); éstos se establecen en terreno en una estaca a la altura recomendada por el fabricante, para que cumpla con diámetro de mojamiento.

Control de descarga y presión de los emisores. Para lograr la uniformidad y eficiencia de riego con un riego localizado de alta frecuencia, se deben mantener los parámetros de operación lo más estables en el tiempo. Por lo tanto, es recomendable, al comienzo de la temporada de riego y al medio de ésta, verificar si los parámetros se mantienen acorde al diseño, aunque mientras más frecuente se realice el control, más opciones de detectar y corregir los problemas a tiempo. Los parámetros clave a controlar son: la presión disponible en distintos nodos del equipo y la descarga de los emisores en distintos sectores de riego.

Para medir la presión de funcionamiento de un sector de riego en particular se debe contar con un manómetro de mano con un terminal de aguja desmontable, tomas manométricas y un saca bocado (Figura 7).



Figura 7. Herramientas para el control de presión en líneas de riego: (A) terminal aguja desmontable para manómetro, (B) tomas manométricas tornillo y botón, (C) manómetro y (D) sacabocado.

El protocolo de control es recomendable realizarlo, al menos, una vez por temporada; al comienzo de la temporada de riego. Después de que el equipo ha tenido una mantención adecuada: limpieza de filtros, mantención de bombas y de electroválvulas, se debe operar el equipo en condiciones normales de riego y regular las presiones de operación, comenzando desde el cabezal de riego para terminar en las submatrices y laterales de riego. Las presiones requeridas en cada punto deben estar indicadas en la memoria de cálculo entregada por la empresa que instaló y diseñó el equipo. Los puntos de control de control del equipo de riego son:

1. Descarga de la bomba: como norma general, después de la descarga de la bomba se instala una válvula de control, que, abriendo o cerrándola, permite regular el flujo de agua y la presión disponible, instalando un manómetro a unos 30 a 50 cm de la válvula.
2. Manómetros a la entrada y salida de los filtros: revisar si las presiones cumplen con los requerimientos de diseño. Si la presión a la entrada es menor a la requerida se debe regular con la válvula de control hasta obtener la presión requerida en ese punto. Si abriendo o cerrando la válvula no hay cambios sustanciales en la presión, es indicador de algún problema, como puede ser una obturación en el tramo o eventualmente en la succión de la bomba.
3. Control de las submatrices: la electroválvula al inicio de cada sector de riego tiene una llave de regulación incorporada, o hay una válvula de regulación (usualmente del tipo espejo) inmediatamente después, o una válvula de control y otra de regulación colocadas juntas (ambas de espejo). Existen algunas válvulas solenoides que cuentan con un punto de lectura manométrica en la parte superior de la carcasa; si no están disponibles, se debe instalar un punto de lectura en la submatriz con un sacabocado, entre 50 a 100 cm de distancia y otro en el sector más lejano a la válvula (final de la submatriz). Ya reguladas las presiones anteriores (cabezal de riego), se debe regular el cierre o apertura de la válvula de regulación al comienzo

de la submatriz al valor de diseño con el cual fue caracterizado ese nodo. Una vez hecho eso se debe medir la presión en el punto terminal. En términos generales, un diseño con uso eficiente de energía, en un sector relativamente plano, permite que la diferencia de presión entre el punto más cercano y el más alejado de la submatriz no supere un 10% de la presión de entrada, es decir, si la presión cercana a la válvula es de 1 bar, la presión en el punto más lejano no debe ser menor a 0,9 bar. Esa condición de diseño permite que la presión disponible, al comienzo de cada lateral de riego, sea homogénea, logrando un riego más uniforme. Si la regulación de la presión no se logra abriendo o cerrando la válvula de regulación, es un posible indicador de taponamiento en la submatriz.

4. Control de laterales: se recomienda medir la presión al menos en tres laterales en el sector de riego, la inicial, una central y la final. La presión, medida al final de la lateral, deben ser similares a la presión de operación del emisor (dependiendo del emisor entre 0,8 a 1,5 bar). Como norma general, la presión en la línea más lejana de la válvula, para un sistema de riego por goteo, debe ser entre 1 y 1,2 bares; para microaspersión entre 1,3 a 1,5 bares, y para cintas de riego entre 0,5 a 0,8 bares (Ferreira et al., 2005). Sin embargo, esto dependerá del tipo y modelo de emisor utilizado. Si esta condición no se logra después de haber realizado todas las regulaciones anteriores puede indicar taponamiento de la línea o un mal diseño del equipo de riego.

Una vez realizado el protocolo es conveniente volver al inicio y revisar nuevamente las regulaciones para cerciorarse de que no hubiese habido cambios.

Para controlar el caudal de descarga de los emisores se debe medir con un recipiente graduado y un cronómetro, colectando el agua descargada en uno a cinco minutos; para comparar el gasto con el caudal nominal, hay que convertir el caudal a litros por hora (L/h), para lo cual se utiliza la siguiente fórmula:

$$Q(L/h) = \left(\frac{V(mL)}{T(min)} \right) \times 0,06$$

Dónde:

Q = Caudal del emisor (L/h)

V = Volumen colectado (mL)

T = Tiempo utilizado en la colecta de agua (min)

0,06 factor de conversión desde ml/min a L/h

Indicadores de uniformidad de riego. Comprobar que la descarga de los emisores sea uniforme es indicador de la uniformidad de riego del equipo; si el riego es uniforme todas las plantas recibirán aproximadamente la misma cantidad de agua y fertilizantes; si no lo es, algunos sectores recibirán más o menos agua y fertilizantes que lo necesario, afectando negativamente la productividad del cultivo (Elwin et al., 1997).

Coefficiente del área subirrigada (CU 25%). Este indicador de uniformidad evalúa el 25% del área con menor entrega de agua de cada sector de riego y se utiliza para ajustar al 100% la demanda hídrica del cultivo, eliminando la posibilidad de que existan zonas con estrés hídrico.

Para el cálculo del Coeficiente del área subirrigada (CU 25%) se debe tomar una muestra representativa de emisores del sector de riego y medir su descarga. Para seleccionar los emisores se debe dividir el sector de riego en 4 partes, tomar una línea de riego en cada parte (4 líneas en total) y vez dividir cada línea en cuatro porciones, seleccionando un emisor en cada porción, al inicio, dos en las porciones del centro y uno al final de la línea, completando así 16 emisores. Se deben marcar los emisores para medir siempre los mismos y poder comparar las evaluaciones. Simultáneamente con medir el gasto, con un manómetro, se debe medir la presión a la salida de la válvula del sector y al final de cada línea de riego seleccionada.

Se deben transformar los datos a L/h y ordenarlos menor a mayor. Luego, calcular el promedio de todas las observaciones evaluadas ($q \bar{u}$) y el promedio del 25% de los emisores que entregaron el menor caudal ($q_{25\%}$).

Para calcular el Coeficiente del área subirrigada (CU 25%) se utiliza la siguiente fórmula:

$$CU\ 25\% = \left(\frac{q_{25\%}}{q \bar{u}} \right) \times 100$$

Donde:

CU 25% = Coeficiente del área subirrigada (%)

$q_{25\%}$ = promedio del 25% de los valores más bajos de caudal obtenidos (L/h)

$q \bar{u}$ = promedio de todos los caudales de los emisores observados (L/h)

Si el Coeficiente del área subirrigada es inferior a 85% significa que el sistema perdió uniformidad y existen áreas donde llega menor volumen de agua. Las causas más comunes de un bajo CU 25% están asociadas a que el equipo está trabajando a una menor presión de la normal, obstrucciones en la tubería de succión, filtros sucios, o bien los emisores sufren algún grado de obturación. Es recomendable evaluar el CU 25% al menos dos veces en la temporada de riego (al inicio y al final), para comparar la evolución del CU 25% y prevenir posibles problemas en el equipo. El registro de presiones se realiza para descartar que las laterales seleccionadas no presenten fugas, por lo que el diferencial de presión entre la válvula y las laterales seleccionadas no debería superar los 0,2 bares (2 m.c.a).

Coefficiente de uniformidad de distribución de Christiansen (CU). Este coeficiente, descrito por Christiansen (1942), a diferencia del anterior, toma en cuenta la desviación del caudal de cada emisor evaluado respecto del promedio, obteniendo una representación más estadística de la uniformidad de riego de toda el área evaluada y no sólo del 25% menor, como el indicador anterior. Se deben seleccionar mínimo 16 emisores por sector siguiendo el mismo procedimiento. Para el cálculo del Coeficiente de uniformidad de distribución (CU) se utiliza la siguiente fórmula:

$$CU(\%) = \left(1 - \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - X}{X \times n} \right| \right) \times 100$$

Donde:

CU (%) = Coeficiente de uniformidad (%)

X = Promedio de los caudales evaluados (L/h).

n = número de emisores evaluados (16)

xi = valor de caudal de un emisor (L/h)

Esta fórmula, si bien requiere de más cálculos matemáticos, es indispensable realizarla a todos los sectores de riego al momento de recibir el equipo, de esta forma se garantiza, desde un comienzo, que la entrega de agua es uniforme y el sistema funciona eficientemente. Luego, se puede continuar evaluando la uniformidad mediante CU 25%.

A modo de ejemplo, en la siguiente figura se compara el CU de un gotero de caudal regulable y uno de caudal autocompensado; se observa la heterogeneidad del caudal de riego entregado (Figura 8), generando zonas con exceso y falta de humedad.

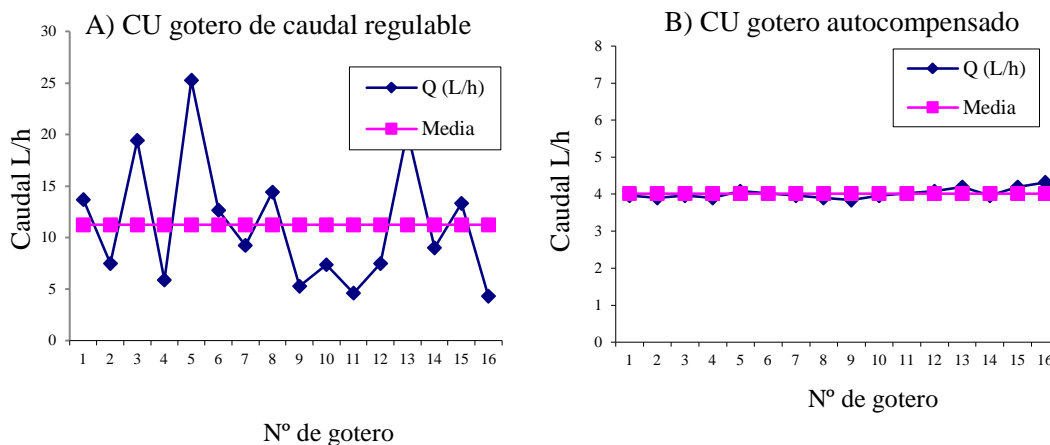


Figura 8. Coeficiente de uniformidad de distribución (Christiansen, 1942) para dos tipos de emisores. (A) gotero de caudal regulable (CU = 55,1%), y (B) gotero autocompensado (CU = 98%).

Capacidad del sistema de riego

El sistema de riego debe ser diseñado para entregar un volumen igual o superior a la demanda máxima de agua del cultivo. Puede suceder que, por ahorrar costos de inversión, se diseñe el equipo de riego con una capacidad inferior a la demanda del cultivo, por lo que es recomendable conocer, previo a la instalación del equipo, la capacidad del sistema de riego o también llamada Intensidad de precipitación del equipo (Ipp), para garantizar que, en el periodo de máxima demanda, el sistema logrará abastecer de agua a los diferentes

sectores durante su operación. Para el cálculo de la Intensidad de precipitación del equipo se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_{pp} \text{ (mm/h)} = \frac{q_e \times N_e}{10.000}$$

Donde:

I_{pp} (mm/h) = Intensidad de precipitación del equipo en milímetros por hora

q_e = caudal de los emisores (L/h)

N_e = número de emisores por hectárea

10.000 = factor de conversión para la unidad de superficie en hectárea

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de un mal diseño del sistema de riego, en donde la capacidad del sistema (I_{pp}) no logrará abastecer de agua al cultivo cuando este llegue a su plena producción (adultez).



Figura 9. Huerto joven de paltos 'Hass'; distancia de plantación de 7 x 5 m, regado por goteo; un emisor por planta de 4 L/h, $I_{pp} = 0,11$ mm/h. La Cantera, Peumo.

En la Figura 9, el sistema de riego del huerto de paltos 'Hass' con emisores de 4 L/h (q_e), una lateral por hilera y un emisor por planta, 286 goteros por hectárea (N_e), tiene una capacidad de (I_{pp}) 0,11 mm/h. La I_{pp} permite conocer cuantas horas de funcionamiento se necesitan para abastecer de agua del cultivo; si la demanda máxima de agua en un día de verano en Peumo es de 5,5 mm/día (ET_c), al dividir esta demanda (5,5 mm/día) por el I_{pp} y ajustarlo por la eficiencia del sistema de riego (90% en el caso del riego por goteo), da como resultado que cuando el huerto llegue a su plena producción se necesitarán más de 50

horas de riego para poder abastecer de agua el cultivo, por lo tanto, existe un claro error en el diseño de la capacidad del sistema, donde, específicamente, se abarataron costos en la cantidad de goteros por hectárea. El tiempo de funcionamiento del equipo de riego o tiempo de operación va a depender de las necesidades del usuario, el número de sectores que necesita regar, la capacidad de la bomba, el costo de la energía eléctrica y la disponibilidad de agua. Los sistemas de riego tecnificado que abastecen grandes superficies, generalmente, se diseñan considerando un tiempo de operación entre 15 a 18 horas/día, con un máximo de 24 horas/día. Por otro lado, los sistemas de riego para superficies pequeñas o abastecidos sólo por energía fotovoltaica, se consideran tiempos de operación menores, entre 8 a 12 horas/día.

Control y diagnóstico en el cabezal de riego

Como todo sistema mecánico, los componentes de un sistema de riego se van deteriorando con el paso del tiempo. El escaso mantenimiento y la falta de capacitación para manejar el equipo contribuyen a que el sistema se estropee con facilidad, lo cual incrementa los costos de mantenimiento. Para que el sistema de riego funcione correctamente se deben realizar las mantenciones de acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante. Sin embargo, es posible abordar problemas comunes y de fácil solución. A continuación, se describen con más detalle.

Dispositivos de diagnóstico de funcionamiento

Los manómetros y el amperímetro (ubicado usualmente en la caja de control de potencia) son componentes fundamentales para diagnosticar posibles fallas en el sistema de riego. El amperímetro evalúa el comportamiento eléctrico de la bomba, mediante la medición de la intensidad de la corriente eléctrica utilizada, y los manómetros registran la presión del agua que circula por la red de tuberías. Es recomendable instalar un amperímetro por bomba y al menos dos manómetros en el cabezal de riego, uno en la tubería de salida de la bomba y otro a la salida de los filtros.

Se recomienda complementar esta información con un horómetro, medidores de caudal (caudalímetros) y contadores de volumen. El horómetro registra la cantidad de horas de funcionamiento del motor de la bomba, y se utiliza para conocer el consumo eléctrico del equipo y programar las mantenciones preventivas al motor. Este dispositivo es especialmente importante en bombas con motor a combustión (bencineros o petroleros). En este tipo de bombas se recomienda revisar el nivel de aceite cada 8 horas de funcionamiento, cambiar el aceite y revisar el estado del filtro cada 50 horas, y limpiar o reemplazar, según su estado, las bujías cada 100 horas de funcionamiento.

Los medidores de caudal permiten conocer la variación del caudal de cada sector de riego respecto al nominal y los contadores volumétricos registran la cantidad de agua utilizada en cada riego.

Se debe tener un registro permanente del amperímetro y los manómetros en cada sector, para compararlos con los valores de normal funcionamiento del equipo; esta información

debe ser proporcionada por la empresa que instala el sistema de riego. Por ejemplo, si la lectura del amperímetro disminuye y la presión del manómetro de salida de la bomba baja, generalmente se trata de un problema en la tubería de succión. Este puede ser de fácil solución, como una obstrucción del filtro o del canastillo de la válvula de pie; también se puede deber a problemas más complejos, entre estos, la disminución considerable del nivel del agua del pozo o noria, la pérdida de la columna de agua en la tubería de succión (ver cebado de la bomba), una excesiva altura de succión o un desgaste excesivo del rodete de la bomba (cavitación) (Ferreira et al., 2005). Otro caso es que la lectura del amperímetro aumente y la presión del manómetro de salida de los filtros disminuya. Probablemente esto se deba a que hay más de una válvula abierta (falla de solenoide o diafragma de la válvula) o exista una fuga importante (rotura de válvula o matriz). Por otro lado, si la lectura del amperímetro baja y la presión de ambos manómetros aumenta, es probable que la válvula del sector de riego esté cerrada (Maldonado, 2015). Por último, si la lectura del amperímetro aumenta y existe un diferencial de presión mayor a 5 m.c.a (0,5 bar) entre la salida de la bomba y la salida de los filtros, es tiempo de realizar una limpieza de los filtros, lo que se explica con mayor detalle en la descripción de cada filtro en párrafos anteriores.

Para facilitar la gestión de todos estos indicadores, se recomienda mantener en un lugar visible un cuadro resumen con la información nominal del equipo, las presiones de cada manómetro, los amperajes y los caudales para cada sector de riego. De esta forma se puede comparar fácilmente con los valores que entrega el equipo al momento del riego.

Voltaje de la fuente de energía. Las bombas con motores eléctricos requieren de alimentación de una fuente de energía para trabajar; esta energía es medida en voltios (V) y para las condiciones chilenas corresponde a 220 V (monofásica) o 380 V (trifásica). Sin embargo, en la práctica, existen variaciones de voltaje debido a la conexión o desconexión de consumos cercanos importantes. La legislación chilena considera una tolerancia de +/- 7,5% de variación en el voltaje, lo que significa que una bomba de 220 V permite una variación entre 203 y 237 V para su normal funcionamiento. Por este motivo, la mayoría de las bombas con motores eléctricos de baja tensión (mono y trifásico) son fabricadas para permitir un rango de variación de voltaje de +/- 10% respecto del nominal. Sin embargo, las variaciones de voltaje dentro de los rangos permitidos pueden perjudicar la operación del motor y de la bomba. Por esto es importante que, además de tener instalados los manómetros y el amperímetro en el cabezal de riego, se cuente con un multímetro de mano para diagnosticar los demás componentes eléctricos del sistema, como el voltaje de la fuente de energía, el voltaje del programador de riego y de los solenoides, si se cuenta con electroválvulas en terreno.

A continuación, en el Cuadro 6, se presentan las posibles interpretaciones y causas de diferentes lecturas de voltaje de la fuente de energía y como deberían reaccionar los manómetros y el amperímetro respecto del normal de funcionamiento del sistema de riego.

Cuadro 6. Posibles interpretaciones y causas de diferentes lecturas de voltaje de la fuente de energía, amperímetro y manómetros del cabezal de riego.

Voltaje de la fuente de energía	Amperímetro	Manómetro salida bomba	Manómetro salida filtros	Causa	Consecuencias
Alto voltaje. Sobre el 110% de la norma	Sobre lo normal	Sobre lo normal	Sobre lo normal	Golpe de corriente, subida de voltaje	Quema de fusibles, aumento de temperatura, fugas por exceso de presión
Voltaje hasta el 110% de la norma	Ligeramente sobre lo normal	Ligeramente sobre lo normal	Ligeramente sobre lo normal	Riego ejecutado en hora valle. Sin conexiones cercanas importantes	Mayor entrega de caudal (emisores no autocompensados). Leve aumento de consumo eléctrico. No causa daño en la bomba
Voltaje hasta el 90% de la norma	Sobre lo normal	Normal	Normal	Riego en horario punta.	Mayor consumo de energía eléctrica
Bajo voltaje. Voltaje Bajo el 90% de la norma	Excesivamente sobre lo normal	Bajo lo normal	Bajo lo normal	Caída importante de voltaje. Red eléctrica saturada	Entrega de caudal considerablemente menor, sobrecalentamiento del motor. Posible falla de motor
Voltaje normal. Dentro del rango normal permisible +/-7,5%	Sobre lo normal	Bajo lo normal	Bajo lo normal	Fuga en red de distribución y/o más de un sector de riego abierto	Sobre consumo de energía, baja eficiencia en la entrega de agua
	Bajo lo normal	Bajo normal	Bajo lo normal	Tubería de succión obstruida	Entrada de aire al sistema, posible cavitación
	Bajo lo normal	Sobre lo normal	Bajo lo normal	Filtros obstruidos, Problemas en válvulas de retrolavado	Menor entrega de caudal
	Bajo lo normal	Sobre lo normal	Sobre lo normal	Válvula cerrada. Solenoide en mal estado	Nula entrega de agua al sector de riego. Posible rotura de red de distribución por exceso de presión

La clasificación “sobre” o “bajo” lo normal indicada en el cuadro es en relación a los valores de normal funcionamiento del equipo, que a su vez están definidos por el diseño del sistema, la marca y modelo de sus componentes. Estos valores deben ser informados al propietario para diagnosticar el correcto funcionamiento del sistema.

Cebado de la bomba y problemas de cavitación

Para que la bomba funcione correctamente y extienda su durabilidad debe ser “cebada”, esto quiere decir que el cuerpo o carcasa de la bomba debe estar completamente llena de agua al momento de iniciar el riego. El cebado de la bomba asegura que todo el aire sea eliminado por completo del sistema de impulsión. Esto es especialmente importante debido a que el aire bajo presión dentro de la bomba puede provocar graves problemas, aumentando su temperatura, deteriorando sus componentes, disminuyendo su vida útil y la eficiencia del equipo. El cebado de la bomba debe realizarse todos los días de funcionamiento si es necesario. Para evitar realizar esta operación es recomendable instalar una válvula “de pie” donde comienza la tubería de succión. Una vez terminado el riego, la válvula de pie impide que se pierda la columna de agua en la tubería de succión y la bomba pueda funcionar en cualquier momento sin la necesidad de cebarla manualmente.

La cavitación es un proceso que se presenta cuando la presión absoluta en el impulsor se reduce a un valor igual o menor a la presión de vapor del líquido. Cuando esto sucede, se forman burbujas de vapor y de aire que se desprenden y acumulan en el impulsor, las cuales viajan a zonas de mayor presión e implosionan produciendo daño en el metal de la superficie de la bomba. La entrada de burbujas de aire disueltas en el líquido, ya sea por un mal diseño de la succión o por otros motivos, produce efectos similares a los que la cavitación produce en el impulsor. La cavitación se identifica fácilmente ya que la bomba emite un sonido áspero o de “golpeteo”, debido a la implosión de las burbujas de aire y vapor de agua. Para prevenir este problema se recomienda que la tubería de succión sea lo más corta posible, no debiendo superar los 6 metros de largo, y tener una leve inclinación descendiente hacia la fuente de agua; esto ayudará a que si existen burbujas de aire estas se acumulen en la parte superior del codo de esta tubería y no lleguen a la bomba.

Contar con un sistema de cebado manual también es un método práctico para evitar daños en la bomba. Para cebar manualmente la bomba, se debe cerrar la válvula de compuerta que descarga el agua del sistema y verter agua directamente en la parte superior de la carcasa de la bomba hasta que se derrame. Otros métodos de cebado consisten en la instalación de una válvula de alivio y un eyector situados en la parte superior de la bomba. El vapor y el aire son transportados a través del eyector, esto reduce la presión de la parte superior de la bomba y hace subir el fluido para que salga a través de la válvula de alivio. Hoy en el mercado existen bombas que cuentan con sistemas de cebado automático.

Para identificar posibles fallas debido a un descebado o cavitación de la bomba se recomienda ejecutar a diario las siguientes actividades:

- **Revisión de ruidos extraños.** Las bombas producen un ruido característico cuando trabajan en condiciones óptimas. Este ruido debe ser uniforme en el tiempo y libre de “golpeteos”. En el caso de ruidos extraños se debe detener el equipo y revisar el nivel de agua en la tubería de succión y revisar el canastillo de la válvula de pie, ya que este puede estar obstruido con basura o sedimento. Finalmente, cebar la bomba manualmente y volver a encender el sistema.
- **Tocar la carcasa de la bomba para sentir su temperatura.** Al tocar la carcasa de la bomba con la mano, la sensación de calor debe ser “tibio”, similar a la del agua

que está circulando. Cuando la sensación de calor al tacto es muy alta y “quema”, el sistema no está funcionando correctamente. Las causas pueden ser: (i) fricción, porque la bomba está seca; (ii) compresión, debido a que el aire o vapor de agua son comprimidos, esto aumenta la presión, entonces la temperatura del vapor del agua aumenta y (iii) cavitación, que es la implosión de las moléculas de vapor o aire que se nuclean en la parte exterior de los álabes (mayor presión) lo que genera los ruidos que suenan a “pequeños disparos”. Se debe revisar el tubo de succión y la válvula de pie, podrían estar obstruidas. Revisar el nivel freático del pozo o noria ya que el agua puede estar en el límite de la tubería de succión.

- **Alineación y vibraciones.** La “fórmula de alineación estricta” es a menudo ignorada. La desalineación de la bomba y del impulsor causa vibraciones y un desgaste excesivo de los cojinetes o elementos de amortiguación. Esto provoca un esfuerzo innecesario sobre el eje y, por lo tanto, problemas de rendimiento y durabilidad. Es recomendable que, al momento de la instalación de la bomba, se acople un nivel de burbuja fijo, para que luego de las mantenciones o reparaciones de la bomba se vuelva a instalar correctamente alineada. Las bombas deben ser alineadas de acuerdo con las especificaciones del fabricante, por lo que cualquier movimiento no es recomendado.

Mantenimiento y limpieza de la red de distribución

Para que un automóvil funcione eficientemente y no gaste más combustible del presupuestado, se necesita mantener los neumáticos con la presión adecuada, al igual que los niveles de agua y aceite. Un sistema de riego funciona de la misma manera, la única forma de que el equipo conserve su máxima eficiencia es realizar mantenciones periódicas, tanto a nivel de cabezal de riego (ver control y diagnóstico del cabezal de riego), como a nivel de tuberías y emisores. Así se pueden evitar problemas, como, por ejemplo, que disminuya la entrega de agua al cultivo o prevenir reparaciones mayores, como el reemplazo de piezas o componentes de mayor costo. La ejecución de un programa de mantención disminuirá la probabilidad que esto ocurra y extenderá la vida útil del equipo.

Un sistema de riego tecnificado conduce siempre el mismo caudal a una presión de operación determinada, con el objetivo de que los emisores entreguen uniformemente el agua en cada sector de riego. Como primer indicador del grado de mantenimiento del equipo se deben comparar los caudales y presiones registradas por los caudalímetros y los manómetros instalados en el cabezal, con el cuadro de caudales y presiones nominales de los diferentes sectores (ver dispositivos de diagnóstico de funcionamiento); esta información debe ser entregada por la empresa instaladora. Si existen diferencias, se está frente a un problema en el sistema. Otro indicador del grado de mantenimiento es el registro de la uniformidad de distribución (CU); si el CU disminuye, entre una evaluación y otra, significa que el sistema ha perdido uniformidad de riego y existe un problema en el equipo.

Uno de los principales problemas de los sistemas de riego tecnificado es la obturación de emisores. Este problema afecta la cantidad de agua que se entrega a las plantas, disminuye la uniformidad del riego, aumenta el gasto de energía y puede disminuir los rendimientos y la calidad de la producción. Por lo general, se trata de obturaciones físicas, principalmente precipitados de carbonato de calcio y sedimentación de partículas muy finas que logran atravesar por los filtros. Por esto, es muy importante conocer la calidad del agua de riego, la cantidad de sólidos en suspensión, la cantidad de calcio presente y contar con una adecuada selección de los elementos de filtrado. Sin embargo, a pesar de contar con todo lo anterior, es casi imposible evitar que se depositen partículas en los emisores, por lo que se deben realizar lavados periódicos de la red de tuberías.

Lavado de la red de riego

Las partículas finas que logran atravesar por los filtros tienden a depositarse y tapar los emisores. Mientras la velocidad del agua en las tuberías sea la adecuada y exista turbulencia (1,2 a 1,5 m/s), estas partículas permanecerán suspendidas. De modo contrario, si la presión es baja y la velocidad del agua es lenta (menos de 1 m/s), estas partículas sedimentarán, agrupándose y formando agregados de mayor tamaño, provocando la obturación de los emisores. Por esto es recomendable realizar evaluaciones de turbiedad y sedimentos presentes en la red de tuberías y con esta información programar lavados periódicos al sistema de riego (Ferreya y Sellés, 2013).

Lavado bajo presión. Se deben programar lavados de alta presión (de 2 a 3 bares) a las tuberías principales (matriz, auxiliares y submatrices). Para esto se utiliza la misma capacidad de la bomba manteniendo cerradas las válvulas de todos los sectores de riego. Se debe comenzar por el cabezal (filtros) y luego la matriz, abriendo la válvula de bola instalada en su extremo. Una vez limpia la matriz, se procede con las auxiliares y luego las submatrices. Finalmente, se abren las laterales (descole) en grupos de 4 para mantener una presión adecuada, dejando fluir el agua durante unos minutos. Al terminar la limpieza de cada tubería, se debe abrir parcialmente la válvula de la siguiente, antes de cerrar completamente la válvula de la tubería que se está limpiando, para evitar sobrepresión en el sistema. Esta operación es recomendable realizarla al menos una vez al mes.

“Descole”, evaluación de turbiedad y sedimentos. Generalmente, en la parte final de las laterales es donde se depositará la mayor cantidad de sedimentos, por lo que es recomendable descolar periódicamente; esto significa abrir el final de las líneas de riego para liberar estos sedimentos. Diversos expertos recomiendan realizar esta operación cada dos semanas o una vez al mes. Sin embargo, en la práctica, se vuelve tedioso y costoso, ya que se necesita mano de obra que ejecute esta labor.

El descole es recomendable realizarlo, estrictamente, al menos 4 veces en la temporada de riego; simultáneamente se debe evaluar la turbiedad y la carga de sedimentos que sale por las laterales. Para esto se recomienda seleccionar una muestra representativa de líneas de riego de cada sector (mínimo 4) y recolectar el primer chorro de agua que sale al momento del descole en un recipiente graduado transparente. Luego, clasificar el agua colectada en alto, medio o bajo nivel de turbiedad; esperar hasta que decanten los sedimentos y clasificar la muestra de la misma manera. Además, si el recipiente graduado lo permite, medir los

mililitros (ml) que se depositan en el fondo del recipiente. Esto permitirá llevar un registro de la turbiedad y sedimentos en el agua y servirá como indicador para programar los descoles durante la época de riego; saber si es necesario aumentar la frecuencia de éstos o si se está frente a un problema de filtrado. Esta evaluación es especialmente importante cuando se utilizan fuentes de agua superficiales (canal, acequia o quebradas), que, por lo general, vienen con una carga importante de partículas finas en suspensión; en algunos casos es necesario la implementación de decantadores para la solución de este problema.

Presencia de algas y bacterias

No sólo las partículas finas, como el arcilla y el limo, tienden a obturar los emisores, otra causa es la descomposición de algas y bacterias dentro del sistema. A menudo se presenta como una masa mucilaginosa, similar a una gelatina. Se debe poner especial atención a este síntoma al realizar los descoles o lavados de las tuberías principales. Al confirmar su presencia se deben realizar aplicaciones correctivas de hipoclorito de sodio (NaClO) a la red de riego. Este producto reacciona con el agua formando ácido hipocloroso (HClO) el cual la tiene acción bactericida.

Si se inyectan ácidos húmicos o fúlvicos por el sistema de riego, también se debe poner atención a la obturación de emisores. Al igual que las algas y bacterias, los ácidos húmicos y fúlvicos son sustancias orgánicas que tienden a aglutinarse, sobre todo al final de las laterales. En este caso, el síntoma se presenta como una masa semisólida oscura que sale como tapón al momento del descole, se deposita en los emisores y también en el sistema de inyección (Figura 10). Para solucionar este problema, se deben realizar lavados bajo presión con HClO .



Figura 10. Acumulación de residuos por uso de ácidos húmicos. A la izquierda, residuos en sistema de inyección de fertilizantes; a la derecha, acumulación de residuos en emisores.

Se debe tener claro que el problema de algas y bacterias se origina en la fuente de agua y es de suma importancia prevenirlo a este nivel. Es común que esto ocurra en tranques y acumuladores (Figura 11). Las aguas en reposo desarrollan colonias de algas y bacterias con facilidad, debido a los nutrientes disueltos, la radiación solar y la presencia de material vegetal y animal (Martínez, 2001). Para evitarlo, se recomienda cubrir el tranque con una malla raschel; esto disminuirá la cantidad de radiación que llega a la superficie del tranque y, con esto, la proliferación de algas y bacterias será considerablemente menor. Además, la cantidad de agua que se pierde por evaporación desde la superficie del tranque también disminuirá.



Figura 11. Presencia de algas y bacterias en acumuladores de agua de riego.

Se pueden realizar aplicaciones correctivas de sulfato de cobre al agua, en dosis de 0,5 a 2 mg/L. Si la cantidad de algas sobrepasa los niveles normales, se recomienda aplicar en dosis de 30 mg/L al 25% del volumen del tranque, dejar reposar por 12 horas y luego rellenar el tranque en su totalidad, para diluir el sulfato y poder aplicarlo a la red de riego (Ferreyra y Sellés, 2013).

Acidificación del agua

Cuando se confirma la presencia de descomposición de algas y bacterias en la red de tuberías, se deben hacer aplicaciones correctivas de hipoclorito de sodio (NaClO). Para aumentar la efectividad de esta aplicación, es recomendable que el pH del agua sea inferior a 6,5. Con esto se garantiza que el 90% del NaClO se encuentre disponible para el control de algas y bacterias. Para disminuir el pH del agua se debe aplicar algún tipo de ácido al sistema, los más utilizados son el ácido sulfúrico, ácido fosfórico y ácido nítrico, que comúnmente se encuentran en concentraciones de 65%, 85% y 60%, respectivamente. Sin

embargo, las cantidades a utilizar dependen del tipo de agua, tipo de producto, marca y concentración. Con el objetivo de calcular el pH exacto requerido se recomienda realizar una prueba de titulación con el agua de riego y el ácido que se utilizará.

Precauciones del uso de ácidos. Los ácidos son tóxicos y peligrosos para la salud de los seres humanos. Antes de utilizar cualquier ácido, se deben leer todas las instrucciones de la etiqueta, utilizar traje, guantes, antiparras, máscara y calzado alto y cerrado. Siempre se debe agregar el ácido al agua, nunca el agua al ácido. Nunca mezclar ácidos, o ácidos con fertilizantes, ya que estos podrían provocar reacciones químicas y liberar vapores altamente tóxicos. Durante el proceso de dosificación e inyección deberá estar presente un segundo operario para brindar primeros auxilios si fuese necesario.

Prueba de titulación. Esta prueba ayudará al operario a conocer como varía el pH del agua de riego con el uso de diferentes ácidos. Esto contribuye a mejorar las técnicas de limpieza del sistema y a controlar el pH del agua para mejorar la disponibilidad de nutrientes para el cultivo, además de prevenir la precipitación de sales de baja solubilidad al interior del sistema. Para esto se necesita un recipiente graduado de un litro, un medidor de pH o papel pH tornasolado, un litro de agua de riego y el ácido que se utilizará.

Se debe colocar un litro de agua de riego en el recipiente y registrar el pH del agua, luego agregar 1 mL del ácido, mezclar y medir el pH de la solución. Se deben repetir estos pasos y registrar el pH cada vez que se agrega 1 mL de ácido. Luego construir un cuadro con los datos y dejarlo visible en la caseta de riego. El resultado de este procedimiento le dará al operario una aproximación de cuantos mL de ácido por cada litro de agua se deberá utilizar para reducir el pH al nivel requerido, en donde 1 cm³ o mL de ácido por litro de agua es igual a 1 litro de ácido por m³ de agua de riego.

Cálculo de dosis de hipoclorito de sodio (NaClO)

El NaClO se comercializa como producto concentrado al 5% o al 10%. El objetivo es lograr que la solución de cloro permanezca en el sistema mínimo una hora con una concentración de 1 mg/L de cloro libre, para lo cual es necesario concentraciones de 3 a 10 mg/L de cloro total. No todo el NaClO que se aplica está disponible como cloro libre para reaccionar con las algas y bacterias presentes en el sistema, ya que una parte de él reacciona con los componentes metálicos y plásticos del equipo y la otra con la materia orgánica presente en el agua. Por lo tanto, se debe adicionar una cantidad extra (Martínez, 2001). La concentración de cloro libre se puede medir con un equipo de muestreo para piscinas y se debe evaluar al final de la línea de riego más lejana a la válvula. La frecuencia de este procedimiento dependerá de la cantidad de algas y bacterias evaluadas al momento del descole y la tolerancia del cultivo al cloro. Para calcular la cantidad de NaOCl se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_{NaOCl} = \frac{Q \times C}{[NaOCl] \times Xa}$$

Donde:

V_{NaClO} = volumen de hipoclorito de sodio en litros

Q = caudal del sistema de riego (L/s o m³/h)

C = constante 0,295 para el caudal en L/s, o 0,083 para el caudal en m³/h

[NaOCl] = concentración comercial del hipoclorito de sodio (fracción; 10%=0,1)

Xa = concentración de cloro deseada en el punto de inyección (3 a 10 mg/L)

Obturación por precipitados de sales de baja solubilidad

Según la calidad del agua de riego, esta puede venir cargada con sales de baja solubilidad, como los carbonato de calcio, óxidos de hierro y sales de manganeso, que tienden a precipitar y obturar los emisores. Sin embargo, la solubilidad de estas sales aumenta considerablemente a pH ácido, por lo que una forma de prevenir su acumulación es acidificar el agua de riego. Los ácidos más utilizados para esto son el sulfúrico, el fosfórico y el nítrico, debiendo realizarse la prueba de titulación con la adición del ácido a utilizar, para lograr un pH entre 2 y 3 en el emisor más alejado de la válvula del sector. Para lograr esta concentración se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$[\text{Ácido (\%)}] = \frac{AN}{Q \times T \times 16,67}$$

Donde:

[Ácido (%)] = concentración de ácido requerida para un pH bajo 3

AN = ácido necesario en litros por cada m³ de agua de riego (dato de prueba de titulación)

Q = caudal del equipo en m³/h

T = tiempo de inyección en minutos

16,67 = factor de conversión del caudal de m³/h a litros/min

Para ajustar la solución, se recomienda concentrar el ácido al 10% en el estanque, e inyectar la solución a baja presión con los emisores trabajando al caudal mínimo. Luego de 3 minutos, recolectar agua del emisor más lejano a la válvula del sector de riego y medir el pH con papel tornasolado, si el pH es mayor a 3 se debe aumentar la concentración del ácido en el estanque.

Para hacer un tratamiento correctivo (obturación de los emisores, bajo coeficiente de uniformidad), una vez alcanzado el pH deseado se detiene el riego del sector y se deja reposar el sistema con el ácido por 12 horas; luego realizar un lavado bajo presión (Ferreyra y Sellés, 2013). Si el agua de riego es de buena calidad, se recomienda realizar tratamientos preventivos una vez al mes, siguiendo el mismo procedimiento. Otra forma de prevenir este problema es inyectar la solución de ácido en la etapa final de cada riego; de esta forma, el agua tratada es la que permanece dentro del sistema entre dos riegos consecutivos.

Conclusiones y recomendaciones

En síntesis, ejecutar una rutina de inspección del sistema de riego ayudará al operario a identificar oportunamente posibles problemas en el equipo, aumentando su vida útil y asegurando la entrega eficiente de agua al cultivo. Para esto es fundamental contar con los dispositivos de diagnóstico en el cabezal de riego (amperímetro, manómetros,

caudalímetro, contadores volumétricos, horómetro) y algunos otros dispositivos, como un vaso graduado, multímetro de mano, manómetro, sacabocado, tomas manométricas, papel pH, etc. Toda esta información debe ser comparada con los valores de normal funcionamiento del sistema, información que debe ser entregada por la empresa instaladora al momento de recibir el equipo. Se recomienda fabricar un cuadro con el resumen de esta información y dejarlo a la vista en la caseta de riego. Sólo así se sabrá si el sistema está funcionando correctamente; sin estos dispositivos es como conducir un automóvil con los ojos vendados.

Además, se debe exigir a la empresa instaladora que realice la evaluación del coeficiente de uniformidad de distribución de Christiansen (CU), a todos los sectores de riego al momento de recibir el equipo.

Una vez que el sistema está en operación, permanentemente, y como síntesis, se recomienda:

- Verificar el nivel de agua del pozo o noria.
- Poner atención a ruidos extraños en la bomba, como golpeteos o fricción de metales.
- Poner atención a las vibraciones en la bomba. La bomba no debería vibrar; si vibra es un síntoma de desgaste mecánico.
- Verificar la temperatura del motor. Tocar la carcasa de la bomba al momento del riego; la sensación debe ser tibia y no caliente.
- Comparar la presión, el caudal y el amperaje de trabajo con los valores de normal funcionamiento (cuadro resumen).
- Verificar el diferencial de presión en filtros para ejecución de los retrolavados.
- En terreno, medir la presión a la salida de la válvula y en la línea de riego más lejana.
- Lavado bajo presión una vez al mes.
- Descole y evaluación de turbidez y sedimentos al menos 4 veces en la temporada.
- Evaluación del área subirrigada (CU 25%) al inicio y al final de la temporada de riego.

Referencias

BOSWELL, M. 1990. Micro-irrigation design manual. James Hardie Irrigation Co., El Cajón, CA. (6): 27-30.

CARRAZÓN, J. 2007. Manual práctico para el diseño de sistemas de miniriego. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Tegucigalpa, Honduras. 218p.

- CHRISTIANSEN J. 1942. Irrigation by sprinkling. California Agriculture Experiment Station Bulletin, No. 670.
- ESCENARIOS HÍDRICOS 2030. 2018. Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile. Fundación Chile, Santiago, Chile. 38p.
- ELWIN, A.; A. LEALAND; J. BRENNER; J. WALKER; C. GUSTAFSON; D. NELSON; J. DALTON AND J. SUIT. 1997. Irrigation guide national engineering handbook. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture (USDA). Washington, EE. UU. 754p.
- FERREYRA, R. Y G. SELLÉS. 2013. Manual de riego para especies frutales: uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez. Boletín INIA N° 278. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centros Regionales de Investigación La Platina y La Cruz. Santiago, Chile. 319p.
- FERREYRA, R. G. SELLÉS; R. AHUMADA; B. MALDONADO; P. GIL Y C. BARRERA. 2005. Manejo del riego localizado y fertirrigación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N°126. La Cruz, Chile. 56p.
- GIL, P.; G. SELLES; R. FERREYRA Y C. BARRERA. 2009. Manual de riego para paltos y cítricos. 146p. Centro Regional de Investigación La Cruz, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Cruz, Chile.
- GARREAUD, R.; J. BOISIER; R. RONDANELLI; A. MONTECINOS; H. SEPÚLVEDA AND D. VELOSO-ÁGUILA. 2020. The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol*, 40, 421–439.
- KELLER, J. AND R. BLIESNER. 1990. Sprinkler and trickle irrigation. Chapman & Hall, New York. 652p.
- LÓPEZ, J.; J. HERNÁNDEZ; A. PÉREZ Y J. GONZÁLEZ. 1992. Riego localizado. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 399p
- MALDONADO, P. 2015. Mantenimiento de equipos de riego presurizados. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Informativo INIA La Cruz 26. La Cruz, Chile. 4p.
- MALDONADO, T. 2001. Criterios de selección del método de riego. En: Manual del riego parcelario. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 222p.
- MARLOW, R.; C. PHENE; C. PRESTWICH; P. ROBINSON; J. BUSCH; M. SOFFRAN ET AL. 2013. Microirrigation. In: Owens, L. (ed.). Part 623 Irrigation national engineering handbook. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture (USDA). Washington, EE. UU. 230p.

- MARTÍNEZ, L. 2001. Manual de operación y mantención de equipos de riego presurizado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Intihuasi. Vallenar, Chile. 76p.
- MARTÍNEZ, L. Y J.M. PERALTA. 2000. Conceptos de riego localizado. Centro Regional de Investigación Carrillanca, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Temuco, Chile. 21p.
- NAKAYAMA, F. AND D. BUCKS. 1991. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. Irrigation Science. 12(4): 187-192.
- PODESTÁ, L.; J. GIRONA Y G. REGINATO. 2011. Riego. En: Ojer, M. (Ed). Producción de duraznos para la industria. U.N. de Cuyo-FCA. Federación Plan Estratégico de Durazno Industria. 229p.
- SANTIBÁÑEZ, F. Y J. URIBE. 1993. Atlas agroclimático de Chile: regiones sexta, séptima, octava y novena. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Laboratorio de Agro climatología, Departamento de Ingeniería en Suelos. 65p.
- SANTOS, L.; J. VALERO; M. PICORNELL Y J. TARJUELO. 2010. El riego y sus tecnologías. Centro Regional de Estudios del Agua de la Universidad de Castilla. Albacete. España. 296p.

CAPÍTULO 4. BASES PARA EL CÁLCULO DE NECESIDADES DE RIEGO, USO E INTERPRETACIÓN DE ELEMENTOS TECNOLÓGICOS PARA LA GESTIÓN DEL RIEGO EN PALTOS Y CÍTRICOS

*Brian Baeza S., Víctor Beyá-Marshall, Chris Bustamante A.,
Rodrigo Callejas R. y Cristián Kremer F.*

Necesidades de agua de riego

Para que un cultivo desarrolle su máximo potencial productivo requiere de agua. Este recurso constituye más del 80% de los tejidos vegetales y cumple importantes funciones fisiológicas en las plantas, dentro de los cuales se destaca la fotosíntesis y la transpiración (Taiz y Zeiger, 2007). La transpiración es un gran demandante de agua; permite a las plantas regular su temperatura, absorbiendo agua desde el suelo para luego evaporarla desde las hojas. Esto ocurre específicamente en los estomas, pequeños poros en donde el agua pasa del estado líquido al gaseoso, liberándose a la atmósfera. Esta agua, antes de llegar a las hojas, es extraída por las raíces, desde el suelo, y movilizada en la planta, hasta llegar a los sitios de evaporación. Cerca del 90% del agua absorbida por las plantas es transpirada en forma de vapor y sólo una pequeña proporción forma parte de nuevos tejidos, como frutos, hojas, raíces y tallos (Azcón-Bieto y Talón, 2000; Allen et al., 2006.).

La transpiración más la evaporación del agua desde la superficie del suelo componen la evapotranspiración (ET), siendo uno de los principales componentes del consumo de agua de los sistemas vegetales, por lo que su cuantificación es vital a la hora de estimar las necesidades de agua de un cultivo (Allen et al., 2006). El agua requerida para compensar la pérdida por ET se define como las necesidades de agua (NA), la que debe ser suministrada a través del riego o las precipitaciones.

Para el cálculo de la NA se utiliza la siguiente fórmula:

$$NA (mm) = \frac{ETc - pp}{Efa}$$

Donde:

NA = Necesidades de agua de riego o Necesidades brutas de agua (mm).

ETc = Evapotranspiración del cultivo (mm).

pp = Precipitación efectiva (mm).

Efa = Eficiencia de aplicación del agua.

La evapotranspiración del cultivo (ETc) depende de:

- **Las condiciones climáticas:** temperatura y humedad del aire, radiación solar y viento. Es decir, la evapotranspiración de referencia (ET0).

- **El tipo de cultivo:** especie, variedad, grado de cubrimiento, área foliar, estructura y calidad de las raíces. Es decir, el coeficiente de cultivo (K_c).

Sin embargo, la evapotranspiración del cultivo estará limitada por la:

Disponibilidad de agua en el suelo: retención de agua, estructura, textura, velocidad de infiltración, porcentaje de materia orgánica, entre otros. Es decir, la capacidad del suelo de aportar oportunamente la necesidad de agua del cultivo.

Así, el rendimiento y la calidad de la fruta estarán directamente relacionados con este último factor, de tal manera que, para tener éxito, resulta fundamental estudiar el comportamiento del suelo (Sellés et al., 2003). Esta información ayudará al agricultor a tener la base para la programación de los riegos y manejar un nivel de humedad, respetando la relación entre el agua y el aire en el suelo, para no limitar el desarrollo de las raíces (Ferreyra et al., 2001), sobre todo en especies especialmente sensibles a la falta de oxígeno en el suelo, como lo es el palto.

Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

Este concepto ha sido ampliamente utilizado para aproximarse a la demanda de agua de un cultivo en una zona en particular, y se refiere a la evapotranspiración cuando este se encuentra sin limitantes, es decir, libre de plagas y enfermedades, buena fertilización, con óptimas condiciones de suelo, agua y temperatura (Allen et al., 2006).

Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$ET_c (mm) = ET_0 \times K_c$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo (mm/día).

ET_0 = Evapotranspiración de referencia (mm/día).

K_c = coeficiente de cultivo (adimensional).

Evapotranspiración de referencia (ET_0)

Se refiere a evapotranspiración de un cultivo hipotético con cobertura total, en este caso, una pradera de pasto bien regada y sin restricciones de agua, por lo que los únicos factores que afectan la ET_0 son climáticos, y por lo tanto se calcula con datos meteorológicos (Allen et al., 2006). Este concepto indica la demanda de agua que ejerce la atmósfera, independiente del cultivo y el tipo de suelo, y permite comparar valores medidos de diferentes localidades o épocas del año.

Para obtener los datos de ET_0 existen dos métodos:

- a) Medición en bandeja de evaporación (Figura 1A).

b) Estimación a partir de datos de estaciones meteorológicas (Figura 1B).



Figura 1. Instrumentos para estimar la ET_0 (mm/día) por diferentes métodos. (A) bandeja de evaporación tipo “A”, y (B) estación meteorológica.

La bandeja de evaporación requiere de constante mantención y la toma de datos debe ser siempre a la misma hora, lo cual obliga a tener a una persona a cargo de esta labor. Por otro lado, la descarga de datos meteorológicos permite obtener un registro instantáneo (en tiempo real); permite manejar una gran cantidad de datos en poco tiempo, aunque siempre es recomendable obtener los datos de la estación más cercana al cultivo.

Existen diferentes sitios en internet en donde se puede acceder a información climática (ET_0), entre los cuales se destacan: <http://www.agroclima.cl>, <http://www.agromet.cl> y <https://agrometeorologia.cl>. En estos sitios web se puede encontrar información de más de 250 estaciones a lo largo del país; no requieren de capacitación previa y no se necesitan claves de acceso. Sólo se debe ingresar al sitio, seleccionar la estación meteorológica de interés y el dato que se requiere (en este caso ET_0); luego seleccionar el rango de fechas y el intervalo (diario, mensual, anual); finalmente, se debe dar *click* en descargar datos y guardar el archivo (figuras 2 y 3; paso a paso para el ejemplo del cálculo de necesidades de riego). A modo de ejemplo de la información disponible, en la estación Jean Buchanan de la comuna de Peumo, Región del Libertador Bernardo O’Higgins, Chile, la ET_0 entre julio de año 2018 y julio de 2019 fue de 1.051 mm/año (equivalente a un volumen de agua de 10.510 m³/ha al año). El mes con mayor ET_0 fue diciembre (2018), con 169,7 mm/mes.

Coefficiente de cultivo (K_c)

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) difiere de la de referencia (ET_0) pues considera las características del cultivo propiamente tal, diferente de la cobertura del pasto estándar. El K_c incorpora estas diferencias como un coeficiente único que permite ajustar la ET_0 al cultivo de interés.

El Kc se ve influenciado por los siguientes factores, principalmente asociados al cultivo:

- **Altura del cultivo.** Influencia la resistencia aerodinámica de la planta.
- **Reflectancia del cultivo y el suelo.** Este factor influye en la radiación neta de la superficie, y depende directamente de la proporción de suelo cubierto por la vegetación y la del suelo desnudo.
- **Resistencia del cultivo a la transferencia de vapor de agua hacia la atmósfera.** Factor directamente relacionado con la edad del cultivo, etapa fenológica, la cantidad de hojas y el grado de regulación de sus estomas.
- **Evaporación de agua desde la superficie de suelo expuesto.**

El Kc varía según el cultivo, y la etapa de crecimiento de este; a medida que la planta crece, el valor de Kc aumenta de acuerdo a la altura del cultivo y el grado de cubrimiento del suelo. Así, este coeficiente varía a lo largo del ciclo vegetativo, puesto que se modifica la superficie foliar y la superficie del suelo sombreada. De modo que, según Castel (2001) en cítricos, puede presentar un mínimo en primavera por la poda (noviembre) y un máximo en otoño (abril) por el desarrollo acumulativo de las brotaciones de primavera, verano y otoño, por ello se precisa corregir los datos de Kc. En el Cuadro 1 se presentan los valores para cítricos adultos con cobertura mayor al 70%. Para frutales de hoja perenne, en condiciones estándar para paltos y cítricos, la literatura reporta valores de Kc entre 0,7 y 0,75 (Allen et al., 1998; Castel et al., 1985; Castel et al., 1987; Castel, J. 2001; Gardiazabal et al., 2003; Meyer et al., 1990; Oster y Arpaia, 2007).

Cuadro 1. Coeficiente de cultivo (Kc) para paltos y cítricos adultos.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Palto	0,75	0,75	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,75	0,75
Cítricos	0,68	0,79	0,74	0,84	0,73	0,63	0,66	0,65	0,66	0,62	0,55	0,62

Cítricos: Castel, 2001; Paltos: Gardiazabal, 2003.

Castel (2000; 2001) propone un ajuste en el Kc de cítricos según el porcentaje del área sombreada (PAs) por las plantas (Cuadro 2); en caso de que el PAs sea mayor a 70% se considera el Kc indicado en el Cuadro 1. El método asume que la proyección del árbol en el suelo es un círculo dentro de un cuadrado o rectángulo. Así, para calcular el porcentaje del área sombreada (PAs) se utiliza la siguiente fórmula:

$$PAs = \frac{100 \times 3,1416 \times (\text{diámetro de la copa})^2}{4 \times (\text{distancia entre hileras}) \times (\text{distancia sobre hilera})}$$

Cuadro 2. Ajuste de Kc ($K_{c\text{ medio}}$) según el porcentaje de área sombreada (Pas). Castel (2001).

Porcentaje de área sombreada (PAs)	Cítricos
20% > Pas	$K_{c\text{ medio}} = 0,021 + PAs * 0,0174$
20% < PAs < 70%	$K_{c\text{ medio}} = 0,274 + PAs * 0,005$
70% < Pas	$K_{c\text{ medio}} = Kc70$

Luego, para corregir los datos $K_{c\text{ medio}}$ según el desarrollo vegetativo de la temporada se puede utilizar los factores del Cuadro 3, a través de la siguiente fórmula

$$K_{c\text{ mensual}} = F\text{ mensual (Cuadro 3)} \times K_{c\text{ medio}}$$

Cuadro 3. Factores mensuales (F mensual) para la corrección del Kc medio. Castel (2001).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
F mensual	1,0	1,16	1,09	1,24	1,07	0,93	0,97	0,96	0,97	0,91	0,81	0,91

Si bien la ET_c ha sido ampliamente utilizada para el cálculo de las necesidades de agua (NA), en la actualidad, el desafío es obtener un método automatizado que ajuste el valor de Kc a las condiciones de manejo, localidad y fenología del cultivo. En este sentido, para este proyecto se determinó el Kc potencial de paltos y cítricos, mediante el método dual de FAO ($K_c = K_{cb} + K_e$). Este modelo, a diferencia de los Kc mencionados anteriormente, no solo contempla la cobertura del huerto sino las condiciones locales de clima y características del huerto (velocidad del viento, humedad relativa, marco de plantación y altura de los árboles). El K_{cb} representa el componente de la transpiración en la ET_c y, además, incluye la evaporación residual producida por el agua del suelo (debajo de la superficie); el K_e representa al componente de la evaporación del suelo descubierto superficial (Allen et al., 2006). Los valores del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) son específicos para cada especie en su respectiva etapa fenológica; no obstante, se realizó un ajuste al K_{cb} , estimando el coeficiente de cultivo basal ajustado (K_{cbaj}) (Allen et al., 2006). Para esto, es necesario conocer el valor del Índice de Área Foliar (IAF) en cada copa, los cuales fueron obtenidos mediante el uso de imágenes satelitales. De esta manera, los Kc calculados y propuestos para estas especies se ajustaron a las condiciones locales de la zona de estudio (Cuadro 4).

Cuadro 4. Coeficiente de cultivo potencial (Kc) calculados y propuestos para paltos y cítricos adultos para la zona de Peumo.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Palto	0,81	0,83	0,82	0,80	0,77	0,78	0,75	0,75	0,77	0,74	0,82	0,82
Limonero	0,66	0,66	0,66	0,66	0,64	0,64	0,64	0,64	0,65	0,66	0,66	0,66
Naranja	0,66	0,66	0,66	0,66	0,64	0,63	0,63	0,63	0,66	0,66	0,66	0,66
Mandarino	0,64	0,64	0,64	0,64	0,62	0,62	0,62	0,62	0,63	0,64	0,64	0,64

Paltos: Riveros, L, 2020. Cítricos: Pizarro y Galleguillos (datos no publicados).

Ejemplo de cálculo de las necesidades de agua de riego (NA)

Un agricultor de la localidad de Peumo, Región de O'Higgins, necesita calcular las necesidades de riego en una hectárea de paltos para la temporada. Las plantas se encuentran a una distancia de 6 m x 4 m y cuenta con un sistema de riego por goteo con emisores de 2 L/h distanciados a 50 cm, con dos líneas por cada hilera ($E_{fa} = 0,9$). Para el ejemplo se utiliza un coeficiente de cultivo (K_c) 0,75.

La necesidad de agua está definida por:

$$NA (mm) = \frac{ET_c - pp}{E_{fa}}$$

Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c). De acuerdo a la expresión:

$$ET_c (mm) = ET_0 \times K_c$$

Se requiere conocer la evapotranspiración de referencia (ET_0). Para obtenerla se debe ingresar a <https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/#> y seleccionar la estación meteorológica más cercana al predio; en este caso la estación "Liceo Jean Buchanan". Finalmente, seleccionar el intervalo de tiempo (horario, diario o mensual) y las fechas, que para la temporada de riego se considerará desde inicios de septiembre hasta fines de mayo (Figura 2).



Figura 2. Visualización del sitio web de Agrometeorología. Se seleccionó la estación meteorológica de interés, la variable, el intervalo y el rango de fechas.

Al seleccionar la “Opción de vista” de los datos solicitados, se obtienen en una tabla, gráfico o planilla Excel. Para gestionar los datos adecuadamente se recomienda visualizar en una planilla Excel y en un gráfico (Figura 2).

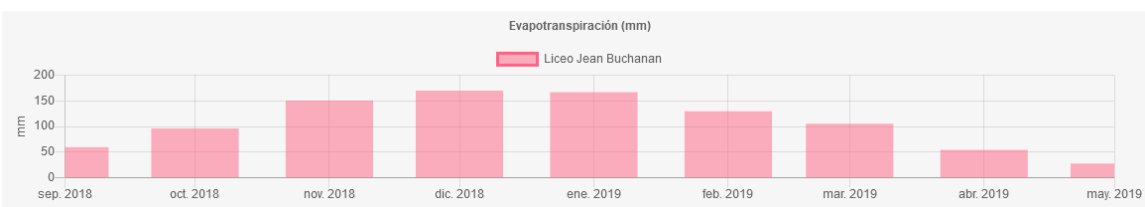


Figura 3. Visualización de datos de la ET₀ para la temporada de riego 2018-2019 de la estación meteorológica Liceo Jean Buchanan, localidad de Peumo, Región de O’Higgins.

Al sumar los datos entregados por la planilla Excel se obtiene el total de milímetros de ET₀ para la temporada de riego; 959,1 mm, equivalente a 9.591 m³/ha. Entonces la ET_c será:

$$ET_c (mm) = 959,1 \times 0,75$$

$$ET_c (mm) = 719,33$$

Luego se repite el procedimiento para obtener la precipitación acumulada (pp)

$$pp (mm) = 116,8$$

Aplicando la fórmula de necesidades de agua de riego, considerando una eficiencia de aplicación de agua de 90%, debido al sistema de riego por goteo ($E_{fa}=0,9$), ésta será:

$$NA (mm) = \frac{719,33 - 116,8}{0,9}$$

$$NA (mm) = 669,47$$

En conclusión, el agricultor de Peumo necesitará 616,19 mm o 6.161,9 m³/ha en la temporada para suplir la demanda hídrica del huerto de paltos.

Este ha sido el método tradicional para calcular la cantidad de agua que demanda un cultivo en una zona en particular; sin embargo, estos cálculos asumen varios factores que se deben tomar en consideración: primero, que el 100% de la precipitación queda retenida en el suelo como agua aprovechable, lo cual no necesariamente es así, dado que una lluvia copiosa podría percolar gran parte del agua aportada a capas profundas, no quedando disponible para las plantas; segundo, no considera la carga frutal, la cual, en el caso del palto, se estima que puede incrementar entre un 30 a 40% la demanda con alta carga, en relación a uno con poca fruta (Silber et al., 2019). De esta manera, para disponer de una mirada más precisa, el uso de tecnologías de gestión del riego, como las sondas de capacitancia y/o la cámara de presión tipo Scholander, toman relevancia para ajustar de mejor manera la cantidad de agua a aportar con el riego.

Conociendo las necesidades de agua del cultivo, las preguntas siguientes a responder son: ¿cuál es el tiempo y la frecuencia de riego óptima?, ¿cómo distribuyo esa agua?, ¿debo regar todos los días?, ¿riego día por medio? o ¿una vez por semana? Para responder a este desafío, es necesario conocer la capacidad de retención de agua del suelo, aspecto que depende principalmente de su velocidad de infiltración, textura y estructura (Capítulo 1)

Programación del riego

El riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil de suelo, para reponer en este el agua evaporada desde la superficie y la consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos (Gurovich, 2001). El concepto de “Programación del riego” consiste en la utilización de una o varias metodologías que permiten definir cuándo y cuánto regar, con el objetivo de alcanzar la máxima eficiencia del uso del agua sin afectar el rendimiento (Callejas et al., 2014). Según Ferreyra y Sellés (2013), la programación del riego se divide en dos etapas, una predictiva y una de control.

Etapas predictiva

La etapa predictiva de la programación tiene por objetivo definir *a priori* las necesidades de agua de riego (NA), y el tiempo y la frecuencia de riego, que permitan un adecuado desarrollo del cultivo. Para ejecutar correctamente la etapa predictiva se deben considerar:

- La evapotranspiración de referencia (ET_0), determinada por las condiciones climáticas.
- Las características del cultivo; (tamaño, especie, variedad, desarrollo fenológico, carga frutal y distribución de raíces, entre otros (K_c)).
- Las características de suelo; su textura y capacidad de retención de agua, la profundidad y aireación y.
- Las características del sistema de riego; tipo de equipo (goteo o microaspersión) precipitación (I_{pp}), caudal (L/h), coeficiente de uniformidad (CU).

Disponibilidad del agua en el suelo. La disponibilidad de agua en el suelo, generalmente, se fija sobre los criterios de humedad aprovechable o agua disponible (HA), la que integra las características de aireación, de retención de agua y de resistencia mecánica del suelo. El límite superior de la HA se asocia a la “capacidad de campo” (CC), que se define como la cantidad de agua retenida por un suelo luego de drenar los excedentes, esto, en la práctica, se obtiene luego de dos a tres días después de una lluvia o un riego abundante y su valor es característico para cada tipo de suelo. El límite inferior de la HA se asocia al “punto de marchitez permanente” (PMP), que, en palabras simples, es el contenido de humedad en el suelo en el cual la planta no puede recuperar su turgor y, por ende, se marchita y muere. El agua disponible o aprovechable (HA) corresponde a la contenida en el rango de humedad comprendido entre CC y el PMP (Ferreira y Sellés, 2013). Sin embargo, a medida que se agota la HA la disponibilidad de agua es cada vez menor, y de más difícil extracción para las plantas, llegando a su nivel mínimo cuando éstas no son capaces de suplir la demanda atmosférica (Cohen, 1994). Esto provoca un estrés hídrico moderado, por lo cual es necesario reponer el riego cuando una fracción de la HA se ha agotado, de manera que no perjudique al cultivo; a este contenido de agua en el suelo se le denomina umbral de riego (UR), y varía según el tipo de cultivo y suelo (Figura 4).

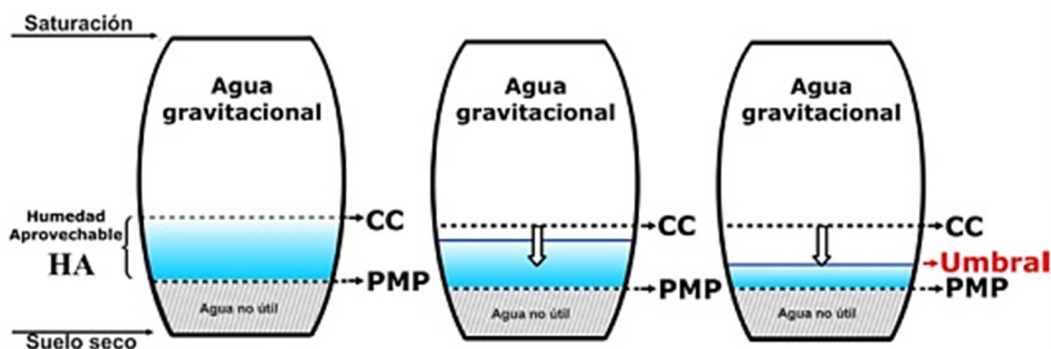


Figura 4. Agua contenida en el suelo en referencia a un recipiente. CC= capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, HA= humedad aprovechable o agua aprovechable, UR= umbral de riego. Fuente: Balbontín e Ibacache, 2014

El contenido de agua gravimétrico en el suelo se expresa como la fracción entre la masa de agua contenida por este y su masa seca. Este contenido se puede estimar determinando la masa de una muestra de suelo húmeda (M_w), y luego de secar la muestra en una estufa de secado a 105°C , para obtener la masa del suelo seco (M_s), la diferencia entre M_w y M_s representa la masa de agua que tenía el suelo. El contenido de agua gravimétrico θ_m ; g /g), en términos de su masa, se expresa como:

$$\theta_m = \frac{(M_w - M_s)}{M_s}$$

Donde:

θ_m = Contenido gravimétrico de agua

M_w = Masa de suelo húmedo (g)

M_s = Masa de suelo seco (g)

También, el contenido de agua en el suelo puede ser expresado en base a su volumen (θ_v ; m^3/m^3), que representa la fracción del volumen total del suelo que es ocupado por agua. Para estimarla se necesita conocer la densidad aparente del suelo (d_a ; Mg/m^3). Entonces:

$$\theta_v = d_a \times \theta_m$$

Donde:

θ_v = contenido volumétrico de agua (m^3/m^3)

d_a = densidad aparente del suelo (mg/m^3)

θ_m = contenido gravimétrico de agua (mg/mg)

El contenido volumétrico de agua es un parámetro práctico para fines de riego, ya que su valor, al ser expresado en términos de porcentaje, equivale a la altura de agua en centímetros (cm) en un metro de perfil de suelo (Callejas et al., 2014).

Etapas de control

Numerosas investigaciones (Fares y Alva, 2000; Mounzer et al., 2008; Ferreyra et al., 2006; Ferreyra y Sellés, 2013, Callejas et al., 2014) reportan que el seguimiento continuo del estado hídrico del suelo con tecnologías de precisión, como las sondas de capacitancia FDR, es una herramienta que presenta gran potencial para la programación de riego, ya que permite evaluar el agotamiento de la humedad del suelo, la extracción aparente de agua por parte de las raíces y el movimiento del agua en el perfil en tiempo real.

Tecnologías para la optimización del riego

El control del riego se basa, principalmente, en el seguimiento constante de la humedad del suelo. Esto es posible con tecnologías que cuantifican el contenido volumétrico de agua. Entre estos equipos destacan los de medición discontinua o discreta, como la sonda de capacitancia FDR Diviner 2000® (Figura 11) y el equipo TDR 100® (Figura 5), y los de medición continua, como las sondas de capacitancia FDR Enviroscan® y Drill & Drop® (Figura 16). Estos sensores determinan, indirectamente, el contenido de agua del suelo

mediante la medición de su propiedad dieléctrica. En términos generales, la constante dieléctrica (cd) de un medio es la capacidad de éste de modificar un campo eléctrico, que para el caso del agua es, aproximadamente, 80 veces mayor que para los restantes componentes del suelo. Por lo tanto, variaciones en cd del suelo se deben, en una mayor proporción, a variaciones en su contenido de agua. A través de estas variaciones, estos equipos son capaces de estimar indirectamente el contenido de agua, debido a que si el suelo está húmedo la constante dieléctrica será mayor que cuando el suelo esté seco.

Programación del riego mediante lecturas discontinuas o discretas del contenido de agua en el suelo

Por mucho tiempo, la humedad del suelo ha sido evaluada a través de la revisión de calicatas, “palpando el suelo”. Si bien esta técnica ha contribuido en mejorar la gestión del riego y el entendimiento del suelo por parte de los agricultores, presenta importantes desventajas, como:

- Es subjetiva, ya que el agua fácilmente disponible para la planta depende de la textura del suelo y, por ende, de la experiencia y percepción de quien revise la calicata.
- No permite determinar con exactitud el tiempo de riego que evite las pérdidas por percolación profunda.
- Los datos, al ser subjetivos, no pueden ser analizados.
- Para el observador es difícil delegar la tarea y compartir lo observado.
- Alto costo y tiempo en la fabricación de calicatas.

Considerando que un importante número de agricultores utilizan la calicata como un método para evaluar la humedad del suelo, el uso de sensores discretos, como el TDR o FDR, permitirían eliminar la subjetividad.

Tecnología TDR (*Time Domain Reflectometry*). Existen muchos equipos en el mercado, desde del tipo varillas (Theta Probe ML2, Wet sensor, Pogo, GS3, TDR 100, etc) a planos (EC5, 10HS, 5TM, 5TE, etc). Todos ellos entregan como resultado el contenido volumétrico de agua (θ_v ; m^3/m^3 , %) y, algunos, la conductividad eléctrica (dS/m) (Figura 5). $0,1 m^3/m^3 = 10\%$ de contenido volumétrico de agua.



Figura 5. Utilización del equipo TDR en calicata. A la izquierda, inserción del sensor del equipo en el suelo; en la esquina superior derecha equipo TDR 100®, y en la esquina inferior derecha, evaluación de calicata usando una malla cuadrículada de 20 x 20 cm para facilitar y objetivar las evaluaciones.

Para programar el riego con un equipo TDR, se debe realizar una calicata inmediatamente antes de un riego; de esta manera se podrá evaluar la frecuencia en base al grado de agotamiento de la humedad en el suelo. Otra manera es, por ejemplo, definir una frecuencia de calicatas que sirvan de control (1 cada tres días para riegos gravitacionales), para ir observando la variación y, así, tomar la determinación de un nuevo riego. Así mismo, para ajustar el tiempo de riego, se debe realizar una calicata posterior a un riego, con el objetivo de evaluar la extensión y profundidad del sector húmedo.

Para facilitar y objetivar la información colectada es recomendable utilizar una malla cuadrículada de 20 x 20 cm (Figura 5); los datos se deben registrar en una planilla de campo (Figura 6), y llevados a una planilla Excel, que permite presentar la información en figuras de fácil interpretación para los agricultores.

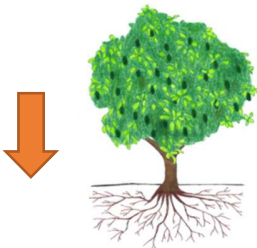
Profundidad	Distancia desde la planta (cm)						
	60	40	20	0	20	40	60
							
	Contenido volumétrico de agua (%)						
5	40,0	40,1	35,8	32,1	35,5	27,9	27,5
10	41,5	41,7	35,1	32,4	35,8	28,1	28,5
20	36,8	36,4	38,1	41,4	32,8	41,7	37,3
40	35,5	35,1	43,4	38,4	40,1	42,4	44,2
60	43,1	42,4	44,1	34,4	43,4	46,0	45,8
80	44,1	45,0	42,1	42,7	40,1	39,7	40,4
100	36,2	34,0	40,4	32,4	40,1	42,1	43,2

Figura 6. Planilla de campo para el registro de valores entregados por el equipo TDR. Flecha roja indica la posición del emisor de riego.

	10	Valores entre 10 y 25%, colores rojo, naranja y amarillo, indican humedad insuficiente; suelo seco que requiere humedad.
	15	
	20	
	25	Valores entre 20 y 35%, colores verde y celeste, indican humedad óptima; suelo húmedo que no provocará estrés hídrico a las plantas.
	30	
	35	Valores sobre 40%, colores azul y violeta, contenido de agua que puede provocar problemas de asfixia radical.
	40	
	45	

Figura 7. Escala de colores y valores de humedad de suelo obtenidos por tecnología TDR, para la interpretación de gráficos en un suelo en particular.

Esta metodología permite identificar problemas, como, por ejemplo, zonas del perfil saturadas o con falta de humedad; la extensión del bulbo húmedo lateralmente; ineficiencias en el sistema de riego; zonas de compactación, entre otras. Para interpretar los gráficos obtenidos, es importante indicar una simbología que permita que la figura sea autoexplicativa (Figura 7). La interpretación del nivel de contenido de agua (%) va a depender de la clase textural del suelo, por lo que, en la Figura 8, se presentan los contenidos de agua referenciales para cada clase textural. Así, por ejemplo, un contenido de agua de 30% indicaría una condición cercana a capacidad de campo para el caso de un suelo franco, mientras que, para un suelo franco arcillo limoso, sería señal de que el suelo debe volver a regarse con el fin de mantenerse dentro del agua fácilmente aprovechable.

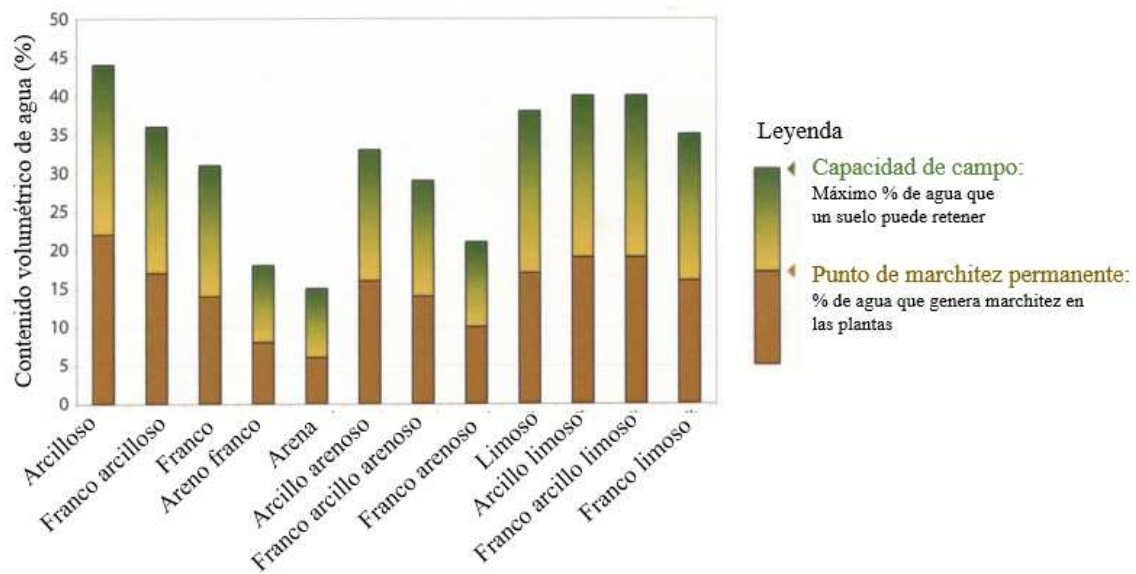


Figura 8. Capacidad de retención de agua según la clase textural del suelo. Adaptado de Spectrum Technologies, Inc; basado en New Mexico State University Climate Center.

En las figuras 9; 10 y 11 se presentan algunos ejemplos prácticos de la utilidad de la tecnología TDR:

- Exceso de humedad debido a una alta frecuencia de riego (Figura 9).
- Pérdida de la conductividad hidráulica del suelo. Detección de sectores compactados en donde el movimiento del agua se ve dificultado (Figura 10).
- Ineficiencias del sistema de riego. Emisores tapados, falta de humedad en una zona del perfil de suelo, heterogeneidad del bulbo húmedo (Figura 11).

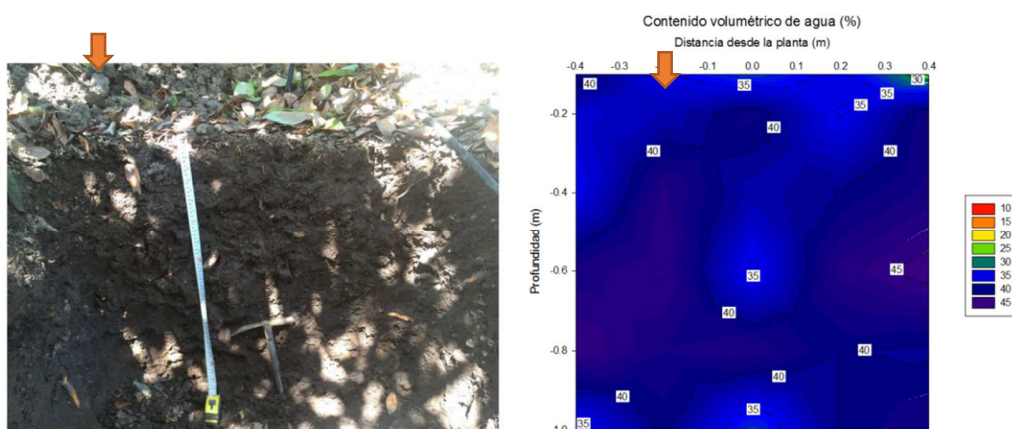


Figura 9. Calicata de un metro de profundidad y 80 cm de ancho, transversal a la hilera de plantación y gráfica del contenido de agua en un suelo franco arcilloso obtenida a partir de lecturas con equipo TDR, inmediatamente antes de un riego, en un huerto de patos. Flecha naranja indica la posición del emisor de riego (microaspersor 32 L/h).

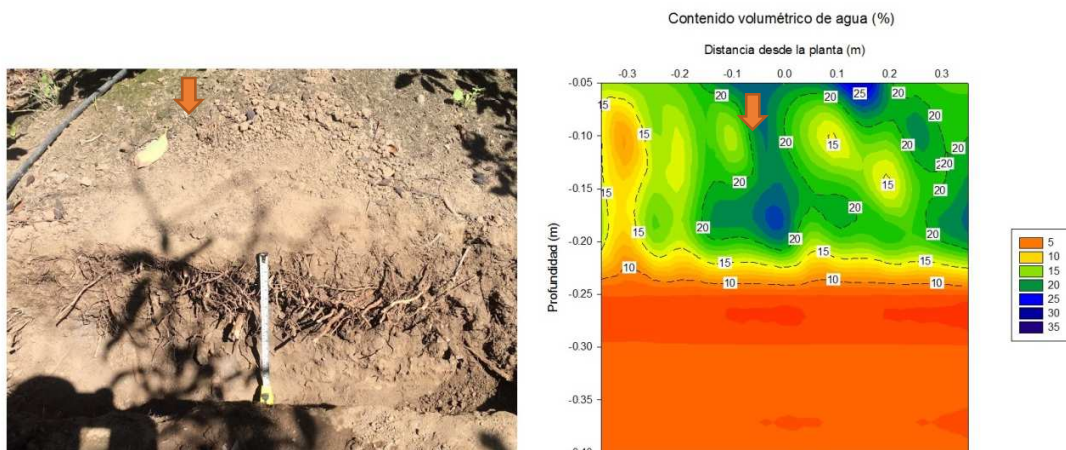


Figura 10. Calicata de 40 cm profundidad y 80 cm de ancho, transversal a la hilera de plantación y gráfica del contenido de agua en el suelo franco obtenida a partir de lecturas con equipo TDR, inmediatamente antes de un riego, en un huerto de paltos. Flecha naranja indica la posición del emisor de riego (microaspersor 32 L/h).

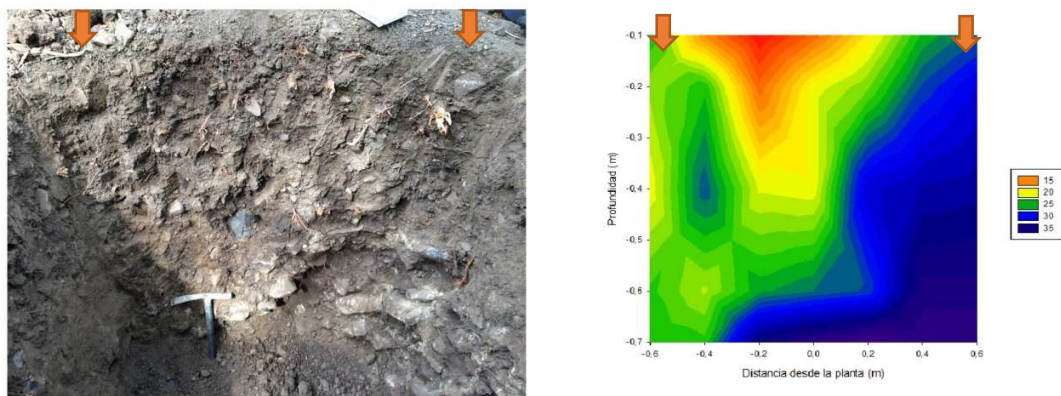


Figura 11. Calicata de 70 cm profundidad y de 120 cm de ancho, transversal a la hilera de plantación y gráfica del contenido de agua en un suelo franco obtenida a partir de lecturas con equipo TDR, posterior a un riego, en un huerto de palto. Flechas rojas en la gráfica indica la posición del emisor de riego (goteros 4 L/h). Se observa claramente que el emisor izquierdo entrega una menor cantidad de agua comparado con el emisor derecho.

Sensores de capacitancia FRD (*Frequency Domain Reflectometry*). Los sensores de capacitancia (FDR), al igual que los sensores TDR, se basan en la respuesta a los cambios en la constante dieléctrica del suelo. Existen varias tipos en el mercado, tales como PR2, Diviner 2000, Easy Ag, Triscan, Enviroscan y C-Probe, entre otros. La principal ventaja de estos sensores es la sencillez de su operación, su bajo mantenimiento y la facilidad en la manipulación de los datos. Sin embargo, las principales desventajas son su alto costo (3.000. a 4.000. \$US; con telemetría) y la necesidad de realizar calibraciones para obtener

mayor precisión en los datos evaluados, aunque para la toma de decisiones de riego éstas no son necesarias, dado que se trabaja con la dinámica (caídas) de la humedad del suelo, más que con los datos exactos de humedad.

Dentro de los sensores de evaluación discontinua más utilizados se encuentra la sonda de capacitancia Diviner 2000® (Figura 12), la cual entrega lecturas puntuales del contenido volumétrico de agua del suelo cada 10 cm de profundidad (θ_v ; m^3/m^3 , %).

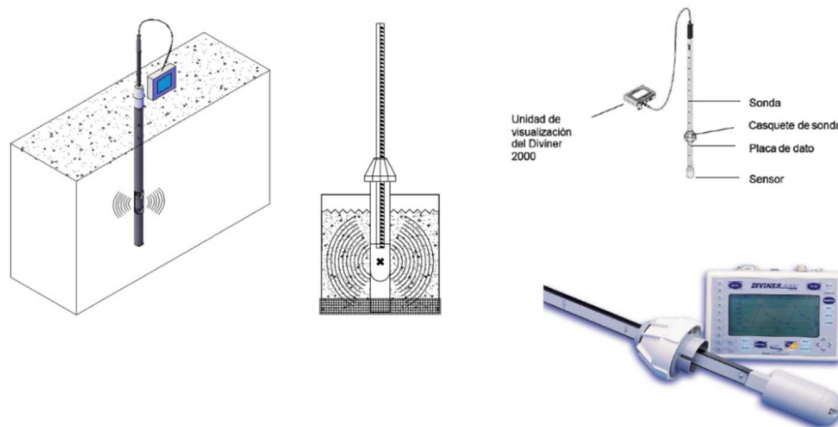


Figura 12. Sonda de capacitancia Diviner 2000®. Esquema de la izquierda, evaluación en un perfil de suelo.

Como norma general, para la interpretación de los datos entregados por el equipo, los valores entre 0 - 10 % (0 y 0,1 m^3/m^3) indican un rango de humedad de un suelo seco o cerca del punto de marchitez permanente (PMP), y valores entre 30 - 40% (0,3 y 0,4 m^3/m^3) un rango de humedad de un suelo a capacidad de campo a saturado. Sin embargo, este criterio puede variar según la textura del suelo. En el Capítulo 1, Cuadro 1, se presentan valores de contenido volumétrico a capacidad de campo (CC) de diferentes suelos en la zona de Peumo, que pueden servir de referencia.

Instalación en terreno

La precisión de los datos entregados por un sensor o sonda electromagnética es dependiente de una correcta instalación. Los fabricantes de estos equipos entregan pautas a seguir para su instalación, requiriéndose el equipamiento adecuado. Para el caso de la instalación de una sonda es necesario disponer de: barreno, nivel, trípode, tubo de acceso, anilla de corte, tapón expandible y tapa (Figura 13).



Figura 13. Insumos para la instalación de un tubo de acceso de PVC para el uso de sondas de capacitancia Diviner 2000® y Enviroscan®. En la figura, tubo de acceso, tapón expandible, anillo de corte y tapa del tubo.

Para instalar el tubo de acceso, primero se debe asegurar el trípode al suelo, utilizando el nivel de burbuja dispuesto en su costado. El eje central del trípode se debe posicionar cercano a la planta, a 10 cm del emisor de riego, para el caso de goteros, o en la mitad del diámetro de mojamiento de los microaspersores. En el caso de utilizar 2 líneas de goteros, se debe ubicar a 10 cm del emisor de una de ellas. Para fijar el trípode al suelo se deben clavar las estacas metálicas, en cada una de las patas del trípode. Luego, se debe introducir en el orificio central del trípode el tubo de acceso, con la anilla de corte en su extremo inferior. Al golpear cuidadosamente la parte superior del tubo, este comenzará a introducirse lentamente en el suelo; se debe tener especial cuidado con raíces gruesas y piedras, pues pueden quebrar el tubo o generar espacios de aire entre el tubo y el suelo que podrían afectar la medición. Finalmente, con el barreno se debe quitar el suelo que queda en su interior. El tubo debe quedar a una profundidad mínima de un metro (Figura 14).



Figura 14. De izquierda a derecha: trípode anclado al suelo y alineado mediante el nivel de burbuja; tubo de acceso introducido en el orificio central del trípode; barreno quitando el suelo dentro del tubo de acceso; tapa superior del tubo una vez completamente instalado. Huerto adulto de paltos 'Hass'.

Al usar sondas de capacitancia, es recomendable realizar una caracterización de la profundidad efectiva del suelo y de la distribución de las raíces mediante calicatas (ver Capítulo 1). Para programar el riego con una sonda de capacitancia de medición discontinua, se debe evaluar frecuentemente el contenido de agua en el suelo, introduciendo la sonda en el tubo de acceso y presionando el botón “scan” en el *datalogger*; al seleccionar el número del tubo asociado al perfil de suelo es posible guardar y visualizar los datos en forma instantánea (Figura 15).

Para ajustar el tiempo de riego se debe evaluar el contenido de agua antes y después de un riego, con el objetivo de conocer la profundidad del bulbo húmedo y que esta coincida con las raíces del cultivo. También es recomendable evaluar después de un riego abundante, o una lluvia copiosa, para conocer el máximo de agua que es capaz de retener el suelo. En verano se debe evaluar constantemente, para conocer el nivel de agotamiento de agua entre riegos. La decisión de reponer agua puede ser complementada con evaluaciones ambientales (ET_0 , T° y %HR) y del estado hídrico del cultivo, a través de la medición del potencial xilemático, indicador que refleja el estatus hídrico de la planta. Con esta información es posible ajustar la frecuencia de riego, permitiendo una fracción de agotamiento de la humedad aprovechable sin perjudicar al cultivo. Para conocer más detalles revisar el Capítulo 6.

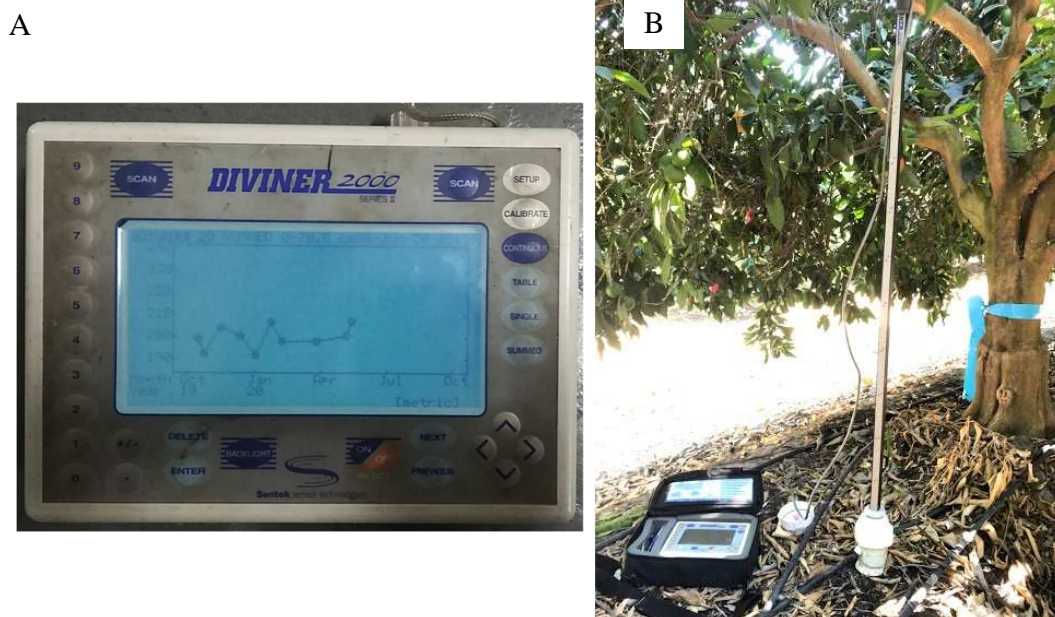


Figura 15. (A) *Datalogger* del equipo Diviner 2000, mostrando un gráfico con evaluaciones para ajustar el tiempo y la frecuencia de riego. (B) Sonda posicionada en el tubo de acceso de un huerto de naranjos.

Programación del riego a través de lecturas continuas del contenido de agua en el suelo

El desarrollo electrónico y las nuevas tecnologías de la comunicación, como la telemetría, la domótica y el Internet de las cosas (IOT) han permitido que, mediante la evaluación continua del contenido de agua con equipos FDR, detectar variaciones en la humedad del suelo casi en tiempo real. Gracias a esto, se ha logrado registrar de forma precisa el patrón de extracción de agua por la planta durante el día y su relación con el volumen total de agua en el perfil de suelo. Estos sensores están conectados a unidades de transmisión de datos denominados “nodos”, que contienen memoria para respaldar la información generada, evitando la pérdida de datos ante fallos en la comunicación de la red. Cada sensor instalado en el terreno forma parte de esta red, los que, a su vez, están comunicados con un nodo central o “servidor”, que se encarga de la adquisición y el tratamiento de los datos de todos los sensores instalados en el terreno. Finalmente, los datos procesados son entregados a los usuarios como gráficos autoexplicativos, por medio de aplicaciones móviles o sitios web. Existen diferentes plataformas para la visualización de datos, entre ellas se encuentran: AddVantage, DropControl, Inelcom, Irrimax, Widhoc, LabView, entre otras. En la Figura 16 se muestra un esquema sobre el funcionamiento de una red de telemetría.

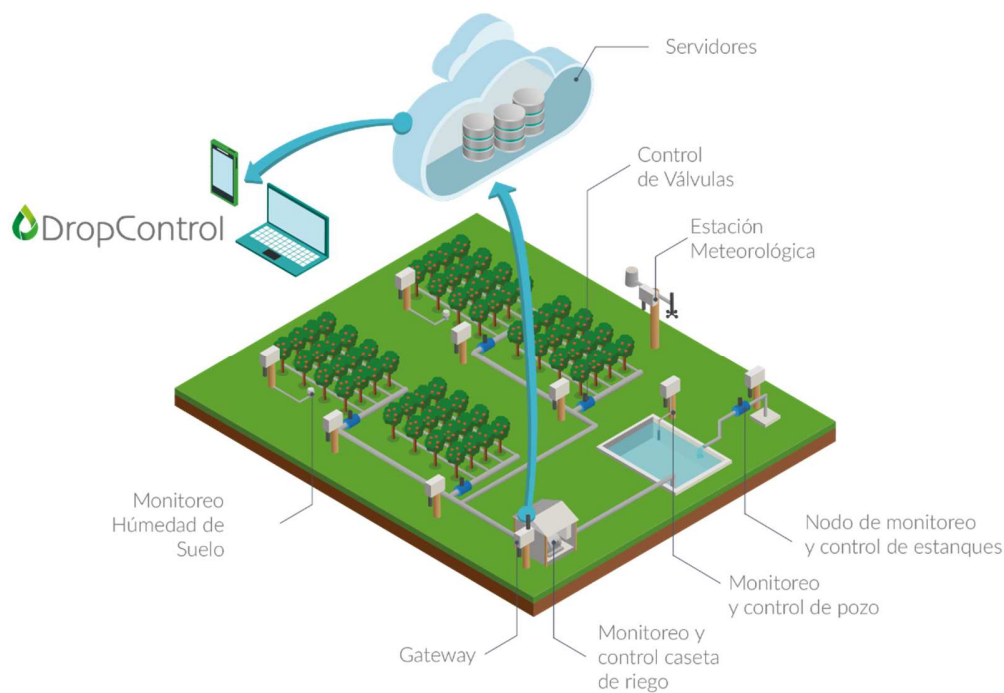


Figura 16. Esquema de una red de telemetría con sensores en terreno que se comunican a través de receptores y repetidores. DropControl es uno de los software de Wiseconn; está en línea y permite visualizar y controlar el riego, además de la fertirrigación de manera remota.

Sensores de capacitancia de lectura continua para ajustar tiempo y frecuencia de riego

La instalación de estos equipos es en tubos de acceso o perforaciones sin disturbar el suelo circundante, para obtener datos precisos, al mantener las condiciones de estructura del suelo. Uno de los sensores ampliamente utilizado es la sonda de capacitancia Enviroscan®; se compone de un cuerpo plástico de largo variable (de 10 a 200 cm de largo) sobre el cual se distribuyen sensores a diferentes profundidades conectados a una placa o procesador; estos componentes están protegidos por el tubo de acceso, aislado en la parte inferior por un tapón expandible y una tapa en la parte superior; el tubo de acceso es similar al indicado para la instalación del Diviner 2000®. Adicionalmente, la placa de la sonda se encuentra conectada a una unidad de energía solar, la cual abastece de energía a la unidad de transmisión de datos o nodo (Figura 17).

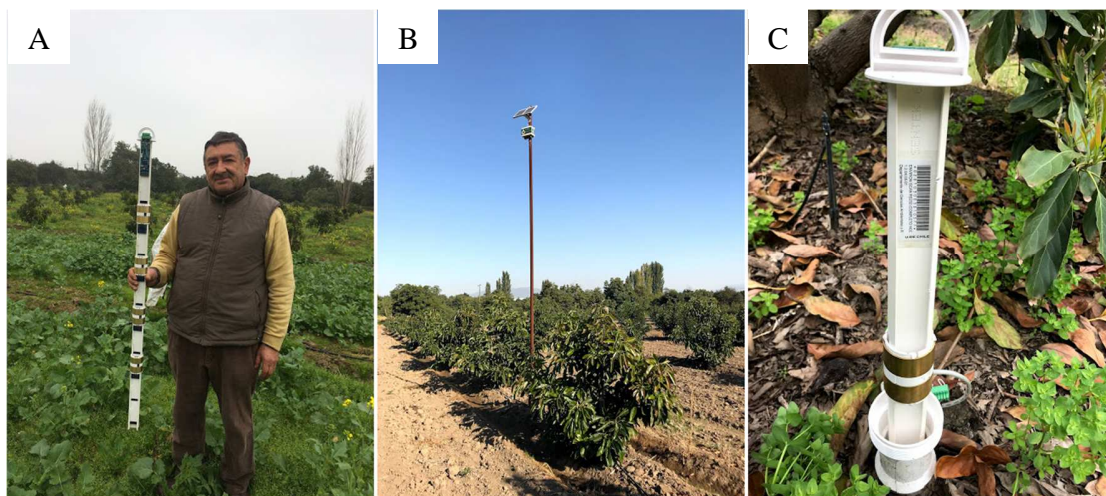


Figura 17. (A) Agricultor sosteniendo una sonda de capacitancia; (B) poste con panel solar y nodo de transmisión de datos en su extremo superior; (C) sonda de capacitancia siendo introducida en el tubo de acceso, en huerto nuevo de palto ‘Hass’.

Determinación de líneas de gestión (LG) para el riego; tiempo y frecuencia usando sondas de capacitancia de medición continua. Para la interpretación de los datos entregados por las sondas de medición continua se utilizan aplicaciones y plataformas web; a través de estas es posible crear, basándose en la dinámica de la humedad del suelo, umbrales, indicadores o parámetros de referencia, denominados “Líneas de gestión del riego” (LG). Las aplicaciones y plataformas web entregan un gráfico que muestra las variaciones del contenido de agua en el suelo en la zona de raíces, en respuesta a los riegos y la absorción de agua por la planta en respuesta a las condiciones climáticas (ET₀). Para interpretar los datos, se definen líneas horizontales paralelas, que marcan los límites permisibles de la humedad en el suelo (LG), indicando: nivel de lleno (NLL), capacidad de campo sonda (CCs) y punto de recarga (PR) (Figura 18).

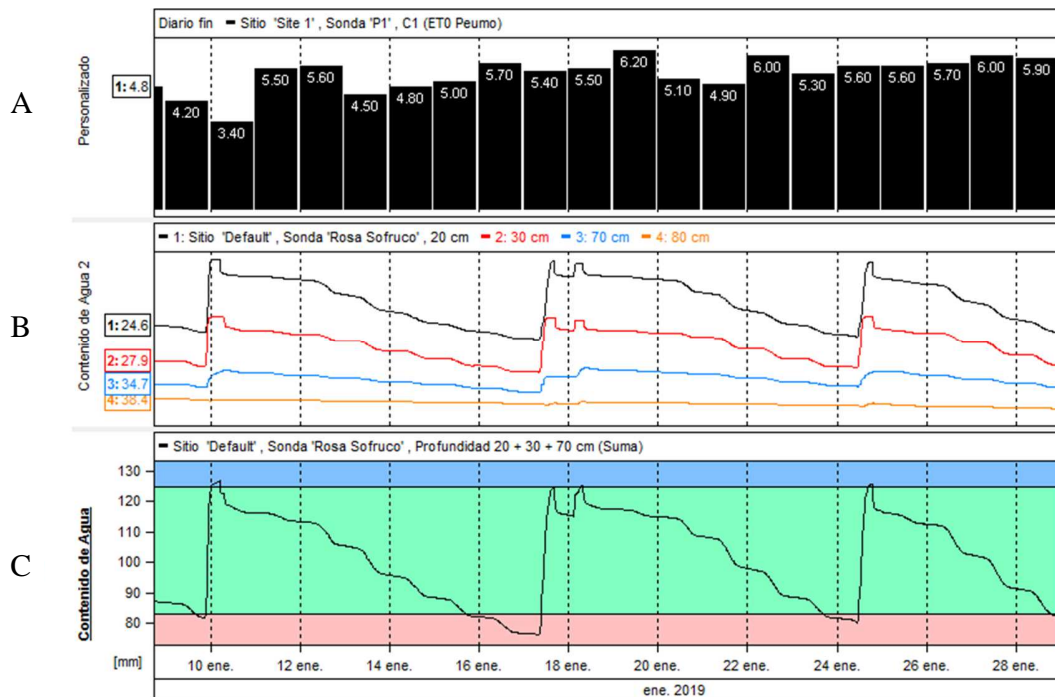


Figura 18. Visualización de la información entregada por el software Irrimax®.(A) Evapotranspiración de referencia (ET0), (B) dinámica del contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades o gráfico apilado, y (C) dinámica del contenido de agua en el suelo en la zona de raíces o gráfico sumatoria.

Generalmente se trabaja con dos tipos de gráficos:

- **Gráfico apilado** (Figura 17B): este muestra la variación de la humedad en el suelo de cada sensor de forma independiente. Permite definir con precisión el tiempo de riego y, además, observar a la profundidad se encuentra la mayor cantidad de raíces absorbentes.
- **Gráfico sumatoria** (Figura 17C): este gráfico integra los datos de humedad entregados por los sensores a diferentes profundidades, donde se encuentra la mayor densidad de raíces del cultivo. En él se definen las LG para determinar la frecuencia de los riegos. En palabras simples, en este gráfico, las LG se asemejan a un estanque de agua, que se llena al momento del riego (nivel de lleno: color azul) y que se vacía paulatinamente a medida que la planta va absorbiendo el agua, hasta llegar al punto de recarga (color rosado).

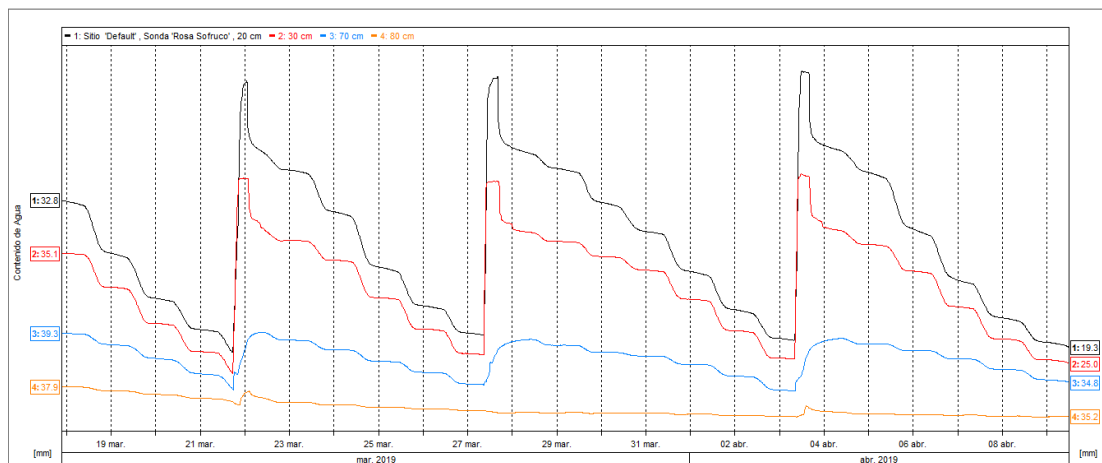


Figura 19. Visualización del gráfico apilado en el software Irrimax®. En este caso, es posible observar las variaciones de la humedad del suelo detectada por 4 sensores, de forma independiente, en un huerto de naranjos.

Como se mencionó anteriormente, un sensor bien instalado entregará datos representativos y válidos de la humedad del suelo. Un cultivo con un sistema de raíces sano y en crecimiento mostrará datos con un comportamiento similar al de las figuras 19 y 20, en donde se observa un aumento vertical de la humedad del suelo producto de un riego (o precipitaciones en invierno), y luego una disminución paulatina de la humedad, inicialmente debido al drenaje y, posteriormente, a la absorción de agua por las plantas. Durante el día, la humedad cae considerablemente (pendiente más negativa), debido a la actividad de la planta como respuesta al clima. A diferencia de esto, en la noche, los primeros días después de un riego o lluvia, la humedad disminuye lentamente, debido al efecto del drenaje. Esto provoca un comportamiento escalonado de las lecturas continuas, situación característica en horizontes de suelo poblados con raíces absorbentes (Figura 20).

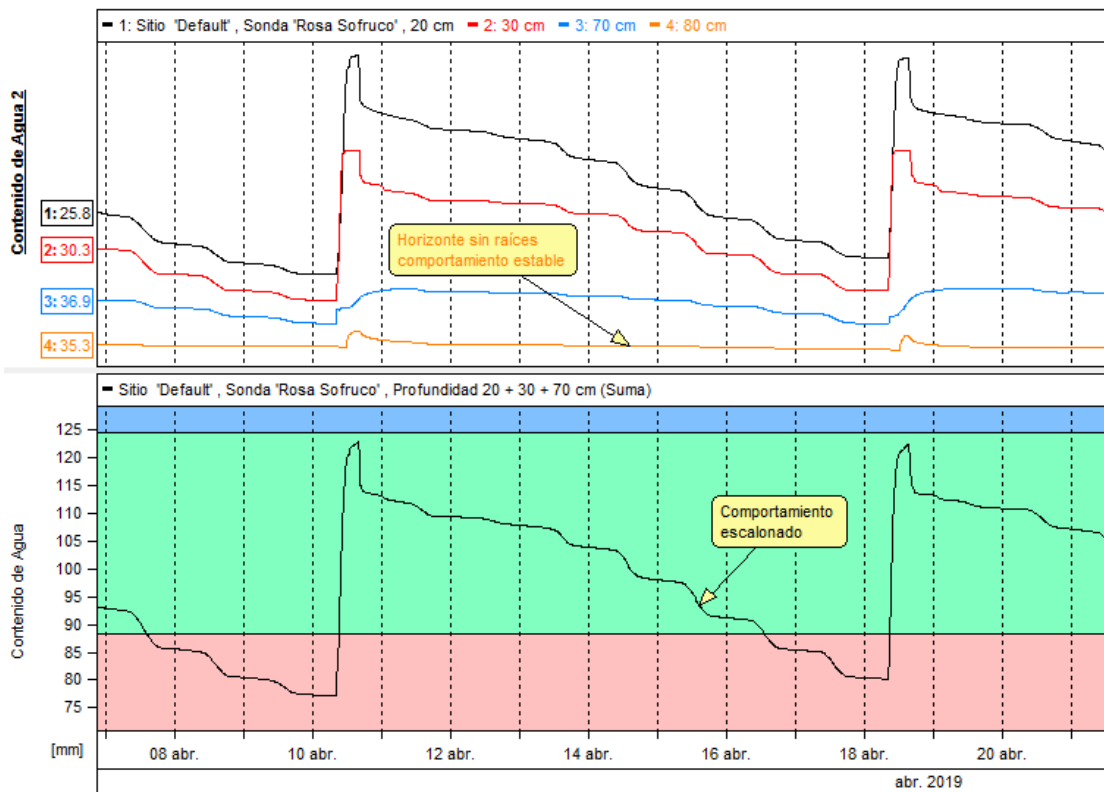


Figura 20. Visualización en el software Irrimax® de los gráficos apilado y sumatoria. En el gráfico inferior se observa el comportamiento escalonado, reflejando absorción activa de agua durante el día y una lenta distribución lateral por procesos de secado y/o drenaje durante la noche, en un huerto de naranjos. En el gráfico superior se observa el mismo comportamiento en los dos primeros sensores; en el tercero disminuye muy sutilmente, y en el último no es apreciable, lo que significa que a esta profundidad hay poca presencia de raíces activas.

Descripción de las líneas de gestión (LG)

- **Nivel de lleno:** es la máxima cantidad de agua que puede contener el suelo sin que se produzca percolación. Esta condición debe ser determinada analizando el último sensor del gráfico apilado. En la práctica, esto permite determinar el tiempo de riego óptimo; con un riego se debe asegurar una leve reacción del sensor más profundo (Figura 21).

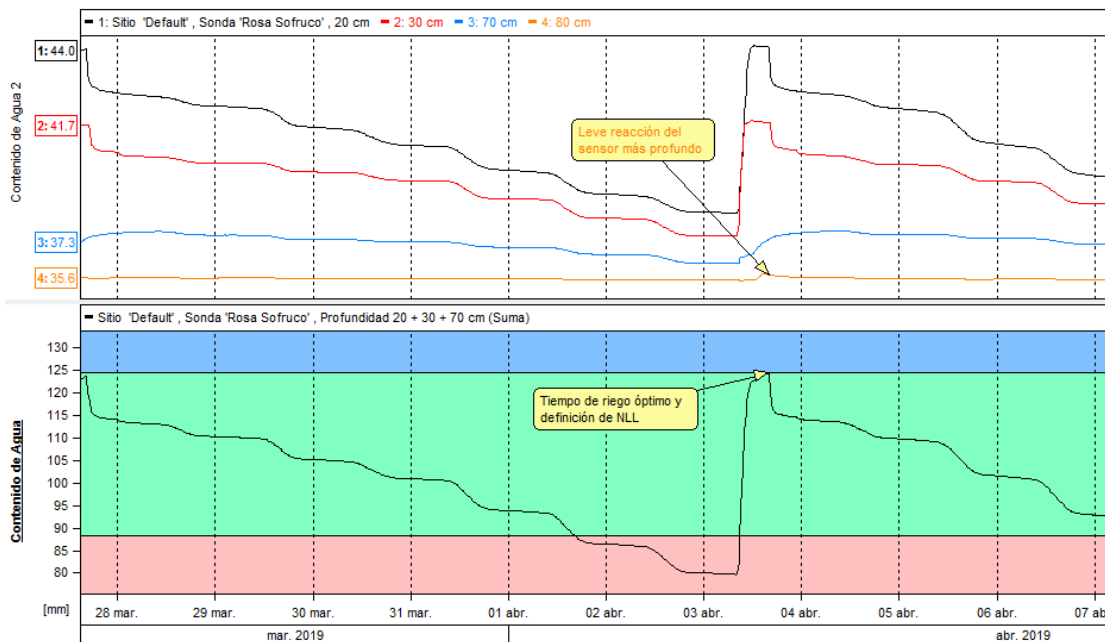


Figura 21. Visualización en software Irrimax® de los gráficos sumatoria y apilado. Determinación del Nivel de Lleno (NLL) y tiempo de riego óptimo. En el gráfico apilado (superior) se observa una leve reacción del sensor más profundo con el riego.

- **Capacidad de campo sonda (CCs):** La definición tradicional de capacidad de campo es “la cantidad de agua que queda almacenada en el suelo luego de un riego abundante y un drenaje libre entre 24 y 72 horas, dependiendo de la textura del suelo, encontrando un equilibrio entre agua y oxígeno en el suelo (Veihmeyer y Hendrickson, 1950)”. A partir de esta definición, con los datos recopilados, se determina la capacidad de campo sonda (CCs). Este valor no siempre se relaciona con el valor de CC obtenido a través de un análisis de suelo, por lo que se debe tener cuidado al compararlos. La CCs se determina en invierno, sin transpiración y mínima evaporación desde la superficie del suelo. Después de una lluvia abundante o un riego profuso, comienza un rápido drenaje en donde el suelo libera el exceso de agua mostrando una caída abrupta en el gráfico. Luego, al pasar los días y dependiendo del tipo de suelo, el drenaje es cada vez menor y la curva del gráfico mostrará una disminución de la humedad cada vez menor, a esa estabilización de la humedad se le denomina CCs (Figura 22)

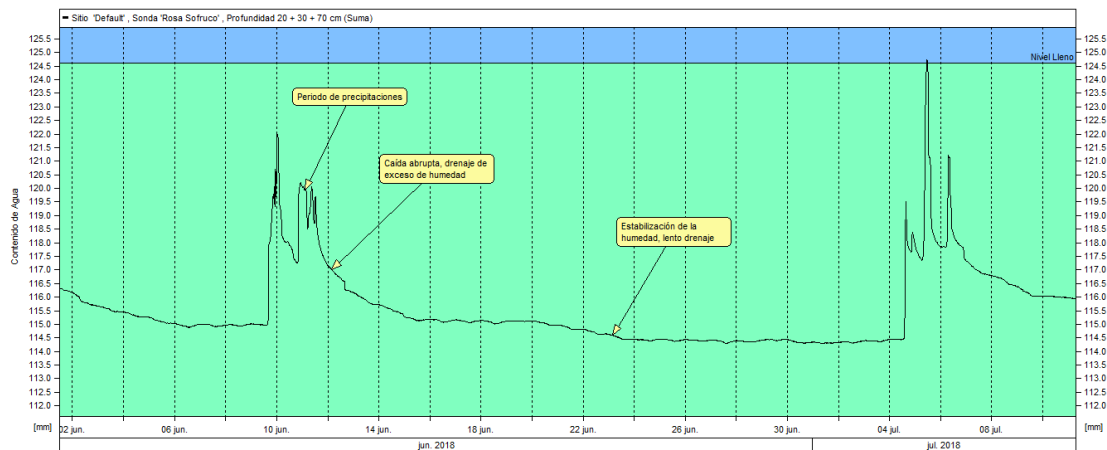


Figura 22. Visualización en software Irrimax® gráfico sumatoria. Determinación de la LG capacidad de campo sonda (CCs), luego de un periodo de precipitaciones en un huerto de naranjos.

- **Punto de recarga (PR):** Corresponde al momento en el que hay que reponer la humedad del suelo con un riego. Esta línea de gestión (LG) define la frecuencia de riego. El PR es un nivel de humedad similar al umbral de riego (UR), e identifica el momento cuando se alcanza la fracción de agotamiento de la humedad permitida sin provocar estrés en el cultivo. Este nivel de humedad está entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), aunque muy alejado de éste, para evitar alteraciones de las funciones metabólicas de las plantas, y disminución de los rendimientos, la calidad o el potencial productivo. Para definir el PR con la sonda, se deben observar la disminución o las caídas en el contenido de humedad del suelo en pleno verano, cuando la demanda atmosférica (ET0) es máxima y constante. La disminución abrupta de la humedad del suelo durante el día y la estabilización nocturna muestra una curva humedad escalonada; a medida que las plantas absorben agua, la humedad del suelo disminuye, aumentando la fuerza de retención de la humedad, con lo que las plantas tienen más dificultad para extraerla desde el suelo; esto muestra una curva de escalones de menor tamaño (Figura 23).

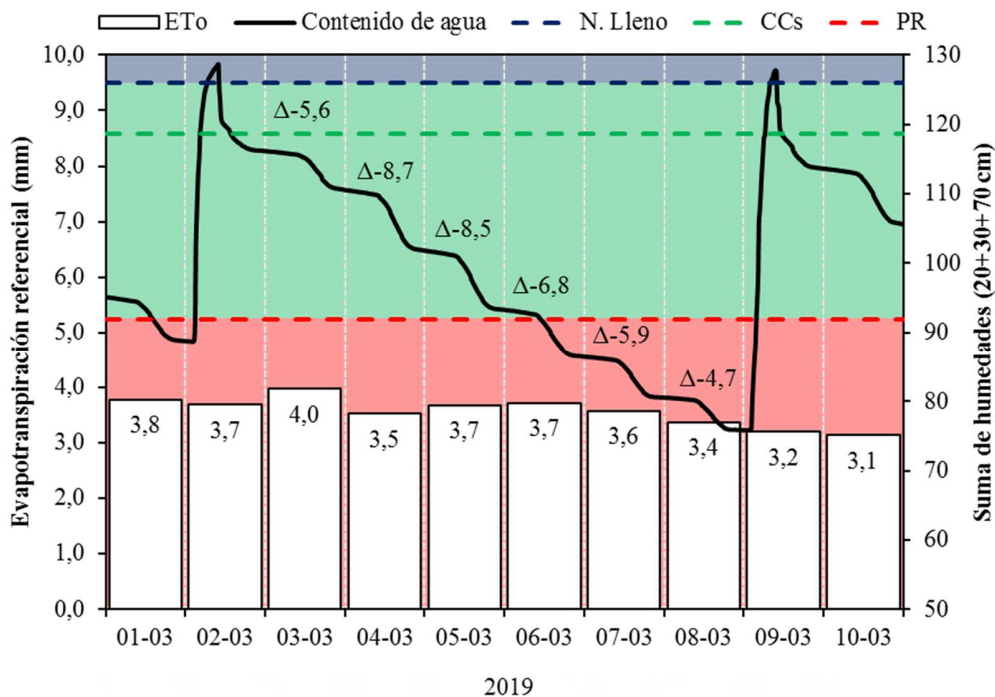


Figura 23. Determinación de la LG punto de recarga (PR; línea roja); en verano, con similar evapotranspiración (barras blancas) durante un ciclo de riego, en un huerto de naranjo. Dinámica del contenido de agua (línea negra) donde existe mayor proporción de raíces, expresado como la suma de las lecturas de la sonda Enviroscan a 3 profundidades. Se observa que las caídas diarias de humedad (Δ) se van haciendo más pequeñas a medida que se seca el suelo, indicando una limitación en la capacidad de extracción de agua por la planta. Capacidad de campo sonda (CCs; línea verde); N. Lleno (Nivel de lleno; línea azul).

Conclusiones y recomendaciones

La integración del conocimiento tradicional del cálculo de las necesidades de riego, con las nuevas herramientas y equipos, permiten dar un salto tecnológico invaluable en el manejo del riego, condición fundamental para mantener la competitividad agrícola.

Las diferentes tecnologías que miden la constante dieléctrica del suelo entregan información valiosa y objetiva para programar el riego.

La correcta interpretación de los datos entregados por los equipos debe estar asociada al tipo y características del suelo (clase textural, estructura, profundidad, estratas, entre otras) y a los diferentes cultivos.

Las líneas gestión deben ser de fácil comprensión, de manera de evitar la confusión de conceptos entre los diferentes tipos de usuarios (técnicos, asesores y agricultores).

NOTA: Las marcas y empresas comerciales mencionadas en el capítulo se incluyen para beneficios del lector y no suponen ninguna recomendación por parte de la Universidad de Chile.

Referencias

- AZCÓN-BIETO J. Y M. TALÓN. 2000. Fisiología Vegetal. 2ª Edición. Madrid. McGraw Hill/ Interamericana. 652p.
- ALLEN, R.; L. PEREIRA; D. RAES Y M. SMITH. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 322p.
- ALLEN, R.; L. PEREIRA; M. SMITH; D. RAES and J. WRIGHT. 2005. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. Journal of irrigation and drainage engineering. 131, 2-13.
- BALBONTÍN, C. Y A. IBACACHE. 2014. Estrategias de ahorro y control del agua de riego en el cultivo de uva de mesa. Informativo INIA Intihuasi N°43. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación, Ministerio de Agricultura. 4p
- CALLEJAS, R. J. VERA Y C. KREMER. 2014. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Serie Ciencias Agronómicas N° 23, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago. 112p.
- CALLEJAS, R.; J. VERA; M. RÍOSECO; F. PROHENS; H. OSORIO; P. PINO; J. NAVARRETE Y R. GÁLVEZ. 2014. Generación e integración de tecnologías destinada al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras de fruta en Chile. Aqua-LAC, 6 (2): 71 – 83.
- CALLEJAS, R.; J. NAVARRETE Y M. RIOSECO. 2013. Líneas de gestión del riego: Umbrales para interpretar los datos de humedad del suelo registrados por sondas de capacitancia. Antumapu Profesional. Santiago, Chile. 3 (2): 17p.
- CASTEL, J. 1985. Evaluación de instalaciones de riego localizado en cítricos de la Comunidad Valenciana. Rev. I.T.E.A. 59: 27-38.
- CASTEL, J. 2000. Water use of developing citrus canopies in Valencia, Spain. Proc IX International Citrus Congress, Orlando, Florida, 3-7 December.
- CASTEL, J. 2001. Consumo de agua por plantaciones de cítricos en Valencia. Rev. Fruticultura Profesional N° 123 Especial 2001: 27-32.

- CASTEL, J.; I. BAUTISTA; C. RAMOS Y G. CRUZ. 1987. Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchard in Valencia (Spain). *Irrig. Drain. Syst.*, 3 205-217.
- COHEN, M. 1994. Funcionamiento hídrico y producción frutal del nogal en zonas semiáridas: Aplicación al manejo del riego. Memoria para optar al grado de Dr. Ing. Agr. Universidad de Lleida-Escuela Técnica Superior d'Enginyeria Agraria. 298p.
- GARDIAZABAL, F. 2003. Aproximación a los Requerimientos Hídricos del Palto - Proyecto Fontec 97-1215.
- FERREYRA, R.; G. SELLÉS; P. MALDONADO; J. CELEDÓN Y A. TORRES. 2006. Efecto de la macroporosidad y atmósfera del suelo en el estado hídrico del palto. Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile. 9-12 mayo.
- FERREYRA, R. Y G. SELLÉS. 2011. Algunas consideraciones para el manejo de riego en Cítricos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. *Revista Tierra Adentro* N°94. Santiago, Chile. 88p.
- FERREYRA, R.; G. SELLÉS Y I. SELLÉS. 2001. Riego deficitario controlado en uva de mesa. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). *Boletín INIA* N° 60 Santiago de Chile. 44p.
- FERREYRA, R. Y G. SELLÉS. (ed.) 2007. Manejo del riego y suelo en palto. La Cruz, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. *Boletín INIA* N° 160. 120p.
- FERRÉ, P. AND G. TOPP. 2002. Time domain reflectometry. In: DANA, J. AND G. TOPP. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 4-Physical Methods*. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA, 434 – 446.
- GUROVICH, L. 2001. Riego superficial tecnificado. 4ª Edición. Ediciones Universidad Católica de Chile, 616p.
- MEYER, J.; M. ARPAIA; M. YATES; E. TAKELE; G. BENDER AND G. WITNEY. 1990. Irrigation and fertilization management of avocado. *Calif. Avocado Soc. Yrbk* 74: 71-83.
- OSTER, J. AND M. ARPAIA. 2007. Comments about crop coefficients for Hass avocado on Mexican seedling rootstocks. www.avocadosource.com.
- SANTA OLALLA, M. 1993. *Agronomía del riego*. Mundi Prensa, Madrid, España. 732p.

RIVEROS, L. 2020. Cartografía de coeficiente de cultivo (K_c) a partir de datos remotos sobre paltos en Chile mediterráneo. Memoria de Título. Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Santiago (en publicación).

SELLÉS, G.; R. FERREYRA; G. CONTRERAS; R. AHUMADA; J. VALENZUELA Y R. BRAVO. 2003. Manejo del riego por goteo en uva de mesa cv. Thompson Seedless cultivada en suelo de textura fina. *Agricultura Técnica*, 63 (2): 180-192.

SILBER, A.; Y. ISRAELI; M. LEVI; A. KEINAN; O. SHAPIRA; G. CHUDI ET AL. 2012. Response of “Hass” avocado trees to irrigation management and root constraint. *Agricultural Water Management*, 104: 95–103.

TAIZ, L. AND E. ZEIGER. 2007. *Plant Physiology*. 3th Ed. Sinauer Associates, Inc. 580p.

CAPÍTULO 5. DETERMINACIÓN DEL MOMENTO OPORTUNO DE RIEGO MEDIANTE SONDAS FDR Y POTENCIAL HÍDRICO EN PALTOS Y CÍTRICOS: EFECTOS EN LA PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD DE LA FRUTA

Víctor Beyá-Marshall, Cristián Kremer F. y Brian Baeza S.

El uso de sondas FDR para la gestión del riego en frutales ha permitido optimizar el recurso hídrico (Abrisqueta et al., 2012; Callejas et al., 2014; Vera et al., 2013, 2019). Su uso se basa en la determinación de líneas de gestión (LG), las que se definen visualmente siguiendo la dinámica del contenido de agua del suelo (Θ_w). La más relevante de ellas es la del punto de recarga o punto de quiebre (*Breaking point*), pues corresponde al momento de riego, la cual se sustenta en un cambio de la pendiente en la curva de extracción de agua por las plantas, a una misma evapotranspiración referencial (Abrisqueta et al., 2012; Thompson et al., 2007). Si bien este criterio es práctico para la gestión del riego, es necesario validar su implementación con mediciones objetivas del estatus hídrico de la planta y su nivel de estrés. Por ello, se establecieron 4 ensayos de riego en diferentes cítricos (naranja, mandarina y limonero) y en palto (Figura 1). Los objetivos de estos ensayos fueron: (i) evaluar la determinación visual de la línea de gestión de punto de recarga de una sonda FDR, y su efecto sobre la productividad y el calibre de la fruta, y (ii) Determinar el momento de riego asociado al estatus hídrico de la planta, y su relación con el clima, la humedad del suelo y la producción.

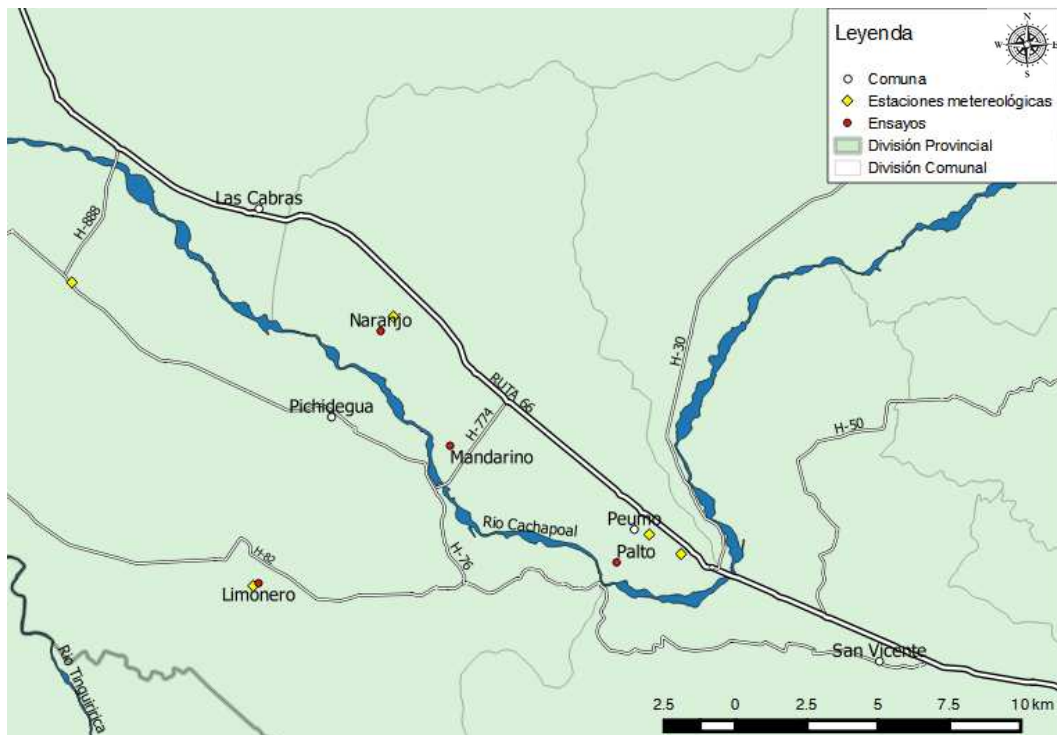


Figura 1. Ubicación de los ensayos de riego y de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

Sitios de estudio y metodología

Los ensayos se ubicaron en predios de diferentes agricultores (Figura 1; Cuadro 1), por lo que se dispuso de toda la información sobre el manejo del cultivo (Cuadro 1); se caracterizaron los diferentes suelos (Cuadro 2), el clima (cuadros 3 y 4) y el manejo de riego (Cuadro 5).

Cuadro 1. Características de los huertos donde se realizaron los ensayos.

Característica	Limonero	Mandarino	Naranja	Palto
Localidad	Santa Amelia	Codao	La Rosa	Peumo
Estación climática ref.	Santa Amelia	La Rosa	La Rosa	Peumo
Comuna	Pichidegua	Peumo	Peumo	Peumo
Coordenada geográfica	34°24'37.22"S 71°18'45.51"O	34°22'5.62"S 71°14'18.23"O	34°19'53.25"S 71°15'50.01"O	34°24'21.69"S 71°10'31.43"O
Año de plantación	2001	2014	1996	2005
Marco de plantación (m)	6 x 4	4,5 x 2	6 x 3	6 x 2
Variedad	Fino 49	W. Murcott	Lane Late	Hass
Portainjerto	<i>C. macrophylla</i>	Rubidux	Citrumelo	Mexícola
Sistema de riego	Goteo	Goteo	Goteo	Microaspersión
Laterales por hilera	2	2	2	1
Pp del equipo (mm/h)	0,83	1,78	1,33	2,33

Estación climática ref: Estación climática de referencia; Pp del equipo: Precipitación del equipo de riego.

Cuadro 2. Características y propiedades físicas de los suelos donde se realizaron los ensayos.

Características físicas	Limonero	Mandarino	Naranja	Palto
Serie de suelo	Palquiales	Peumo	La Rosa	Peumo
Uso de camellón	si	si	si	si
Altura camellón (cm)	50	30	90	60
Ancho base camellón (cm)	300	120	150	200
Textura	Fa	F	FAL - FA	F - Fa
Porosidad total (% v/v)	41	41	47	45
C. Campo (% v/v)	25	32	35	27
PMP (% v/v)	15	20	23	15
HA (% v/v)	10	12	12	12
Da (g/cm ³)	1,69	1,56	1,41	1,42
Prof. suelo (cm)	110	120	100	80
Prof. de raíces finas (cm)	70	45	50	30

Fa: Franco arenoso; F: Franco; FA: Franco arcilloso; FAL: Franco arcillo limoso; C. Campo: Capacidad de campo; HA: Humedad aprovechable; PMP: Punto de marchitez permanente; Da: Densidad aparente.

Todos los huertos estaban establecidos sobre camellón, para reducir el impacto negativos de inundaciones o del nivel freático cercano a la superficie del suelo. La profundidad de las raíces no superaba, en promedio, el 50% de la profundidad del suelo e, incluso, en los huertos de naranja y palto, el enraizamiento no superaba la base del camellón. La retención de agua estaba acorde a los niveles de arcilla que presentan los suelos, con valores de

densidad esperables para la clase textural; no obstante, para el caso del sitio con naranjos, era un poco elevada.

Cuadro 3. Temperaturas media, mínima y máxima del mes, y número de heladas en las tres zonas de ensayo, desde junio de 2017 a octubre de 2019.

Año	Mes	Santa Amelia				Peumo				La Rosa			
		T. media	T. mín. abs	T. máx. abs	N° H	T. media	T. mín. abs	T. máx. abs	N° H	T. media	T. mín. abs	T. máx. abs	N° H
		-----°C-----				-----°C-----				-----°C-----			
2017	Jun	9,3	-1,1	18,8	4	8,4	-0,7	20,2	3	8,7	-1,4	19,6	6
	Jul	10,2	-1,0	20,9	3	8,6	-0,8	21,6	2	8,7	-0,8	22,5	4
	Ago	11,2	1,0	21,0	0	9,7	1,4	22,4	0	10,1	0,0	21,8	0
	Sep	12,3	0,3	26,9	0	12,2	1,5	28,2	0	12,5	2,0	27,5	0
	Oct	13,7	2,9	28,4	0	14,2	3,3	29,9	0	14,2	2,9	29,7	0
	Nov	18,1	7,7	32,5	0	18,0	7,7	34,2	0	17,6	7,1	34,1	0
	Dic	20,9	7,1	35,6	0	20,8	7,4	36,3	0	20,2	7,7	35,9	0
2018	Ene	20,2	8,2	34,2	0	20,8	8,9	36,3	0	20,1	8,5	35,9	0
	Feb	20,0	6,4	35,9	0	20,5	8,8	36,8	0	20,1	8,4	37,4	0
	Mar	17,8	4,3	32,9	0	18,1	4,3	33,2	0	17,9	5,0	33,9	0
	Abr	14,6	3,2	27,6	0	14,7	3,6	28,5	0	14,4	3,1	28,5	0
	May	11,9	-1,9	26,8	3	12,0	0,0	26,8	0	12,1	-0,9	28,4	3
	Jun	8,2	-1,5	21,9	5	8,0	-1,8	21,8	2	8,0	-2,6	22,6	5
	Jul	8,6	-2,3	22,6	5	8,4	-3,1	21,6	5	8,7	-3,1	23,4	8
	Ago	10,1	-1,8	25,7	3	10,1	-1,6	27,1	3	10,5	-1,6	27,5	2
	Sep	12,8	2,2	28,6	0	12,7	3,3	28,1	0	12,9	1,8	28,3	0
	Oct	14,8	2,7	28,9	0	14,4	3,7	29,0	0	14,7	4,0	30,0	0
	Nov	18,8	3,8	34,6	0	18,8	4,6	34,5	0	18,5	5,6	34,4	0
	Dic	20,7	8,0	34,2	0	19,9	6,2	34,3	0	19,4	7,4	34,2	0
2019	Ene	22,0	9,0	37,3	0	21,2	7,8	39,5	0	20,5	8,4	38,6	0
	Feb	20,1	7,4	36,9	0	21,0	8,1	38,0	0	20,3	6,9	38,0	0
	Mar	17,6	3,8	33,2	0	18,1	6,2	34,5	0	17,7	3,1	34,8	0
	Abr	14,8	3,0	33,6	0	14,7	2,8	33,4	0	14,4	2,5	33,9	0
	May	11,5	-1,0	25,8	2	11,2	-0,2	26,1	1	11,1	-2,0	26,5	3
	Jun	9,4	-1,3	21,8	1	8,8	-1,1	20,7	1	9,2	0,0	19,3	0
	Jul	8,6	-1,6	24,2	4	8,2	-1,7	24,9	4	8,4	-1,9	25,0	3
	Ago	10,9	-1,3	27,1	3	10,8	-1,6	25,6	3	11,1	-2,3	27,1	2
	Sep	12,1	-0,7	26,0	1	11,9	1,3	26,3	0	11,7	0,1	25,4	0
	Oct	15,4	0,4	30,3	0	15,1	-0,2	30,8	1	15,0	0,1	31,9	0

T. mín. abs: Temperatura mínima absoluta del mes; T. máx. abs: Temperatura máxima absoluta del mes. N° H: Número de heladas.

Cuadro 4. Evapotranspiración referencial (ET_o), precipitación (Pp) y déficit de presión de vapor máxima promedio (DPV máx χ), en las tres zonas de ensayo, desde junio de 2017 a octubre de 2019.

Año	Mes	Santa Amelia			Peumo			La Rosa		
		ET _o	PP	DPV máx χ	ET _o	Pp	DPV máx χ	ET _o	PP	DPV máx χ
		mm	mm	kPa	mm	mm	kPa	mm	mm	kPa
2017	Jun	27,5	162,8	0,5	27,5	136,3	0,5	27,6	141,4	0,6
	Jul	34,9	61,6	0,6	37,0	50,7	0,6	25,7	51,2	1,6
	Ago	54,6	69,4	0,7	46,9	86,8	0,7	44,6	123,0	1,0
	Sep	88,4	25,3	1,1	76,0	29,9	1,3	76,6	16,0	1,3
	Oct	114,6	38,7	1,3	112,5	29,7	1,7	120,5	34,8	1,6
	Nov	172,2	4,3	2,3	146,5	13,9	2,6	151,0	16,0	2,3
	Dic	203,1	0,0	3,0	178,3	0,1	3,4	176,8	0,0	2,9
2018	Ene	161,5	0,0	2,4	165,0	0,0	3,0	163,7	0,0	2,5
	Feb	140,6	0,5	2,7	133,7	0,0	3,1	137,2	0,2	2,8
	Mar	137,2	14,0	2,6	110,8	8,2	3,0	115,1	8,4	2,8
	Abr	84,2	2,0	1,6	60,8	0,4	1,7	63,1	2,4	1,6
	May	65,1	59,4	1,3	36,4	49,5	1,3	36,4	76,8	1,3
	Jun	40,7	90,3	0,7	23,8	103,7	0,7	19,8	95,2	0,7
	Jul	46,5	83,5	0,6	25,7	20,4	0,7	25,7	67,2	0,7
	Ago	66,8	27,6	1,0	46,6	36,4	1,1	46,1	36,6	1,1
	Sep	80,9	38,9	1,3	65,6	18,7	1,4	69,3	34,0	1,3
	Oct	115,1	17,5	1,6	99,8	31,1	1,7	93,3	6,2	1,6
	Nov	160,6	1,6	2,7	150,4	0,0	3,0	135,1	0,2	2,7
	Dic	186,1	0,0	2,9	169,7	0,0	3,2	152,6	0,0	2,7
2019	Ene	185,4	0,0	3,0	166,7	0,0	3,6	160,7	0,0	3,2
	Feb	137,6	0,3	2,8	129,4	0,0	3,5	117,2	0,0	3,0
	Mar	128,0	0,5	2,7	105,2	1,3	3,1	95,3	0,2	2,9
	Abr	78,6	3,3	1,8	54,3	2,6	1,8	49,1	2,4	1,8
	May	53,2	38,3	1,0	30,5	63,1	1,1	29,1	32,0	1,0
	Jun	45,4	110,7	0,7	21,4	60,8	0,7	20,7	81,0	0,7
	Jul	45,0	24,1	0,6	26,1	20,5	0,7	23,9	19,4	0,6
	Ago	70,6	4,0	1,2	45,4	0,1	1,2	47,0	0,6	1,2
	Sep	88,9	5,1	1,3	66,4	4,4	1,4	71,9	0,8	1,1
	Oct	124,0	3,6	2,1	105,8	0,7	2,3	116,6	1,0	2,1

Previo al establecimiento de los ensayos, se realizó un diagnóstico de la variabilidad temporal y espacial del vigor de los huertos, mediante el índice espectral de la vegetación, NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), obtenido a partir de imágenes satelitales del sensor MSI de Sentinel 2A (en el Capítulo 8, detalles de la metodología e interpretación de las imágenes generadas). La información de la variabilidad del vigor se utilizó para identificar las zonas más representativas de cada cuartel, de manera de

establecer la ubicación para la sonda de seguimiento continuo de humedad (FDR), seleccionando el lugar que permitiera tomar las mejores decisiones de riego. A su vez, se seleccionaron árboles cercanos a la sonda FDR para el establecimiento de los tratamientos, buscando homogeneidad en el tamaño de copa y nivel de floración, sin síntomas aparentes de plagas y enfermedades.

En cada especie, se estableció un ensayo de riego, durante dos temporadas, con diferentes tasas de reposición de agua de riego (Cuadro 5), tomando como control el tratamiento de riego del campo.

Cuadro 5. Tratamientos de reposición de agua, referidos al riego del campo, basado éste en mantener el contenido de agua en el suelo sobre la línea de gestión punto de recarga.

Especie	Tratamiento	Mes											
		S	O	N	D	E	F	M	A	M	Jn	Jl	Ag
Limonero	+20% R. Campo	+20%											
	R.Campo												
	-20% R. Campo	-20%											
Mandarino	+20% R. Campo	+20%											
	R.Campo												
	-40% R. Campo	-40%											
Naranja	R.Campo												
	-20% R. Campo	- 20%											
	+30% R. Campo	+30%											
	R. Campo y -20% F.C.P.C						-20%						
	R. Campo y -40% F.C.P.C						-40%						
Palto	R. Campo												
	-29% R. Campo	- 29%											
	+25% R. Campo	+25%											
	R. Campo y -29% F.C.P.C						-29%						
	R. Campo y -29% I.C.M.						-29%						

F.C.P.C: Fin de caída poscujaja

I.C.M: Inicio de caída de marzo (segunda caída fisiológica de frutos)

El tratamiento de referencia, o tratamiento “campo”, consistió en mantener el contenido de agua en el suelo sobre la línea de gestión (LG) punto de recarga durante toda la temporada, mientras que, en los otros tratamientos, se esperaba generar niveles de contenido de agua por sobre o por debajo de dicha línea de gestión, de manera de evaluar si el criterio de establecimiento de esta LG cumplía con mantener el cultivo con un estatus hídrico apropiado. Por otra parte, el estatus hídrico permitió validar la LG y evaluar si es factible ahorrar agua sin afectar el rendimiento. De esta manera, el riego se realizó en base a las LG

definidas para una sonda Enviroscan® (Sentek Sensor Technologies, Stepney, Australia) de seguimiento continuo del contenido volumétrico de agua de suelo (Θ_w), ubicada en una de las repeticiones del tratamiento campo (Figura 2).

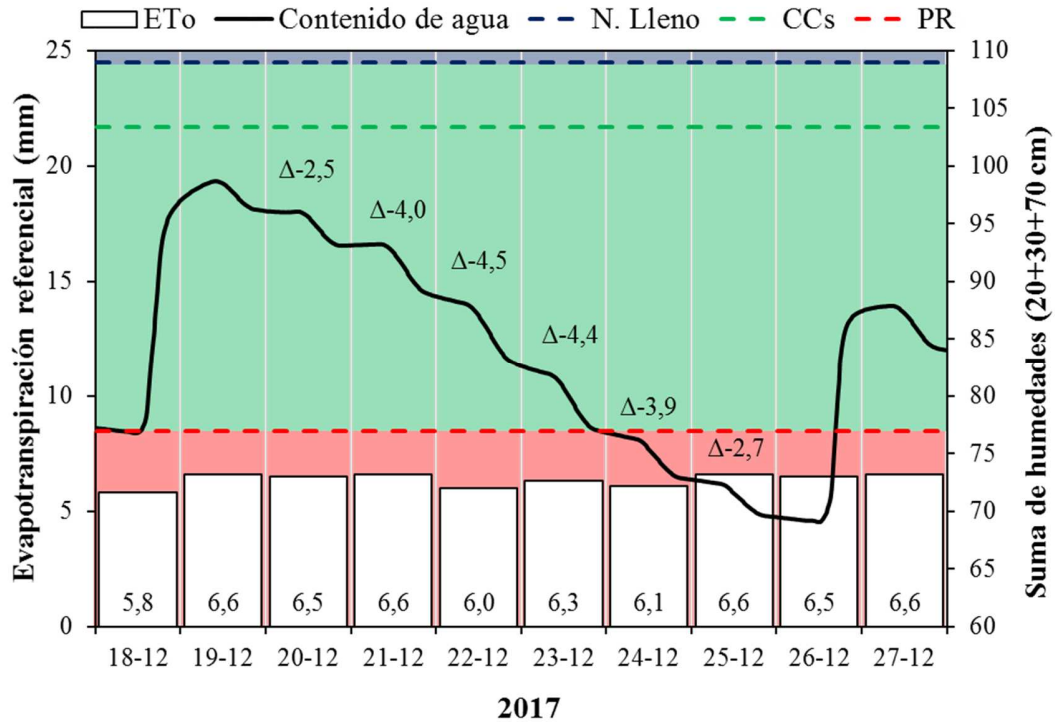


Figura 2. Evapotranspiración de referencia (ETo) diaria (barras blancas) y dinámica del contenido de agua (línea negra) donde existe mayor proporción de raíces, expresado como la suma de las lecturas de la sonda Enviroscan a 3 profundidades, en el ensayo en palto. Se incluye el consumo diario de agua (Δ) y las líneas de gestión: nivel de lleno (N. Lleno; línea azul); capacidad de campo sonda (CCs; línea verde), y punto de recarga (PR; línea roja).

En los otros tratamientos, se realizó un seguimiento quincenal del contenido de agua (Θ_w) antes del riego, con una sonda FDR Diviner 2000® (Sentek Sensor Technologies, Stepney, Australia). Paralelamente, se evaluó, cada 15 a 20 días, el déficit de presión de vapor (DPV) y el estatus hídrico de las plantas a mediodía (Ψ_x), con una cámara de presión Scholander (Scholander et al., 1965), siguiendo las recomendaciones de Turner (1988): en dos hojas maduras, completamente expandidas del follaje externo y sin fruta, en el tercio medio del árbol, en cuatro árboles por tratamiento. Las hojas se encerraron en sobres de plástico recubiertos de aluminio al menos 2 horas antes de la medición del mediodía (13:00-15:00), según lo propuesto por McCutchan y Shackel (1992).

A cosecha, se evaluaron los componentes del rendimiento: carga frutal, producción, peso medio de fruto y distribución de calibre (Cuadro 6).

Cuadro 6. Categorías de tamaño de fruto, en gramos o milímetros (diámetro ecuatorial), y valores de retorno de palta y frutos de cítricos, para la temporada 2018-2019.

Categorías y valores de retorno de calibres de exportación y mercado interno							
Palta		Mandarina		Naranja		Limón	
g	US\$/Kg	g*	US\$/Kg	mm*	US\$/Kg	mm*	US\$/Kg
<112	1,0	Pre calibre (<49,9)	0,3	7 (<70)	0,27	7 (45 - 47,9)	0,35
112 - 149,9	1,1	5 (50 - 59,9)	0,4	6 (70 - 72,9)	0,35	6 (48 - 52,9)	0,49
150 - 169,9	1,4	4 (60 - 74,9)	0,7	5 (73 - 76,9)	0,36	5 (53 - 57,9)	0,49
170 - 204,9	1,7	3 (75 - 89,9)	0,8	4 (77 - 81)	0,38	4 (58 - 62,9)	0,67
205 - 252,9	1,9	2 (90 - 99,9)	0,9	3 (81<)	0,41	> 3 (63<)	0,80
253 - 294,9	1,8	1 (100 - 107,9)	1				
295 - 329,9	1,8	1X (108<)	1,1				
330 - 369,9	1,8						
370<	1,8						

* El número asociado al rango del calibre corresponde al nombre de la categoría.

La cosecha de limones, mandarinos, naranjos y paltos se realizó en los meses de mayo a junio (2 a 3 pasadas), agosto, final de septiembre y octubre, respectivamente, en ambas temporadas. A su vez, como variables de calidad de la fruta, se midió la materia seca de la pulpa en palto (%), y el contenido de jugo, los sólidos solubles y la acidez en cítricos. Con los datos de los componentes del rendimiento, se calcularon algunos indicadores de eficiencia y rentabilidad:

Exportación: porcentaje de la producción exportable que sobrepasa un tamaño determinado de fruto, según la especie frutícola.

Agua aplicada: metros cúbicos de agua de riego aplicados por hectárea (ha) en la temporada, desde septiembre a mayo.

Eficiencia agronómica del uso del agua (EUAA): cantidad de kilogramos (kg) de fruta producida por metro cúbico de agua de riego aplicado.

$$EUAA = \frac{\text{producción} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right)}{\text{agua de riego aplicada} \left(\frac{\text{L}}{\text{ha}} \right)}$$

Huella hídrica: litros de agua necesarios para producir un kilo de fruta.

$$\text{Huella hídrica} \left(\frac{L}{kg} \right) = \frac{\text{agua de riego aplicada} \left(\frac{L}{ha} \right)}{\text{producción} \left(\frac{kg}{ha} \right)}$$

Gasto en electricidad: US\$ por ha gastados en electricidad durante la temporada de riego.

$$\text{Gasto eléctrico} \left(\frac{US\$}{año} \right) = \text{consumo bomba} \left(\frac{kW}{h} \right) \times \text{tiempo de riego} (h) \times \text{valor del kW} (US\$)$$

El valor del kW fue de 0,16 US\$ o \$111 CLP, considerando el valor del dólar de \$700 CLP.

Valor de la producción o ingresos:

$$\text{Ingresos} = \sum \left(\text{producción} \left(\frac{kg}{ha} \right) \times \% \text{ de cada calibre} \times \text{retorno neto por calibre} \left(\frac{US\$}{kg} \right) \right)$$

Los valores de retorno por calibre se obtuvieron de datos de exportadora en la temporada 2018-2019. En el caso de los calibres no exportables se otorgó un precio promedio del mercado interno.

Eficiencia monetaria del uso del agua (EMUA): ingresos (US\$) por la venta de la producción por cada metro cúbico de agua de riego aplicado.

$$EMUA \left(\frac{US\$}{m^3} \right) = \frac{\text{ingresos} \left(\frac{US\$}{ha} \right)}{\text{agua de riego aplicada} \left(\frac{m^3}{ha} \right)}$$

Rentabilidad de la gestión del agua (RGA): porcentaje de ganancia o pérdida de cada tratamiento respecto al riego de campo (línea de gestión).

$$\text{Rentabilidad tratamiento} = \text{ingresos} \left(\frac{US\$}{ha} \right) - \text{gasto eléctrico} \left(\frac{US\$}{ha} \right)$$

$$RGA = \frac{\text{Rentabilidad tratamiento } i}{\text{Rentabilidad tratamiento campo}} \times 100$$

Donde i corresponde a cada uno de los tratamientos diferentes al tratamiento campo.

Finalmente, cada tratamiento constó de 4 repeticiones, de 4 plantas contiguas cada una, evaluándose una de las plantas centrales. El diseño experimental, en todos los casos, fue en bloques completos al azar (DBCA), siendo la hilera de plantación el factor de bloqueo.

Resultados

En las dos temporadas, la evapotranspiración de referencia (ET_o), durante el periodo de mayor demanda de riego (septiembre-mayo), fue mayor en Santa Amelia (1166 y 1125 mm, 2017-2018 y 2018-2019, respectivamente) respecto de Peumo y La Rosa (1030 y 936 mm en promedio para el 2017-2018 y 2018-2019), las cuales no variaron notoriamente entre ellas (Cuadro 4). El déficit de presión de vapor máximo (DPV máx) en la zona de estudio varió desde 1,0 a 1,3 kPa, en septiembre, a 3,0 a 3,6 kPa, en enero. En relación con la temperatura, en general, Santa Amelia y La Rosa presentaron una mayor frecuencia, intensidad y periodo de heladas, las cuales ocurrieron desde mayo a septiembre, lo que afectó la producción del ensayo de limoneros la temporada 2018-2019 (Cuadro 7), por ser esta especie altamente sensible al daño por frío (Razeto, 2005).

Los indicadores fisiológicos de las plantas, los componentes del rendimiento y la calidad de la fruta permitieron evaluar las estrategias de riego, basadas en las líneas de gestión, establecidas a partir del registro de las sondas de capacitancia. En general, los resultados confirman que, en las cuatro especies, la línea de gestión de punto de recarga (PR), establecida basado en la disminución de la caída de humedad en el suelo, a una misma evapotranspiración referencial, es un criterio práctico para determinar el momento oportuno de riego, sin afectar el rendimiento (Cuadro 7) y/o la calidad (Cuadro 8), con ahorro de agua y electricidad. Mayores aportes de agua, o criterios de humedad por sobre la línea de gestión de PR, no mejoran ningún parámetro productivo y/o de calidad; por el contrario, en algunos casos (limonero, mandarino y naranjo), el mayor aporte de agua repercutió en una menor productividad, debido a un menor tamaño de los frutos. Probablemente, esta respuesta se generó por las propiedades físicas de los suelos en los que se realizaron los ensayos, texturas medias, con moderada compactación (Cuadro 2) y bajo nivel de macroporosidad, lo que generó situaciones de hipoxia frecuente durante la temporada. Esto confirma que, en suelos de texturas medias a finas (suelos pesados), de alta capacidad de retención de agua, pero de baja macroporosidad, los riegos de baja frecuencia (4 a 6 días) son más recomendables para mantener una óptima relación agua/aire y, así, un mejor metabolismo de las plantas. Al respecto, Ferreyra y Selles (2012) señalan que, para el caso de los paltos, en condiciones de suelos pesados, la frecuencia de riego puede alcanzar un nivel de agotamiento del agua de suelo disponible de un 50%; mientras que en suelos de texturas medias no se debe agotar el nivel de agua del suelo más allá del 25- 30% para no afectar el rendimiento. En complemento, nuestros resultados señalan que en un suelo franco arenoso el nivel de agotamiento permisible es de un 20% del total del agua disponible.

Por otro lado, los tratamientos con menor aporte de agua durante la temporada, con niveles de humedad incluso por debajo de la línea de gestión (Figura 3), no repercutieron significativamente en la productividad, a excepción del caso de mandarinos en la primera temporada (Cuadro 7). De hecho, en el caso de los cítricos, en algunas temporadas se logró un mayor contenido de sólidos solubles, sin afectar el porcentaje de jugo ni el tamaño del fruto, lo que indica un mejor desempeño del cultivo con un menor aporte de agua. En este sentido, un aumento en los sólidos solubles, y una mejor relación sólidos solubles/acidez, normalmente incrementan el precio de la fruta en mercados donde no sólo se valoran las características externas de la fruta (tamaño y apariencia), por lo que un riego adecuado se proyecta como una oportunidad para alcanzar una mejor rentabilidad.

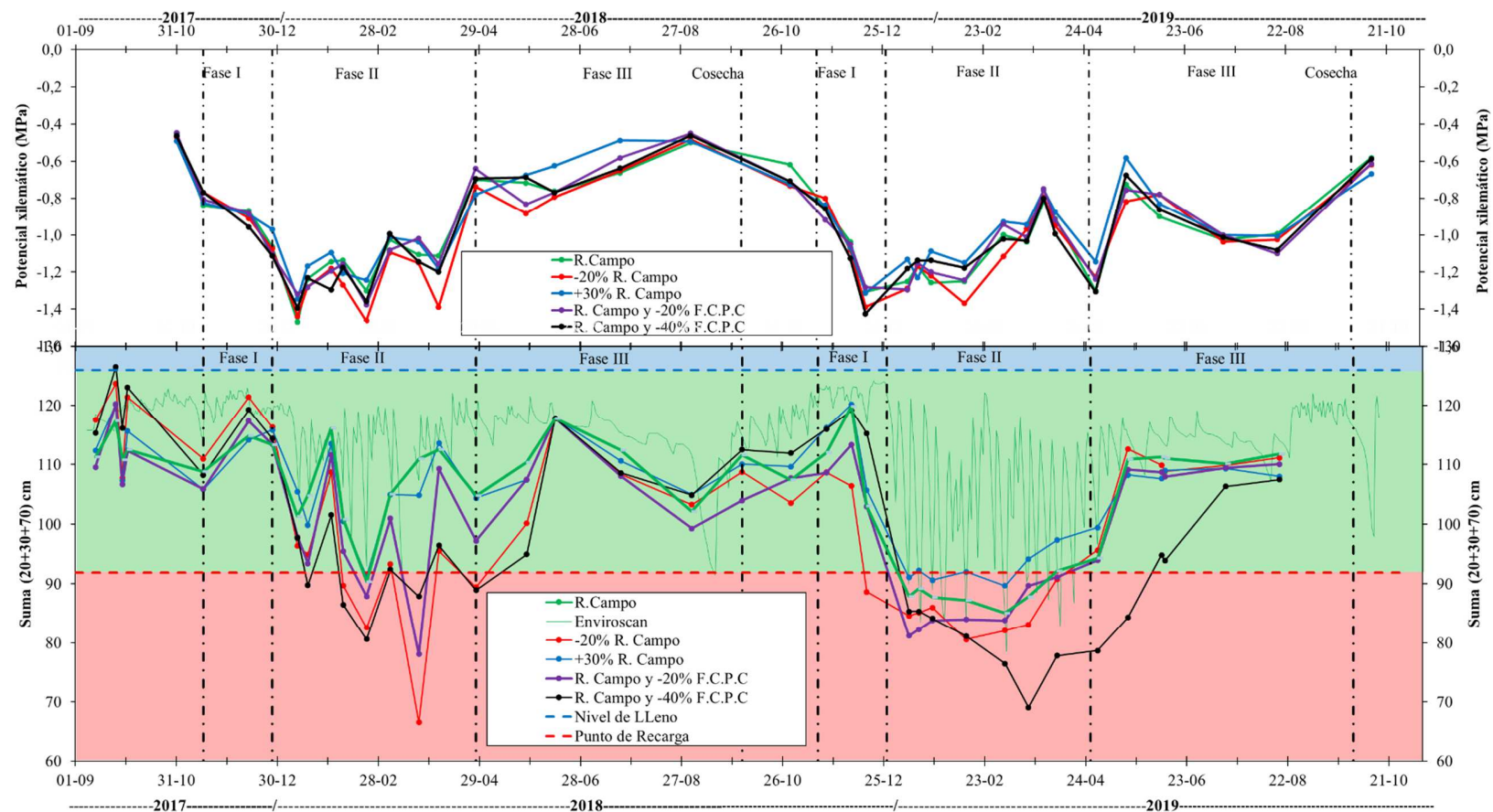


Figura 3. Dinámica del potencial xilemático (arriba) y contenido de agua en el suelo (abajo), expresado como la suma de las lecturas de humedad de los tres sensores con mayor actividad, en el ensayo en naranjo 'Lane Late', durante las temporadas 2017-2018 y -2018-2019. F.C.P.C: Fin de caída poscujaje.

Cuadro 7. Indicadores de productividad, rentabilidad y eficiencia hídrica y energética para los diferentes tratamientos y especies. Esos valores son sólo válidos para las condiciones en que se realizaron estos ensayos de riego.

Especie	Tratamiento	Productividad (t/ha)		Exportación (%) ^a		Agua aplicada (m ³ /ha) ^b		EUA (kg/m ³) ^c		Huella hídrica (L/kg) ^d		EMUA (US\$/m ³) ^e		Rentabilidad (%) ^f			
		1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año		
Limonero	+20% R. Campo	45,4	b	13,4		62	92	6.322	5.448	7,2	2,5	139	408	3,8	0,8	92	73
	R.Campo	47,4	ab	13,4	n.s.	75	95	5.268	4.540	9,0	2,9	111	340	4,9	1,3	100	100
	-20% R. Campo	50,6	a	14,2		77	95	4.215	3.632	12,0	3,9	83	255	6,7	2,0	109	125
Mandarino	+20% R. Campo	41,4	ab	26,2		72	86	6.088	5.413	6,8	4,8	147	206	4,6	4,4	103	94
	R.Campo	44,6	a	28,5	n.s.	64	87	5.073	4.511	8,8	6,3	114	158	5,4	5,6	100	100
	-40% R. Campo	35,5	b	27,4		49	90	3.044	2.707	11,7	10,1	86	99	6,3	9,0	71	96
Naranja	R.Campo	72,7		45,4	a	22	84	5.706	4.802	12,7	9,4	79	106	4,4	3,7	100	100
	-20% R. Campo	80,7		43,9	a	34	85	4.565	3.842	17,7	11,4	57	88	6,1	4,5	115	99
	+30% R. Campo	80,4	n.s.	42,4	ab	35	72	7.418	6.243	10,8	6,8	92	147	3,7	2,6	108	86
	R. Campo y -20% F.C.P.C	81,0		45,4	a	35	83	5.106	4.353	15,9	10,4	63	96	5,5	4,1	115	101
	R. Campo y -40% F.C.P.C	77,8		41,7	b	33	79	4.507	3.913	17,3	10,7	58	94	6,0	4,2	111	93
Palto	R.Campo	47,7	a	41,8		95	98	10.335	11.635	4,6	3,6	217	278	8,2	6,5	100	100
	-29% R. Campo	46,3	ab	40,0		91	93	7.338	8.261	6,3	4,8	159	207	11,1	8,6	96	95
	+25% R. Campo	47,7	a	41,8	n.s.	94	96	12.919	14.544	3,7	2,9	271	348	6,5	5,1	99	99
	R. Campo y -29% F.C.P.C	43,0	b	41,8		90	95	7.993	9.174	5,4	4,6	186	220	9,4	8,1	89	100
	R. Campo y -29% I.C.M.	43,7	ab	39,2		89	93	8.949	10.187	4,9	3,9	205	260	8,5	6,9	90	93

^a Porcentaje de exportación equivale a los calibres de mayor valor económico: Limón (53< mm o 90< g); Mandarina (60< mm o 90< g); Naranja (77< mm o 226< g); Palta (60< mm o 170< g).

^b Agua de riego aplicada desde septiembre a mayo.

^c EUA: Eficiencia agronómica del uso del agua; cantidad de kilogramos de fruta producida por metro cúbico de agua de riego aplicado.

^d Huella hídrica: litros de agua necesarios para producir un kilogramo de fruta.

^e EMUA: Eficiencia monetaria del uso del agua; ingresos (US\$) que se obtienen por la venta de la producción por cada m³ de agua de riego aplicado.

^f Rentabilidad: porcentaje de ganancia o pérdida de cada tratamiento respecto al riego del campo (línea de gestión).

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de LSD-Fisher (p<0,05). n.s: sin diferencias significativas.

F.C.P.C: Fin de caída poscujaje.

I.C.M: Inicio de caída de marzo (segunda caída fisiológica de frutos).

Cuadro 8. Calidad de la fruta de los ensayos según tratamiento de riego.

Especie	Tratamiento	Peso medio (g)		Jugo (%)		Sólidos solubles (SS) (%)		Acidez (%)		I. madurez (SS/acidez)	
		1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año	1 ^{er} Año	2 ^{do} Año
Limonero	+20% R. Campo	98,9 c	116,2 n.s.	32,2	37,8	8,5	7,7	-	-	-	-
	R. Campo	106,4 b	118,9	32,6	36,4	8,1	7,7				
	-20% R. Campo	113,3 a	123,7	31,8	35,5	8,3	7,7				
Mandarino	+20% R. Campo	68,3 ab	77,7	59,8	57,2	11,1 b	12,4 n.s.	2,2 b	-	5,2	-
	R. Campo	73,4 a	81,6	60,1	56,0	11,2 b	12,0	2,0 b		5,6	
	-40% R. Campo	61,2 b	77,3	60,1	53,9	13,8 a	13,2	2,6 a		5,3	
Naranja	R. Campo	210,8 n.s.	270,1 a	53,5	43,2	9,3 b	9,8 b	1,0 n.s.	1,0	10,4	9,6 b
	-20% R. Campo	227,3	260,4 b	52,4	43,0	10,5 a	10,1 b	1,0	1,0	10,7	10,2 ab
	+30% R. Campo	231,5	244,9 c	50,7	42,7	9,6 b	10,0 b	0,9	0,9	10,4	10,0 ab
	R. Campo y -20% F.C.P.C	228,1	267,8 ab	50,4	43,8	9,6 b	10,3 ab	1,0	1,1	10,0	9,1 b
	R. Campo y -40% F.C.P.C	223,3	255,6 bc	52,0	43,1	10,1 a	10,9 a	1,0	1,0	10,8	11,4 a
Especie	Tratamiento	Peso medio (g)								Materia seca (%)	
		1 ^{er} Año	2 ^{do} Año					1 ^{er} Año	2 ^{do} Año		
Palto	R. Campo	245 a	241 a							23,3 ab	21,8
	-29% R. Campo	231 ab	226 b							24,9 a	23,3
	+25% R. Campo	246 a	243 a							22,6 b	22,8
	R. Campo y -29% F.C.P.C	223 b	235 a							25,2 a	23,0
	R. Campo y -29% I.C.M.	228 b	227 ab							23,7 ab	23,3

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de LSD-Fisher ($p < 0,05$). n.s.: Sin diferencias significativas; F.C.P.C: Fin de caída poscujaje; I.C.M: Inicio de caída de marzo (segunda caída fisiológica de frutos).

La cosecha de mandarinos fue anticipada, por lo que los valores de acidez e índice de madurez están fuera del rango requerido para exportación (índice de madurez 10 o superior).

Un caso particular fue el ensayo en mandarinos, dado que, en la primera temporada, en la cual se presentó una alta carga frutal, el tratamiento con una reducción de aporte de agua de un 40% afectó significativamente el peso de fruto y, por lo tanto, la productividad y la proporción de fruta exportable (Cuadro 7). No obstante, la reducción en rentabilidad (ingresos (producción x calibre x precio/calibre) – gastos en agua y electricidad) fue sólo de un 4%, en comparación al tratamiento campo, indicando que es posible reducir el aporte de agua sin afectar significativamente la rentabilidad del cultivo. Esto concuerda con experiencias previas de riego deficitario en la fase II de crecimiento (fase de expansión celular) (Ballester et al., 2011; Gasque et al., 2016; Ginestar y Castel, 1996; González-Altozano y Castel, 2000, 1999), donde se reporta que se puede ahorrar entre un 10 y un 27% de agua, en los meses de enero y febrero, sin afectar la producción ni el tamaño de fruto. Los resultados de este ensayo mostraron que es posible ahorrar entre un 9 y un 21% de agua en naranjos ‘Lane Late’.

En este sentido, para evitar efectos negativos en el rendimiento y lograr una óptima programación del riego, es necesario generar valores referenciales del estatus hídrico de las plantas no estresadas, las cuales son cultivo-específicas (Pérez-Pastor et al., 2016; Shackel, 2007). Estudios previos en ‘Clementina de Nules’ (Ballester et al., 2011; González-Altozano y Castel, 1999), naranjos ‘Lane Late’ (Ballester et al., 2013) y naranjos ‘Navelina’ (Gasque et al., 2016) señalan que se pueden mantener ciertos niveles de estrés durante el verano, evaluados a través del potencial xilemático, sin afectar el rendimiento, permitiendo un ahorro de agua significativo.

Al respecto, los resultados de este ensayo concuerdan con lo reportado por Ballester et al. (2013), en España, quienes señalan que el rango óptimo de potencial xilemático en naranjo ‘Lane Late’ se debe mantener entre -1,2 y -1,3 MPa, rango en el cual estuvieron los tratamientos que no presentaron mermas productivas en ninguna de las temporadas (Figura 3). No obstante, los indicadores de estatus hídrico de la planta, no sólo son afectados por el contenido de agua en el suelo, sino que también dependen de las condiciones climáticas o de la fenología del cultivo (Abrisqueta et al., 2012; Acevedo-Opazo et al., 2010; McCutchan y Shackel, 1992; Naor, 2006; Naor et al., 2008; Stewart et al., 2011). Es por ello que, en el Capítulo 6, se entregan las líneas bases de referencia de potencial xilemático generadas en este proyecto, en función del DPV, como una herramienta práctica para establecer y/o validar las líneas de gestión en paltos y cítricos y, así, optimizar el uso del agua.

Respecto a los resultados en palto, en la primera temporada, los tratamientos con menor aporte de agua alcanzaron niveles de humedad en el suelo por debajo de la línea de gestión de punto de recarga, mientras que, en la segunda temporada, todos los tratamientos se mantuvieron por sobre esta LG, aunque el tratamiento -29% R. Campo alcanzó frecuentemente niveles cercanos a la LG de punto de recarga durante el verano (Figura 4). El potencial xilemático alcanzó niveles de estrés moderado, entre -0,6 y -0,9 MPa (Ferreira y Selles, 2012), en los tratamientos restrictivos durante la primera temporada. Al respecto, se puede señalar que, en paltos, la conductancia estomática comienza a declinar progresivamente con niveles de potencial xilemático de -0,4 MPa, y continúa hasta cerrar estomas completamente (bloquear la transpiración) y, como consecuencia, limitar la fotosíntesis, con niveles de -1,0 a -1,2 MPa (Wallberg et al., 2014).

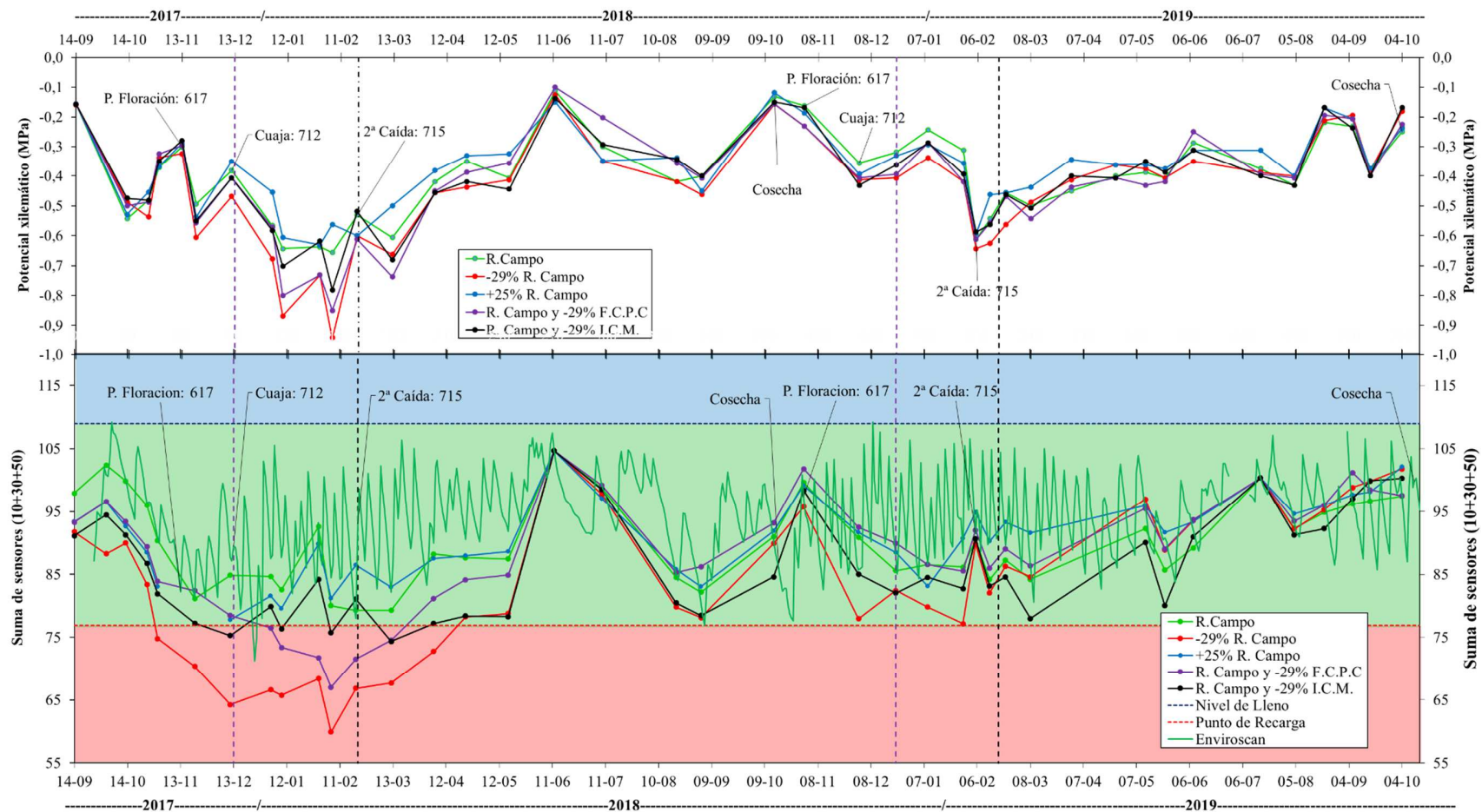


Figura 4. Dinámica del potencial xilemático (arriba) y contenido de agua en el suelo (abajo), expresado como la suma de las lecturas de humedad de los tres sensores con mayor actividad, en el ensayo en palto ‘Hass’, durante las temporadas 2017-2018 y -2018-2019. F.C.P.C: Fin de caída poscuaje; I.C.M: Inicio de caída de marzo (segunda caída fisiológica de frutos). Los números asociados a la fenología corresponden a los códigos de la escala fenológica BBCH (Alcaraz et al., 2013). Cuadro 7. Indicadores de productividad, rentabilidad y eficiencia hídrica y energética para los diferentes tratamientos y ensayos.

Con relación a los componentes del rendimiento, se observó que ningún tratamiento afectó el número de frutos por árbol (datos no mostrados), por lo que las diferencias en producción se debieron a efectos en el tamaño de la fruta. En ambas temporadas, un mayor aporte de agua (13.000 a 14.500 m³/ha) no tuvo ningún efecto positivo en los componentes del rendimiento, en comparación al tratamiento R. Campo (10.300 a 11.600 m³/ha); por el contrario, se observó un retraso en la maduración en la primera temporada. Resultados similares han sido reportados previamente por Holzapfel et al. (2017) y Osorio et al. (2012), quienes alcanzaron los máximos rendimientos con riegos de 8.887 a 10.000 m³/ha, en la misma zona de estudio y en el valle del Limarí, Región de Coquimbo, respectivamente.

En la temporada 2017-2018, el tratamiento -29% R. Campo tuvo un leve efecto en el tamaño de fruto (6% menor tamaño) y, por lo tanto, en la productividad (4% de disminución) (Cuadro 7). Si bien los tratamientos de reducción de agua más tardíos no alcanzaron un nivel de potencial xilemático de estrés hídrico moderado, sí presentaron una disminución en el rendimiento, la cual fue igual o mayor que el tratamiento de menor aporte de agua durante toda la temporada (-29% R. Campo), sugiriendo que, en caso de tener una menor disponibilidad de agua de riego en la temporada, es recomendable “aclimatar” a la planta paulatinamente durante la primavera-verano, de manera de favorecer el crecimiento de raíces fuera de la zona del bulbo de mojamiento, de manera que exista un mayor volumen de raíces activas en los momentos de escasez de agua. A su vez, esta respuesta se debería a una adaptación bajo condiciones de menor disponibilidad de agua, al disminuir el crecimiento vegetativo aéreo y favorecer, así, el subterráneo, lo que permitiría reducir la evapotranspiración de la planta, al tener una menor superficie de transpiración. De todas maneras, si bien se observaron menores niveles productivos, estos fueron sólo de un 6% menos al R. Campo, manteniendo sobre un 90% de fruta exportable (Cuadro 7). Esto quiere decir que, si bien el palto en la zona de estudio disminuye su productividad con aportes de agua de entre 7.300 a 8.200 m³/ha, el impacto en el rendimiento y, por consiguiente, en la rentabilidad, es bajo.

En relación con los indicadores de eficiencia y rentabilidad, los cuales provienen de una extrapolación de los datos medidos por árbol a la hectárea (según marco de plantación), el naranjo se mostró como la especie con mayor eficiencia agronómica del uso del agua, seguida del limonero, el mandarino y, finalmente, el palto, con una eficiencia promedio en condiciones productivas de 14,3; 12; 8,8 y 4,1, respectivamente, en los tratamientos con mejor rentabilidad (Cuadro 8). Esto se traduce en una huella hídrica de 72; 83; 114 y 248, litros de agua por kg producido, en naranjo, limonero, mandarino y palto, respectivamente, estando por debajo a las huellas hídricas de referencia para Chile (Osorio, 2013) e indicando, así, que el uso de tecnología de control del riego es una solución de corto a mediano plazo eficaz para aumentar la eficiencia del uso de agua en la región.

Conclusiones y recomendaciones

En síntesis, la línea de gestión de punto de recarga, sustentada en un cambio de la pendiente en la curva de absorción de agua del suelo por la planta, a una misma evapotranspiración referencial, es un criterio práctico y eficaz para optimizar la eficiencia del uso del agua, sin afectar la productividad en paltos y cítricos.

En paltos, los riegos por debajo de esta línea de gestión repercuten en la productividad, mientras que los cítricos toleran niveles por debajo de la línea de gestión de punto de recarga sin afectar el rendimiento, permitiendo un ahorro de agua de riego de hasta un 21% y optimizando la eficiencia y la rentabilidad del uso del agua.

La validación de la línea de gestión de punto de recarga se puede realizar con las líneas bases de referencia del potencial xilemático, en función del DPV, generadas en este estudio (ver Capítulo 6).

Referencias

- ABRISQUETA, I.; J. VERA; L. TAPIA; J. ABRISQUETA AND M. RUIZ-SÁNCHEZ. 2012. Soil water content criteria for peach trees water stress detection during the postharvest period. *Agric. Water Manag.* 104: 62–67.
- ACEVEDO-OPAZO, C.; S. ORTEGA-FARIAS AND S. FUENTES. 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agric. Water Manag.* 97: 956–964.
- ALCARAZ, M.; T. THORP. AND J. HORMAZA. 2013. Phenological growth stages of avocado (*Persea americana*) according to the BBCH scale. *Sci. Hortic.* 164: 434–439.
- BALLESTER, C.; J. CASTEL; D. INTRIGLIOLO AND J. CASTEL. 2011. Response of Clementina de Nules citrus trees to summer deficit irrigation. Yield components and fruit composition. *Agric. Water Manag.* 98: 1027–1032.
- BALLESTER, C.; J. CASTEL; D. INTRIGLIOLO AND J. CASTEL. 2013. Response of Navel Lane Late citrus trees to regulated deficit irrigation: Yield components and fruit composition. *Irrigation Science*, 31: 333-341
- CALLEJAS, R.; J. VERA; C. KREMER; J. COVARRUBIAS; C. BENAVIDES Y M. RIOSECO. 2014. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Serie Ciencias Agronómicas No 23, Santiago, Chile.
- FERREYRA, R. AND G. SELLÉS. 2012. Avocado, In: STEDUTO, P.; T. HSIAO; E. FERERES AND D. RAES. (Eds.), *Crop Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 66, Rome, Italy, pp. 414–432.

- GASQUE, M.; P. MARTÍ; B. GRANERO AND P. GONZÁLEZ-ALTOZANO. 2016. Effects of long-term summer deficit irrigation on “Navelina” citrus trees. *Agric. Water Manag.* 169: 140–147.
- GINESTAR, C. AND J. CASTEL. 1996. Responses of young clementine citrus trees to water stress during different phenological periods. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 71: 551–559.
- GONZÁLEZ-ALTOZANO, P. AND J. CASTEL. 2000. Regulated deficit irrigation in “Clementina de Nules” citrus trees. II: Vegetative growth. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75: 388–392.
- GONZÁLEZ-ALTOZANO, P. AND J. CASTEL. 1999. Regulated deficit irrigation in “Clementina de Nules” citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 74: 706–713.
- HOLZAPFEL, E.; J. DE SOUZA; J. JARA AND H. GUERRA. 2017. Responses of avocado production to variation in irrigation levels. *Irrig. Sci.* 35: 205–215.
- McCUTCHAN, H. AND K. SHACKEL. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117: 607–611.
- NAOR, A. 2006. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards, In: Janick, J. (Ed.), *Horticultural Reviews*. John Wiley & Sons, Oxford, UK, pp. 111–165.
- NAOR, A.; S. NASCHITZ; M. PERES AND Y. GAL. 2008. Responses of apple fruit size to tree water status and crop load. *Tree Physiol.* 28: 1255–1261.
- OSORIO, A.; A. SALVATIERRA; A. IBACACHE; M. BURGOS; M. CORTÉS Y K. ARAYA. 2012. Riego en mandarinos y paltos: Resultados de investigación en el valle del Río Limarí, Región de Coquimbo. Boletín INIA N°240. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Intihuasi, La Serena, Chile.
- OSORIO, A. 2013. Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. 211 p. Serie Actas N° 50. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi, La Serena, Chile
- PÉREZ-PASTOR, A.; RUIZ-SÁNCHEZ MC. AND CONESA M, 2016. Drought stress effect on plant yield. In: *Water stress and crop plants: A sustainable approach*; Parvaiz Ahmad (Ed). Chapter 22. pp: 356-374.
- RAZETO, B., 2005. El Limonero. Bruno Razeto. ed. Santiago, Chile.

- SCHOLANDER, P.; H. HAMMEL; E. BRADSTREET AND E. HEMMINGSEN. 1965. Sap pressure in vascular plants negative hydrostatic pressure can be measured in plants . Science, 148: 339–346.
- SHACKEL, K. 2007. Water relations of woody perennial plant species. J. Int. des Sci. la Vigne du Vin, 41: 121–129.
- STEWART, W.; W. STEWART; A. FULTON; W. KRUEGER; B. LAMPINEN; AND K. SHACKEL. 2011. Regulated deficit irrigation reduces water use of almonds without affecting yield. California Agriculture, 65: 90-95.
- THOMPSON, R.; M. GALLARDO; L. VALDEZ AND M. FERNÁNDEZ. 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. Agric. Water Manag. 88: 147–158.
- TURNER, N. 1988. Measurement of Plant Water Status by the Pressure Chamber Technique. Irrig. Sci. 9: 289–308.
- VERA, J.; I. ABRISQUETA; J. ABRISQUETA AND M. RUIZ-SÁNCHEZ. 2013. Effect of deficit irrigation on early-maturing peach tree performance. Irrig. Sci. 31: 747–757.
- VERA, J.; W. CONEJERO; R. CONESA AND M. RUIZ-SÁNCHEZ. 2019. Irrigation factor approach based on soil water content : A nectarine orchard case study. Water, 11: 1–15.
- WALLBERG, B.; V.MUÑOZ; F. ALFARO; M. TALAMILLA; M. NAVARRO Y N. FRANK. 2014. Respuesta fisiológica de plantas jóvenes de vid, palto y olivo sometidas a distintos periodos de sequía estival, En: Tapia, M.L. (Ed.), 65º Congreso Anual de la Sociedad Agronómica de Chile. SIMIENTE, Santiago, Chile, 190p.

CAPÍTULO 6. RELACIONES HÍDRICAS EN PALTOS Y CÍTRICOS

Victor Beyá-Marshall, Cristián Kremer F. y Brian Baeza S.

Chile presenta una grave crisis de disponibilidad hídrica, especialmente en las zonas de clima semiárido a árido (centro-norte del país), donde la relación demanda/disponibilidad se ve afectada por la escasa precipitación recibida durante los últimos 10 años (entre un 25 a 45% menos) y la alta competencia por este recurso entre los distintos actores económicos y sociales (Garreaud et al., 2017; 2020). Se estima que este escenario se va a amplificar hacia mediados del siglo 21, con una reducción de entre un 20 a un 30% de las precipitaciones actuales (Santibáñez et al., 2014). La sequía estructural que enfrenta Chile requiere el desarrollo urgente de estrategias de manejo agronómico que aumenten la eficiencia del uso del agua (EUA) de los sistemas productivos (kg de fruta/m³ de agua aplicado), especialmente en especies con requerimientos hídricos medios a altos, y sensibles al estrés hídrico, como paltos y cítricos (Fererres, 2012). En este sentido, el RDC (riego deficitario controlado) ha sido una técnica efectiva para aumentar la productividad del agua (EUA), sin afectar significativamente la producción y calidad de los cultivos (Galindo et al., 2017). Para poder llevar a cabo con éxito el RDC es necesario responder algunas preguntas: ¿cuándo y cuánto menos se puede regar sin afectar la productividad y la calidad en el corto y mediano plazo?

Para responder lo anterior, es necesario generar conocimiento acerca de cómo el contenido de agua en un suelo afecta las respuestas fisiológicas y de crecimiento de los cultivos en las diferentes etapas fenológicas. Esto es relevante para la optimización de la gestión del riego, sobre todo en ambientes áridos y semiáridos, donde el agua debe ser aplicada de manera eficiente. Así, el entendimiento de las relaciones hídricas suelo-planta-atmósfera permite mejorar la programación del riego, haciendo eficaz el uso de las tecnologías (como las sondas de capacitancia) que ayudan a gestionar el riego. A continuación, se presentan algunos conceptos de la relación suelo-planta-atmósfera y determinaciones de las relaciones hídricas en paltos y cítricos obtenidas en este proyecto.

Fundamentos de la relación suelo-agua-planta-atmósfera.

Adaptado de Silva et al. (2015)

El agua en el suelo tiene una energía determinada, o potencial hídrico total (Ψ), que depende de la cantidad de agua que haya en el suelo y de todos los campos de fuerzas que actúan sobre ella: gravitacional, mátrico, solutos, tensión superficial, cohesión, etc.; no obstante, los dos últimos no son considerados en la expresión por estar diluidos con el efecto capilar, el cual se explica a través del potencial mátrico. El potencial hídrico total es la energía libre por mol de agua, es decir la capacidad del agua de realizar trabajo; los campos de fuerza indicados disminuyen la energía libre del agua, es decir su capacidad de

desplazarse; de esta forma, si al agua se le agregan solutos (sales), por ejemplo, estos interactúan con ella, disminuyendo su energía libre, en contraste con la situación ideal del agua pura y sin ninguna fuerza que la ligue (agua “libre”), salvo la presión ambiental (1 atm) y la gravitacional. Dado que a estos últimos se les considera el potencial de referencia, adoptan el valor “0” para el agua pura, por lo que los valores de potencial hídrico son siempre negativos y más negativos a medida que se le resta energía libre y, por ende, mayor la energía que se requiere para mover el agua.

El potencial hídrico (Ψ) se puede expresar como la suma de sus componentes:

$$\Psi = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_s$$

Donde: ψ_g es potencial gravitacional; ψ_p es potencial de presión; ψ_m es potencial mátrico o de suelo, y ψ_s es el potencial de solutos, o potencial osmótico.

El potencial agua puede expresarse en unidades de energía por unidad de masa o volumen, siendo la unidad de uso más corriente el MegaPascal (MPa = 10 bares), aunque también se ha utilizado atmósferas, bares (1 bar = 0.987 atm) y Jkg^{-1} (1 bar = 100 Jkg^{-1}).

Potencial gravitacional (ψ_g). Es el trabajo que se realiza al trasladar una cantidad infinitesimal de agua respecto a un nivel de referencia. Entonces, de acuerdo a la posición de este nivel de referencia, el potencial será positivo o negativo, si es que está sobre o bajo el mismo.

Potencial de presión (ψ_p). Está referido a la presión atmosférica. Su valor es cero o positivo en la presencia de una columna de agua.

Potencial mátrico (ψ_m). Es la reducción de energía del agua debido a las fuerzas de cohesión y adhesión entre moléculas de agua-agua y agua-sólido. Dado que en el suelo existen poros con aire y agua, se produce el fenómeno de tensión superficial. La magnitud en que disminuye la energía libre es función del radio de los poros: a mayor radio, mayor es el potencial mátrico. Por ello, un suelo con mayor contenido de arcilla retiene más agua, porque la porosidad fina es más alta que en un suelo arenoso.

Potencial de solutos (ψ_s) o potencial osmótico (ψ_o). Es la reducción de energía del agua debido a la presencia de solutos. Adquiere importancia cuando el agua está separada por una membrana semipermeable, como se presenta en las células. Su valor es negativo.

Desde el punto de vista de potenciales, el agua se desplaza entre dos puntos con distinto potencial hídrico siempre de mayor a menor (de menos negativo a más negativo). Es por ello que el agua se mueve desde el suelo hacia la raíz; luego se transporta de manera pasiva dentro de la planta mediante tubos (xilema), llega a la hoja, y es transpirada como vapor de agua a través de los estomas (poros) a la atmósfera, la cual tiene un potencial muy negativo (Figura 1).

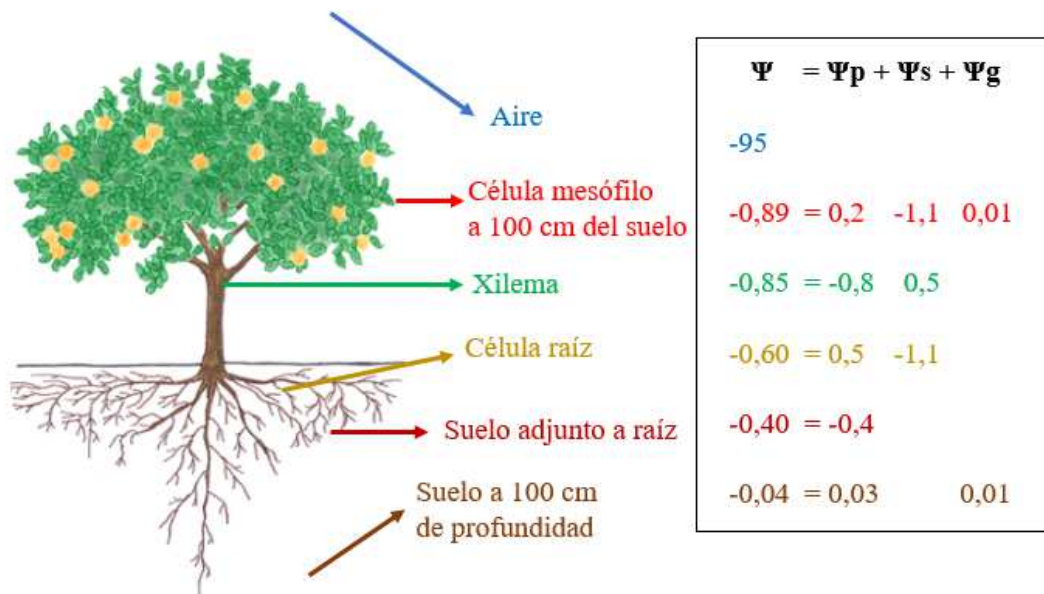


Figura 1. Valores de los componentes del potencial hídrico en el suelo y en la planta, expresados en MPa (adaptado de Silva et al., 2015).

Relaciones hídricas en paltos y cítricos

La cantidad de agua que fluye a través de la planta depende de la disponibilidad de agua del suelo, de las características estructurales y funcionales de la planta y de las condiciones atmosféricas. En cada momento de su vida, el estado hídrico de la planta depende del balance entre el agua que absorbe del suelo y la que pierde por transpiración. Así, por ejemplo, cuando el suelo disminuye su contenido de agua, la tensión que ejerce para retener el agua que queda aumenta, lo que se traduce en una disminución del potencial mátrico (se hace más negativo), reduciendo el potencial hídrico total del suelo. Por lo tanto, para que la planta pueda seguir extrayendo agua desde el suelo a la misma tasa y, así, responder a la demanda hídrica de la atmósfera, debe mantener el gradiente de potencial entre las hojas y el suelo. Para esto, la planta disminuye su potencial hídrico (se hace más negativo), lo que le permite continuar con la transpiración y mantener el intercambio gaseoso, fundamental para la fotosíntesis. De esta manera, la planta más que “detectar” el contenido de agua, “detecta” el potencial hídrico con que el agua está retenida en el suelo y, por lo tanto, la capacidad que tiene cada especie para extraer agua depende de su capacidad de disminuir su potencial hídrico sin afectar su fisiología. En este sentido, el palto es una especie con una baja capacidad para disminuir su potencial hídrico y extraer agua a niveles muy bajos de potencial hídrico del suelo.

De esta manera, surge la pregunta: ¿Qué tan fácilmente pueden sacar los paltos y cítricos el agua retenida por el suelo y hasta qué límite de tensión no se afecta el crecimiento o la producción de los cultivos?

La respuesta a esta pregunta puede ser medida a través de parámetros fisiológicos que indican el estatus hídrico de la planta, como el potencial hídrico de tallo o potencial xilemático, la conductancia estomática (grado de apertura de los estomas) y la temperatura del follaje, junto con evaluaciones del contenido de agua del suelo, o sea, el potencial mátrico al cual está retenida esa agua. Si bien estas variables fisiológicas permiten hacer un seguimiento del estado hídrico de la planta, muestran una gran variabilidad en función de las condiciones ambientales, por lo que es necesario normalizarlas por parámetros ambientales que expliquen esas diferencias. En este sentido, el déficit de presión de vapor (DPV), que integra a la temperatura y la humedad relativa, es uno de los parámetros que mejor representa esta condición (McCutchan y Shackel, 1992; Naor, 2010).

Así, por ejemplo, cuando la planta tiene agua fácilmente aprovechable en el suelo, el potencial hídrico de la planta depende, principalmente, de la demanda atmosférica (Figura 2). De este modo, se puede observar que cuando el DPV es más alto, la planta muestra un potencial hídrico más negativo (Figura 2A), aunque el contenido de agua del suelo es el suficiente y no genera un estrés en la planta, observándose que cada especie tiene una respuesta diferente a las variaciones del DPV; a esta curva de respuesta del potencial xilemático al DPV a un contenido de humedad en el suelo que no sea limitante se le denomina línea base de referencia (Shackel et al., 1997). Así, por ejemplo, si el potencial hídrico de una planta a una determinada temperatura y humedad relativa (DPV) se encuentra bajo la línea base de referencia para el cultivo, la planta está en niveles de estrés que afectan la producción y, por lo tanto, hay que volver a regar (Figura 2). De esta manera, se contesta la pregunta, ¿cuál es el momento óptimo de riego que no afecta la productividad y que permite ahorrar agua y electricidad? La gran ventaja de esta herramienta es que su uso permite ser extrapolado a diferentes zonas geográficas, dado que contempla la variable clima (DPV). A su vez, es una herramienta práctica para la programación del riego, dado que permite validar las líneas de gestión desarrolladas a partir de los registros de las sondas de humedad de suelo (Capítulo 4), principalmente la asociada al punto de recarga. Debido a que se trata de una verificación de la línea de gestión a nivel de planta, de que no se está generando un estrés, pueden considerarse tecnologías complementarias.

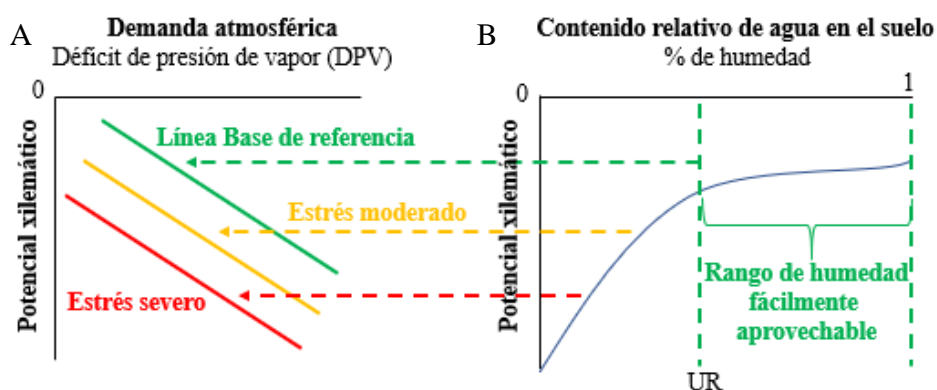


Figura 2. Relación entre el contenido de agua del suelo, y el estatus hídrico de la planta y la demanda atmosférica. UR = umbra de riego: contenido de agua en el suelo en el cual hay que volver a regar, sin afectar fisiológica y/o productivamente a la planta.

En este proyecto, se desarrollaron y validaron líneas base para paltos, limonero, naranjo y mandarino, a nivel planta, y cotejándolo con la producción, durante dos temporadas de evaluación, de manera de entregar una herramienta práctica para la optimización del recurso hídrico en la Región (Figura 3 y Cuadro 1). Al final del capítulo, se entregan planillas del potencial hídrico esperado para paltos y cítricos en condiciones de no estrés (cuadros 2; 3; 4; 5 y 6), según la temperatura y humedad relativa al momento de evaluación.

La línea base desarrollada en este estudio difiere de la reportada por Ferreyra et al. (2007) en paltos, quienes reportaron una línea base más “exigente”, es decir, a un mismo DPV se sugieren valores mayores de potencial xilemático (menos negativa) que los reportados en este estudio. Sin embargo, la curva de estos autores fue similar a la encontrada para el tratamiento de mayor aporte de agua. Por otro lado, la línea base reportada en este capítulo fue validada con resultados productivos, lo que la hace más confiable, y permite ahorrar cerca de un 30% del recurso hídrico, con respecto a la reportada por estos autores.

Por otro lado, la experiencia recopilada en estos ensayos sugiere que es importante que las mediciones se realicen en días completamente soleados, pues se observó que en días parcialmente nublados, o días con niebla o nubosidad hasta el mediodía, y luego despejado, el potencial xilemático fue más negativo de lo esperado, a pesar de tener agua disponible, sugiriendo condiciones de estrés sin estarlo, similar a lo señalado por Jones (2004) y Williams et al. (2012). En este sentido, zonas costeras, o con influencia marina, suelen presentar numerosos días con esta condición durante el verano, por lo que es importante considerar este aspecto antes de interpretar los datos y utilizar las líneas base de referencia antes mencionadas.

Otro aspecto a considerar es la presencia de fruta en los árboles, pues se observó que el potencial xilemático de los árboles sin fruta (posterior a la cosecha y hasta cuaje) no se asocian a las curvas presentadas, por lo que las líneas base reportadas son sólo válidas desde cuaje a cosecha, coincidentemente con el periodo en el que es importante tener un control exhaustivo del estatus hídrico de la planta. En este sentido, se generaron dos líneas base para limonero: una para árboles con media a alta carga frutal (50 t/ha) y otra para árboles de baja carga (14 t/ha) (Figura 3). Se observa que, cuando los árboles presentan menos carga frutal, los valores de potencial xilemático, a un mismo DPV, aumentan (son más cercano a 0), similar a lo reportado por Sadras y Trentacoste (2011) y Naor et al. (2008), debido a un mayor control estomático y aumento de los recursos hacia las raíces (Gucci et al., 1991; López et al., 2008; Marsal et al., 2008); no obstante, existen ciertos niveles de carga frutal (media a alta) en los cuales no existen diferencias en el potencial xilemático a un mismo DPV (Berman y DeJong, 1997; Ortuño et al., 2010; Intrigliolo y Castel, 2010; Naor, 2014).

De esta manera, plantas con baja carga frutal requieren menores tasas de riego que plantas con alta carga frutal, debido a que, mientras los frutos determinan la necesidad de fotoasimilados (capacidad sumidero o “demanda”), el riego determina la tasa de asimilación (capacidad de fuente u “oferta”); así, el balance o equilibrio entre ambos define la disponibilidad real de fotoasimilados, lo que puede verse reflejado en la cantidad de carbohidratos de reserva (fotoasimilados no utilizados) (Naor, 2014; Silber et al., 2013). La

carga frutal altera la relación entre el potencial xilemático y la conductancia estomática, pues disminuye el potencial a medida que aumenta la carga, pero se mantiene la apertura estomática (se mantiene la transpiración) y, como consecuencia, la tasa fotosintética. Esto sugiere que los árboles con mayor carga frutal extraen más agua que los de baja carga (Bengal et al., 2016; Silber et al., 2013). No obstante, a pesar del ajuste de las relaciones hídricas de los árboles, en función de la carga frutal, se deben mantener mayores potenciales xilemáticos (menos negativos) para maximizar el rendimiento comercial de los árboles con alta carga frutal.

Por otro lado, para la estimación de las variables meteorológicas, como temperatura y humedad relativa (HR), se requiere de acceso a datos, públicos o privados, de estaciones de medición continuas que estén instaladas en terreno o a través de instrumentos portátiles como los termohigrómetros. Equipos miden de forma instantánea, la temperatura y la HR en el huerto, y pueden ser utilizados en el mismo momento en que se están realizando las mediciones de potencial xilemático. En general, la información meteorológica de fuera del huerto suele entregar mayores valores de temperatura y menores niveles de HR que mediciones tomadas por un termohigrómetro dentro del huerto, lo que se traduce en valores de DPV mayores que los reales. Esto conlleva, a su vez, a estimaciones de potencial xilemático esperado por debajo de la línea base. Afortunadamente estas diferencias son pequeñas, por lo que no afectan de manera significativa las decisiones de la gestión del riego dentro de un huerto.

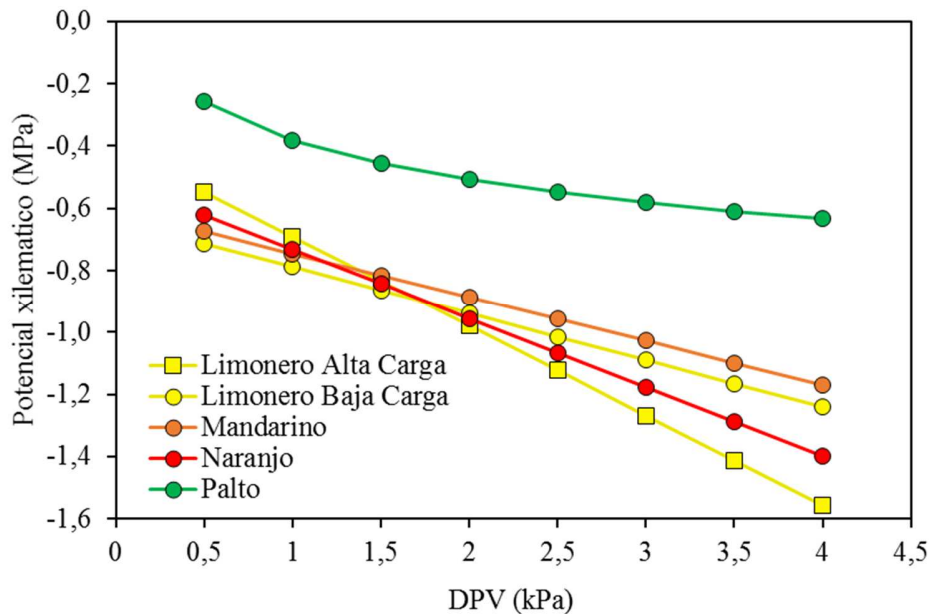


Figura 3. Líneas base de referencia de potencial xilemático, en función del déficit de presión de vapor.

Palto 'Hass' = $-0,181\ln(\text{DPV}) - 0,3819$ ($R^2 = 0,81$);

Limoneros 'Fino 49' con media-alta carga = $-0,2887(\text{DPV}) - 0,402$ ($R^2 = 0,88$);

Limoneros 'Fino 49' con baja carga = $-0,1511(\text{DPV}) - 0,6361$ ($R^2 = 0,71$);

Mandarinos 'W. Murcott' = $-0,2425(\text{DPV}) - 0,5382 (R^2 = 0,75)$;

Naranja 'Lane Late' = $-0,2154(\text{DPV}) - 0,5337 (R^2 = 0,71)$.

Metodología de evaluación

El empleo de indicadores fisiológicos de las plantas, relacionado con las condiciones climáticas y del suelo, pueden ser un método ideal para la programación del riego. Uno de los principales métodos, ha sido el establecimiento de umbrales del estatus hídrico para definir el momento óptimo de riego. De ellos, el potencial hídrico de hoja es ampliamente usado (Améglío et al., 1999), aunque, para la programación del riego en frutales, el potencial hídrico de tallo a medio día es significativamente más confiable (menor variación) y sensible que el de hoja, como indicador del estatus hídrico (Acevedo-Opazo et al., 2010; Ferreyra et al., 2007; McCutchan y Shackel, 1992; Naor, 2010, 2000; Stewart et al., 2011). Para medir el potencial hídrico, se ocupa una cámara de presión de tipo Scholander (Scholander et al., 1965), ya sea tradicional (Figura 4B) o modelo Pump-up (PMS Instrument Company, Oregon, EE.UU.) (Figura 4C). Esta última tiene la ventaja de tener una bomba de aire integrada, para producir la presión de aire necesaria para las mediciones, por lo que no se requiere una bombona externa de aire comprimido (Figura 4B); su limitación es que sólo alcanza hasta 2,0 MPa (Figura 4D), mientras la tradicional puede alcanzar hasta 8,0 MPa, lo que permite su uso a nivel científico para ensayos en vid vinífera u olivos.

Tal como se mencionó anteriormente, la relación entre el contenido de agua del suelo y el potencial hídrico xilemático es sencilla: a medida que el suelo se va secando, el potencial hídrico xilemático se volverá más negativo. Así, la cámara de presión mide la condición de humedad efectiva del suelo en todo el sistema radicular en su conjunto. Este sistema es muy diferente de los métodos de seguimiento basados en el suelo, donde sólo se evalúa la condición del suelo en una zona radical específica. Es así como, inmediatamente después de un riego de alta cobertura (aspersión, tendido o por surco), el potencial hídrico debe ser lo más parecido al valor de referencia, y a medida que el suelo se seca, el estatus hídrico de la planta tendrá una tendencia a ser más negativo que el valor de referencia. Por otro lado, para los sistemas de riego por goteo o microaspersores, que no humedecen todo el suelo, el potencial xilemático siempre tiende a ser algo más negativo que los valores de referencia, incluso después de un riego. Probablemente, esto se deba al hecho de que algunas raíces se encuentran en áreas de suelo no irrigadas y, por lo tanto, secas.

Otro aspecto importante para considerar es la salud del sistema radical; sí el sistema está enfermo provocará que el potencial hídrico xilemático sea más negativo que la línea de base, incluso en condiciones de suelo húmedo. Cualquier factor que influya en la salud de la raíz, como el daño físico, el daño por plagas, las infecciones por organismos patógenos o la mala aireación del suelo, probablemente, reducirán la capacidad de las raíces para absorber agua, y esto provocará que el estatus hídrico de la planta sea más negativo que la línea base de referencia.

Para la evaluación e interpretación (Cuadro 1 y Figura 5) de los valores obtenidos, es importante seguir la siguiente metodología:

- Medir antes de un riego, en un día completamente despejado (días nublados o parcialmente nublados alteran la medición, entregando valores más negativos de lo esperado).
- Medir entre las 12:30 y 16:30 h (horas de máxima demanda, mayor DPV).
- Seleccionar hojas adultas completamente expandidas, sombreadas, cerca de los troncos y de ramas sin fruta.
- Envolver completamente, con papel aluminio, 2 hojas por planta (unidad de observación; Figura 4A).
- En el caso del palto, medir luego de 30 a 45 min de envuelta la hoja; en cítricos, posterior a 90 min.
- Luego, hacer un corte recto y limpio del peciolo y medir inmediatamente, hasta 1 minuto después de cortada la hoja, sin quitar el envoltorio de aluminio. La medición se debe realizar a la sombra.
- Registrar la temperatura y humedad relativa cada vez que se inicie la medición de un cuartel, o cada 30 a 45 minutos, para el posterior cálculo del DPV.
- Medir en plantas sanas y con vigor normal (representativas del huerto). Dado que la carga frutal afecta la medición, es necesario medir plantas representativas de la condición del cuartel.



Figura 4. (A) Hojas de mandarina cubiertas con bolsa de aluminio para la medición de potencial xilemático a mediodía. (B) Cámara de presión tipo Scholander tradicional (Modelo 600) y (C y D) modelo Pump-up (PMS Instrument Company, Oregon, EE.UU.).

Ejemplo de interpretación.

Cuadro 1. Evaluaciones de potencial xilemático, a mediodía, previo a un riego en un campo de paltos ‘Hass’ con alta carga frutal.

Fecha	Ψ_x MPa	T °C	HR %	DPV kPa
28-diciembre	-0,55	30,1	41,4	2,50
03-enero	-0,50	33,2	43,9	2,85
07-enero	-0,70	31,9	40,5	2,81
15-enero	-0,80	32,2	41,3	2,82
24-enero	-0,50	34,4	35,0	3,54

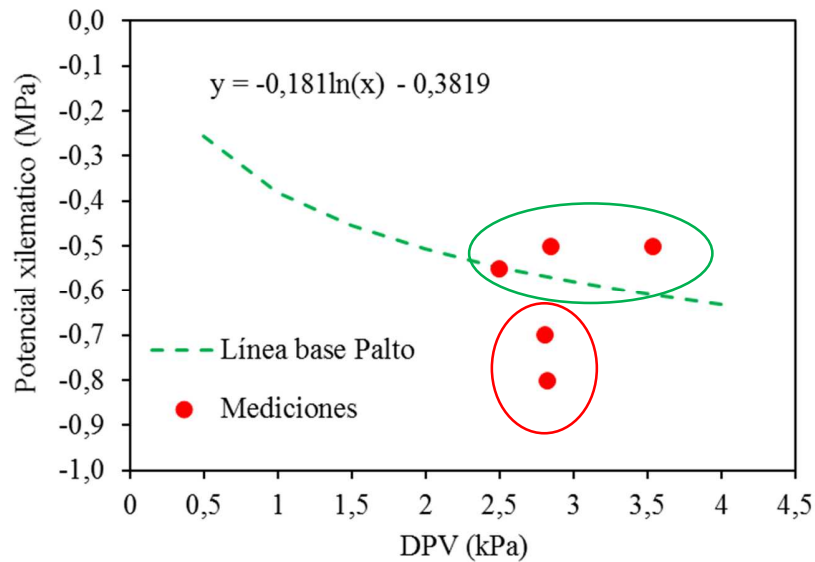


Figura 5. Potencial xilemático (MPa) en paltos ‘Hass’, con alta carga frutal, en función del déficit de presión de vapor (DPV). Círculos verdes representan lecturas de estatus hídrico óptimo (no es necesario regar aún); círculos rojos lecturas que muestran estrés (se debe regar). Datos del Cuadro 1.

Planillas del estatus hídrico esperado para paltos y cítricos en condiciones óptimas

Cuadro 2. Potencial xilemático a mediodía, esperado para un día despejado, en función de la temperatura y humedad relativa, durante el periodo de crecimiento de la fruta en limón 'Fino 49', con **baja carga frutal**, y sin limitaciones hídricas.

Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)									
	16	18	20	23	25	27	30	33	35	37
5	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,4	-1,4	-1,5
10	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5
15	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,4
20	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4
25	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,3
30	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,2	-1,3
35	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3
40	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2
45	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2
50	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1

Cuadro 3. Potencial xilemático a mediodía, esperado para un día despejado, en función de la temperatura y humedad relativa, durante el periodo de crecimiento de la fruta en limón 'Fino 49', con **media-alta carga frutal**, y sin limitaciones hídricas.

Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)									
	16	18	20	23	25	27	30	33	35	37
5	-0,9	-1,0	-1,0	-1,2	-1,3	-1,4	-1,6	-1,8	-1,9	-2,1
10	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,7	-1,9	-2,0
15	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,6	-1,8	-1,9
20	-0,8	-0,9	-0,9	-1,1	-1,1	-1,2	-1,4	-1,6	-1,7	-1,9
25	-0,8	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,6	-1,8
30	-0,8	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,7
35	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,6
40	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5
45	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4
50	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3

Cuadro 4. Potencial xilemático a mediodía, esperado para un día despejado, en función de la temperatura y humedad relativa, durante el periodo de crecimiento de la fruta en naranjo 'Lane Late', y sin limitaciones hídricas.

Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)									
	16	18	20	23	25	27	30	33	35	37
5	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,6	-1,7	-1,8
10	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,4	-1,5	-1,6	-1,8
15	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,6	-1,7
20	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6
25	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5
30	-0,8	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5
35	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4
40	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,3
45	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3
50	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2

Cuadro 5. Potencial xilemático a medio día, esperado para un día despejado, en función de la temperatura y humedad relativa, durante el periodo de crecimiento de la fruta en mandarina 'W. Murcott', y sin limitaciones hídricas.

Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)									
	16	18	20	23	25	27	30	33	35	37
5	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,7	-1,8	-2,0
10	-0,9	-1,0	-1,0	-1,2	-1,2	-1,3	-1,5	-1,6	-1,8	-1,9
15	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,6	-1,7	-1,8
20	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,2	-1,4	-1,5	-1,6	-1,8
25	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,6	-1,7
30	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6
35	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5
40	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5
45	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4
50	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3

Cuadro 6. Potencial xilemático a mediodía, esperado para un día despejado, en función de la temperatura y humedad relativa, , durante el periodo de crecimiento de la fruta en palto ‘Hass’, y sin limitaciones hídricas.

Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)									
	16	18	20	23	25	27	30	33	35	37
5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7
10	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7
15	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7
20	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7
25	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7
30	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
35	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
40	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
45	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6
50	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6

Conclusiones y recomendaciones

El potencial hídrico xilemático (Ψ_x) indica el estatus hídrico de la planta completa, por lo que se considera una herramienta confiable para la programación del riego. Este indicador del árbol, o del huerto, está directamente relacionado con la productividad y calidad de la fruta, por lo que es necesario comprender el significado de las mediciones fisiológicas del estatus hídrico, y como se asocian a la respuesta en el desempeño del huerto.

Es importante seguir el protocolo de medición para obtener datos confiables y representativos del huerto.

La línea base se debe considerar como una referencia importante para interpretar las mediciones de potencial xilemático, y no un valor en particular de potencial xilemático objetivo, dada la fuerte influencia de la demanda atmosférica en la medición. Si el concepto de línea base no es usado para ajustar las mediciones de Ψ_x a las condiciones meteorológicas, es posible sobre reaccionar a estos valores y, por lo tanto, regar cuando no es necesario, y viceversa.

La línea base deriva de modelos matemáticos y debe ser generada y validada con ensayos de campo, para una mayor confiabilidad de los datos sugeridos.

Las líneas base generadas permitirían determinar el momento óptimo de riego en otras localidades, sin afectar la productividad, y/o complementar el establecimiento de la línea de gestión de punto de recarga en sondas FDR.

Referencias

- ACEVEDO-OPAZO, C.; S. ORTEGA-FARIAS AND S. FUENTES. 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agric. Water Manag.* 97: 956–964.
- AMÉGLIO, T.; P. ARCHER; C. VALANCOGNE; S. DAYAU AND P. CRUIZIAT. 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant Soil* 207, 155–167.
- BEN-GAL, A.; A. BUSTAN; A. DAG; U. YERMIYAHU; R. EREL; E. PRESNOV ET AL. 2016. Fruit load governs transpiration of olive trees. *Tree Physiol.* 1–12.
- BERMAN, M. AND T. DEJONG. 1997. Crop load and water stress effects on daily stem growth in peach (*Prunus persica*). *Tree Physiol.* 17: 467–472.
- ORTUÑO, M.; W. CONEJERO; F. MORENO; A. MORIANA; D. INTRIGLILO; C. BIEL ET AL. 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97(1): 1-11
- FERERES, E. 2012. Fruit trees and vines, In: *Crop Yield Response to Water*. FAO. pp. 414–429.
- FERREYRA, R. G. SELLES; P. MALDONADO; J. CELEDÓN Y P. GIL. 2007. Efecto del clima, de las características de la hoja y de la metodología de medición en el potencial hídrico xilemático en palto (*Persea americana* Mill.). *Agric. técnica*, 67: 182–188.
- GALINDO, A.; J. COLLADO-GONZÁLEZ; I. GRIÑÁN; M. CORELL; A. CENTENO; M.J. MARTÍN-PALOMO ET AL. 2017. Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agric. Water Manag.* 202: 311-324.
- GARREAUD, R.; C. ÁLVAREZ-GARRETON; J. BARICHIVICH; J.P. BOISIER; D. CHRISTIE; M. GALLEGUILLOS; C. LE QUESNE; J. MCPHEE Y ZAMBRANO-BIGIARINI, M. 2017. The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 98: 1–37.
- GARREAUD, R.; J. BOISIER; R. RONDANELLI; A. MONTECINOS; H. SEPÚLVEDA AND D. AND VELOSO-ÁGUILA, D. 2020. The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40: 421–439.
- GUCCI, R.; C. XILOYANNIS AND A. JAMES. 1991. Gas exchange parameters, water relations and carbohydrate partitioning in leaves of field-grown *Prunus domestica* following fruit removal. *Physiologia Plantarum*, 83(3): 497–506.

- INTRIGLIOLO, D. AND J. CASTEL. 2010. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels : tree growth , yield and fruit quality. *Irrigation Science*, 28: 525–534.
- JONES, H. 2004. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *J. Exp. Bot.* 55: 2427–2436.
- LOPEZ, G.; A. ARBONES; M. MATA; C. PARIS; J. GIRONA; J. MARSAL ET AL. 2008. Root growth following defruiting improves peach tree water status. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 83: 804-808.
- MARSAL, J.; M. MATA; A. ARBONES; J. CAMPO AND G. LOPEZ. 2008. Factors involved in alleviating water stress by partial crop removal in pear trees. *Tree Physiology*, 28(9): 1375–1382.
- McCUTCHAN, H. AND K. SHACKEL. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117: 607–611.
- NAOR, A. 2014. Irrigation and crop load influence fruit size and water relations in field-grown ‘ Spadona ’ pear. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(2): 252-255.
- NAOR, A. 2010. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. In: JANICK, J. (Ed.), *Horticultural Reviews*. John Wiley & Sons, Oxford, UK, pp. 111–165.
- NAOR, A. 2000. Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Hortic.* 537: 447–454.
- NAOR, A.; S. NASCHITZ; M. PERES AND Y. GAL. 2008. Responses of apple fruit size to tree water status and crop load. *Tree Physiol.* 28: 1255–1261.
- SADRAS, V. AND TRENTACOSTE, E. 2011. Phenotypic plasticity of stem water potential correlates with crop load in horticultural trees. *Tree*, 31: 494–499.
- SANTIBÁÑEZ, F., SANTIBÁÑEZ, P., CAROCA, C., MORALES, P., GONZÁLEZ, P., GAJARDO, N., PERRY, P. Y MELILLÁN, C. 2014. Atlas del Cambio Climático en las Zonas de Régimen Árido y Semiárido. Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- SHACKEL, K.; H. AHMADI; W. BIASI; R. BUCHNER; D. GOLDHAMER; S. GURUSINGHE ET AL. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *Horttechnology*, 7: 23–29.

- SCHOLANDER, P.; H. HAMMEL; E. BRADSTREET AND E. HEMMINGSEN. 1965. Sap pressure in vascular plants negative hydrostatic pressure can be measured in plants . Science, 148: 339–346.
- SILBER, A.; A. NAOR; Y. ISRAELI AND S. ASSOULINE. 2013. Combined effect of irrigation regime and fruit load on the patterns of trunk-diameter variation of “Hass” avocado at different phenological periods. Agric. Water Manag. 129: 87–94.
- SILVA, P.; H. SILVA; M. GARRIDO Y E. ACEVEDO. 2015. Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- STEWART, W.; W. STEWART; A. FULTON; W. KRUEGER; B. LAMPINEN AND K. SHACKEL. 2011. Regulated deficit irrigation reduces water use of almonds without affecting yield. California Agriculture, 65: 90-95.
- WILLIAMS, L.; P. BAEZA AND P. VAUGHN. 2012. Midday measurements of leaf water potential and stomatal conductance are highly correlated with daily water use of Thompson Seedless grapevines. Irrig. Sci. 30: 201–212.

CAPÍTULO 7. MODELAMIENTO DEL BALANCE HÍDRICO EN SISTEMAS PRODUCTIVOS BAJO RIEGO Y ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

Estefanía Pizarro A. y Mauricio Galleguillos T.

Modelamiento del balance hídrico

El balance hídrico en agronomía es el resultado de los intercambios de los flujos de agua que ocurren entre los componentes del sistema agrícola. Este se puede interpretar como un balance de materia, el cual puede ser expresado como una ecuación compuesta por flujos de entrada de agua, como la precipitación atmosférica y el riego, y las salidas, evaporación del suelo, transpiración de las plantas y la percolación fuera de la zona de raíces, quedando como resultado la humedad del suelo (Tindall et al., 1999). Este balance es dinámico en el tiempo y depende en gran medida del funcionamiento de los cultivos dado que las plantas actúan como una bomba que determina en gran medida la velocidad del flujo de agua en el continuo suelo-planta-atmósfera.

Para resolver este balance hídrico, existen variados métodos de diferente complejidad. Lo más directo es medir los componentes del balance hídrico en terreno; sin embargo, esto resulta inviable para muchos agricultores dado el costo de los instrumentos de medición, además que presenta limitaciones para caracterizar la variabilidad espacial de las variables del balance hídrico. Para resolver este problema el uso de modelos ha demostrado ser una herramienta eficaz. Existen métodos simples que consideran los diferentes compartimientos del sistema suelo-planta-atmósfera como un continuo, resolviendo los intercambios mediante ecuaciones simples de base empírica. Estos métodos son adecuados para resolver el balance de manera gruesa y tener una aproximación potencial de los consumos de agua por parte de los cultivos. No obstante, estos métodos son insuficientes para representar en detalle el funcionamiento del agua en los cultivos, no pudiendo inferir situaciones hipotéticas de manejo, dado su naturaleza empírica. Para estudiar estos escenarios, son las herramientas de modelación basadas en procesos físicos las más adecuadas.

¿Qué es la modelación de procesos?

Un modelo basados en procesos se define, de forma simple, como la representación de un sistema o un proceso real por medio de un planteamiento conceptual, el cual es una hipótesis de cómo se comporta el sistema o proceso; esta hipótesis se puede expresar de manera cuantitativa por un modelo matemático (Devia et al., 2015; Konikow, 1998). El mejor modelo es el que da resultados cercanos a la realidad, con el uso de un número mínimo de datos de entrada y con la menor complejidad posible. Los modelos son una herramienta que pueden permitir predecir el comportamiento y comprender varios procesos dentro de sistemas agrícolas y su entorno.

Dentro de la amplia gama de modelos existentes, se encuentran los llamados modelos de base física, los cuales son una representación matemáticamente idealizada del fenómeno real, y son también llamados “mecanicistas”, ya que se basan en los principios de la mecánica. Utilizan variables de estado que son medibles y son funciones de tiempo y espacio. En el caso de los procesos hidrológicos del movimiento del agua, éstos están representados por ecuaciones. Estos modelos no necesitan gran cantidad de variables hidrológicas y meteorológicas para su ejecución, pero sí de la evaluación de parámetros que describen las características físicas del sistema en estudio, lo que usualmente se realiza a través de un proceso de calibración (Devia et al., 2015).

Base física de los modelos

Los modelos mecanicistas de balance hídrico del suelo utilizan la ecuación de Richards (Richards, 1931) para modelar las transferencias hídricas en la zona donde crecen las raíces. Esta ecuación es la base de los modelos más usados, ya que proporciona una descripción del flujo del agua en el suelo, combinando la Ley de Darcy (movimiento del agua en medios porosos) y el principio de continuidad (Ley de la conservación de masa) (Feddes et al., 1978).

La ecuación de continuidad expresa la variación del contenido de agua en función del tiempo y de la posición, y está influenciada por diversos factores (Figura 2). Al no ser una ecuación lineal, se resuelve numéricamente utilizando el método de diferencias finitas (forma de resolución de ecuaciones diferenciales) y el modelo matemático que se obtiene se valida en base a datos experimentales (observados o medidos).

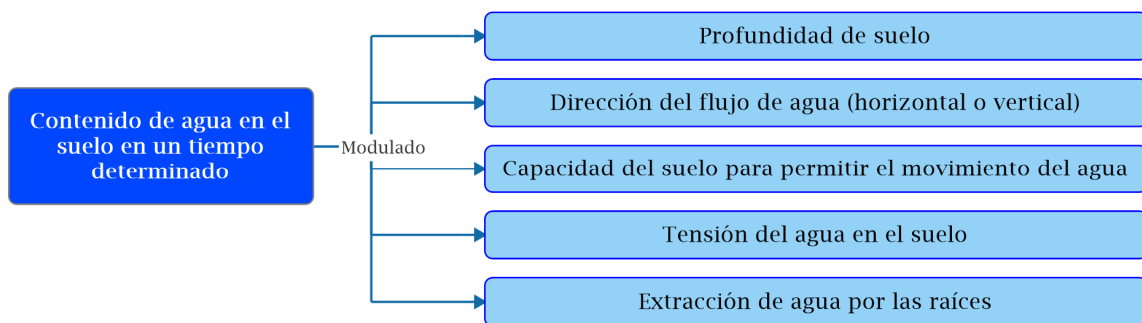


Figura 1. Esquema que resume las variables y parámetros que modulan el contenido de agua en el suelo.

Puesta en marcha de modelos (parametrización)

Los modelos de base física implican un número relativamente grande de parámetros, muchos de los cuales no se pueden medir de manera directa. Algunos de estos deben

obtenerse mediante la calibración de un modelo particular, contra las mediciones de campo o de laboratorio (Šimůnek y Hopmans, 2009). La ecuación de Richards requiere, para su solución, especificar las funciones características del suelo; conductividad hidráulica no saturada $K(\theta)$ y la curva de retención de humedad $h(\theta)$; son funciones no lineales de la presión matricial las cuales pueden ser obtenidas de forma experimental o por medio de formas algebraicas (Šimůnek et al., 2015, 2012).

Una de las opciones existentes para obtener la ecuación de la conductividad hidráulica no saturada, en función de los parámetros de retención de agua en el suelo, se basa en el planteamiento de Van Genuchten (1980). Esta aproximación utiliza el modelo de distribución estadística del tamaño de poros de suelo (Mualem, 1976), con porosidad simple, y sin considerar histéresis (para un mismo contenido en humedad, el suelo que se va secando presenta una presión matricial mayor que el que se va humedeciendo). Así, en las ecuaciones de estimación de $K(\theta)$ se definen cinco parámetros hidráulicos independientes: θ_r (contenido de agua residual en el suelo), θ_s (contenido de agua a saturación), α (presión de saturación), n (índice de distribución de tamaño de poros) y K_s (conductividad hidráulica a saturación). Estos corresponden a coeficientes empíricos que afectan la forma de las funciones hidráulicas (Šimůnek et al., 2015, 2012).

Para resolver la ecuación también es necesario conocer la distribución inicial de las presiones matriciales o del contenido de agua en la profundidad de suelo a estudiar (dominio del flujo) y se debe determinar las condiciones de contorno en superficie; estas se pueden definir por los datos de riego, lluvia, evaporación y transpiración potencial, percolación en profundidad, estableciendo un drenaje libre, nivel freático permanente, nivel freático fluctuante, etc. Además de la definición de las condiciones de contorno se debe realizar una discretización espacial del perfil de suelo definiendo la cantidad de materiales u horizontes de suelo presentes, establecer la escala temporal (hora, día, mes, año) y el periodo de simulación (cantidad total de horas, días, años). La información disponible puede dividirse en dos fases: la primera suele ser utilizada para calibrar el modelo; y la segunda se emplea en la verificación del valor de los coeficientes empíricos, ajustados en base a una función objetivo que usualmente es la minimización del error entre la humedad de suelo simulada y la observada (Šimůnek et al., 2015, 2012).

Huella hídrica estimada mediante modelación

La idea de considerar el uso del agua a lo largo de los procesos involucrados de manera directa o indirecta, en la acción de satisfacer las necesidades de la cadena productiva alimentaria, ha ganado interés después de la introducción del concepto de "huella hídrica" por Hoekstra (2003). La huella hídrica es un indicador del uso de agua dulce que se refiere no sólo al uso directo del agua de un consumidor o productor, sino también al uso indirecto del agua. La huella hídrica de un producto es el volumen de agua dulce utilizada para producir el producto, el cual es medido en toda la cadena de suministro a las distintas etapas de producción. Puede considerarse como un indicador integral de la apropiación de los recursos de agua dulce. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuente y los volúmenes contaminados por tipo de contaminación. Todos los componentes de una huella hídrica total se especifican geográfica y

temporalmente. La **huella hídrica azul** se refiere al consumo de recursos hídricos azules (aguas superficiales y subterráneas) a lo largo de la cadena de suministro de un producto. La **huella hídrica verde** se refiere al consumo de recursos hídricos verdes (agua de lluvia en la medida en que no se convierta en escorrentía). La **huella de agua gris** se refiere a la contaminación, y se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes, dadas las concentraciones naturales de fondo y el agua ambiente existente.

Posibilidad de elaboración de escenarios de uso del agua

El término escenario expresa la construcción de una secuencia hipotética de eventos, con el fin de focalizar la atención a los procesos y causas, y los puntos clave de toma de decisión; “Los escenarios son una herramienta de la prospectiva para visualizar futuros alternativos”(Kahn y Wiener, 1968). La justificación de la elaboración de escenarios es desarrollada por la *United Nations World Water Assessment Programme (WWAP)* (Cosgrove y Cosgrove, 2012). Estos autores señalan que debido a que el agua es un elemento esencial para el desarrollo socioeconómico, es absolutamente necesario estar informado sobre las posibilidades futuras de disponibilidad del agua, seguridad relativa de abastecimiento y evolución probable de la demanda en respuesta a factores diversos. Lo anterior implica generar situaciones hipotéticas con variables y forzantes de uso y/o disponibilidad de agua y/o consumo de esta, diseñadas bajo ciertas condiciones y que sumado al uso de modelos permite estudiar la respuesta de un sistema ante los cambios tanto climáticos como de gestión de predio que se deseen evaluar. Experiencias en Chile han sido desarrolladas por Pizarro (2019), en uva de mesa, concluyendo que para mediados de siglo la estrategia y gestión de riego tiene más relevancia que el cambio climático en la respuesta de las variables del balance hídrico.

Caso de estudio: modelación de transferencias hídricas en limoneros

El uso de tecnologías para la gestión del riego genera ciertas incertidumbres en los productores, dado que, por lo general, producen una reducción considerable del volumen de agua aplicada a los cultivos. De este modo, es necesario validar estas tecnologías en cada cultivo y zona edafoclimática, para dar garantías empíricas a los agricultores de que su correcto uso permite ser más eficiente en los recursos sin afectar la productividad. Una manera de cuantificar los componentes del balance hídrico (transpiración real del cultivo y la percolación, principalmente) es a través de los modelos de transferencia hídrica (estudio del movimiento del agua en la zona no saturada). En este sentido, para cuantificar y evaluar el uso de sondas de capacitancia en la gestión del riego, se utilizó como caso de estudio para simulaciones un cuartel de limonero ‘Fino 49’(Capítulo 5, Cuadro 1) y se utilizó el modelo HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2015).

Diagrama metodológico simplificado

En este estudio, la simulación se dividió en tres partes. La primera consiste en el proceso de calibración, para obtener los parámetros del suelo acorde a las características del sitio de

estudio. El modelo se calibró con datos de humedad del suelo observados a escala diaria. La segunda parte es el proceso de verificación, para terminar con la simulación completa (tercera etapa), que forma parte de ambos procesos. La calibración y la verificación se llevaron a cabo desde octubre a mayo para la temporada 2017-2018 y 2018-2019, respectivamente. Un esquema de funcionamiento del modelo se muestra en la Figura 3.

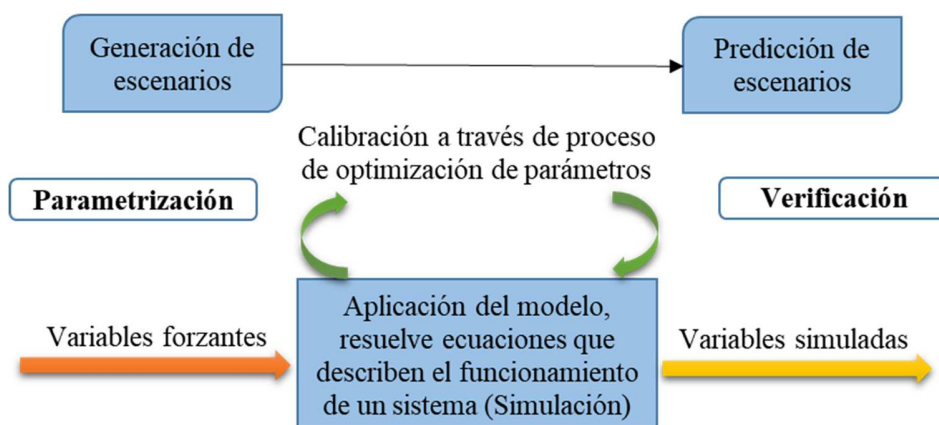


Figura 2. Descripción esquemática del enfoque de modelación adoptado en el estudio.

Variables y parámetros considerados

HYDRUS-1D es un modelo de transferencias hídricas que requiere diversa información para ejecutar su parametrización (Šimůnek et al., 2015). Entre estos destacan: características de cobertura vegetal, que permitan separar la evaporación y transpiración; características físicas del suelo, que describan el movimiento de agua dentro de este; datos de riegos aplicados; medición de humedad de suelo, y variables meteorológicas medidas (Figura 4). El set de datos con los que se completaron estos requerimientos incluyó: registro de mediciones de humedad de suelo con sonda (monitoreo continuo EnviroScan®); propiedades físicas de suelo y descripción de raíces (calicatas); imágenes del satélite Sentinel (obtención de índice de área foliar y fracción de interceptación); datos meteorológicos (ET_0 y precipitaciones), y riegos aplicados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros y variables que requiere el modelo HYDRUS-1D para simular.

Parámetros	Variables	
	Forzantes (entrada)	Simuladas (salida)
Textura	Precipitaciones	Evaporación real
Curva característica	Riego	Transpiración real
Densidad aparente	Evapotranspiración (FAO)	Percolación
Profundidad de suelo	Área foliar; Fracción de interceptación	Agua en el perfil
Distribución de	Coefficiente de cultivo	Coefficiente de cultivo real

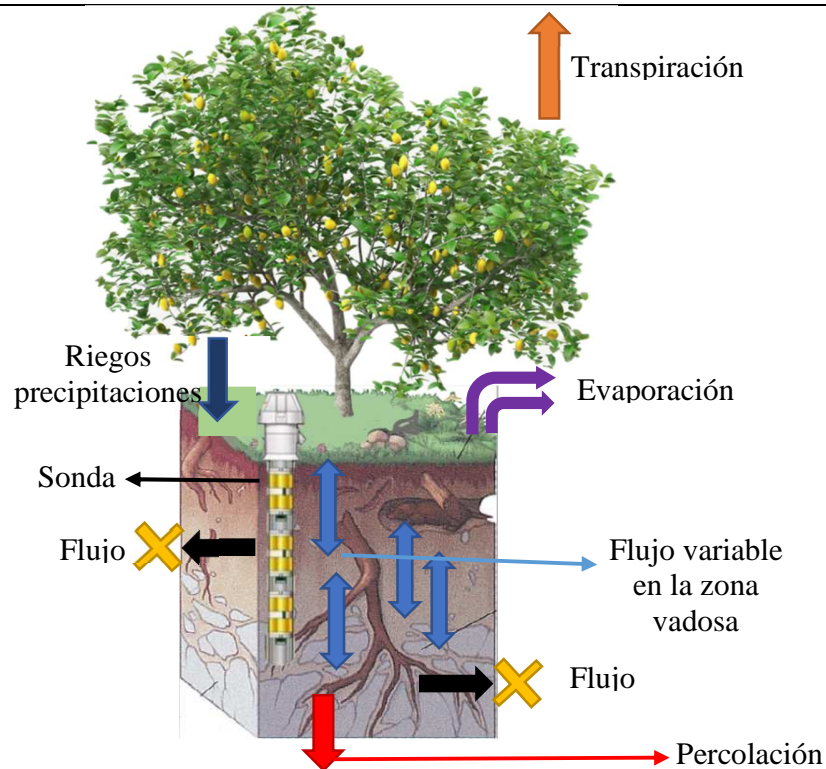


Figura 3. Esquema del dominio (sistema) simulado, mostrando las condiciones de contorno.

Desempeño del modelo

Como se trabajó con un modelo, los valores de los parámetros se calibraron a partir de una muestra de valores de humedad por nodo (ubicación de cada sensor), obtenidos desde una sonda de humedad como dato ajuste. Una vez calibrado el modelo, en la fase de validación se utilizaron un conjunto de valores de humedad de suelo diferentes a los utilizados en la fase previa. Este es el proceso de comprobar que los resultados aportados por el modelo, para las variables de salida y de estado, no son muy diferentes a los medidos en la realidad. Existen diferentes índices que permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos medidos y los resultados del modelo.

La calibración y la verificación de las estimaciones del contenido de agua en el suelo de HYDRUS-1D, frente a las mediciones de la sonda, se realizaron a escala diaria. El R^2 de la humedad promedio en el perfil entre EnviroScan® e HYDRUS-1D se estimó en 0,70 (4,22% relativo) para la calibración (Figura 5A) y 0,71 (2,86% relativo) para la verificación (Figura 5B). Luego se evaluó la consistencia de la calibración de HYDRUS-1D, al analizar los errores residuales de calibración, es decir, las diferencias entre los perfiles de humedad del suelo medidos y los simulados. El análisis se realizó considerando los errores residuales

de calibración en función de la profundidad del suelo. Para el periodo de calibración, el perfil promedio de error relativo ($nRMSE^1$ por sus siglas en inglés) disminuyó de 8% a los 30 cm a 3% en los 70 cm, con un valor promedio de los tres nodos simulados de 5,5% (Figura 6A). Respecto al periodo de verificación, el error relativo también disminuyó de 4,2% a 1%, en las mismas profundidades anteriormente analizadas, y con un valor promedio cercano al 4% (Figura 6B). Esto indica que la modelación presentó un bajo error de predicción, por lo que la interpretación de los resultados permite realizar conclusiones certeras de lo ocurrido.

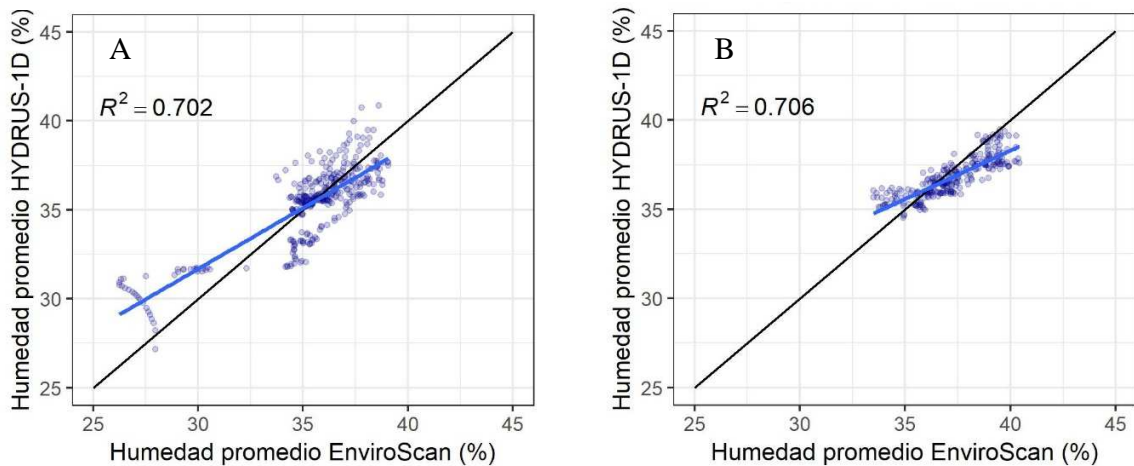


Figura 4. Diagrama de dispersión de estimaciones de humedad promedio en el perfil de suelo por modelo el HYDRUS-1D versus mediciones de sonda EnviroScan, a escala diaria para el período en limoneros. (A) calibración y (B) verificación.

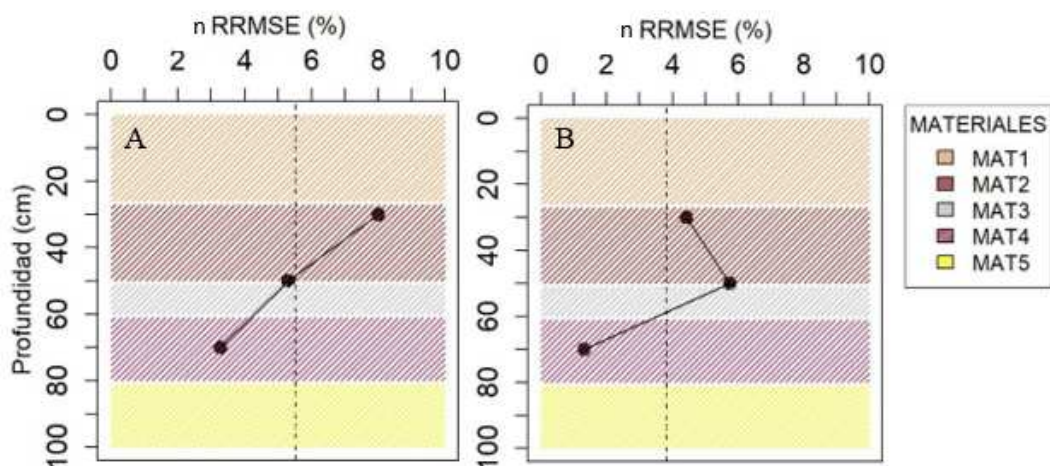


Figura 5. Errores relativos del perfil de humedad medido vs simulado (materiales equivalen a diferentes horizontes en el perfil de suelo). (A) Perfil de error relativo para el periodo

¹ Normalized root mean square error

de calibración; (B) Perfil de error relativo para el periodo de verificación. Línea punteada representa el valor promedio de error para todo el perfil.

Resultados del balance hídrico para dos temporadas de estudio

La modelación HYDRUS-1D permitió determinar los valores de los componentes del balance hídrico en un huerto de limonero. Los riegos muestran una diferencia en cantidad y frecuencia de aplicación entre temporadas estudiadas, dejando en evidencia un cambio en la estrategia de riego que se ejecutó, tal como muestra la Figura 6. En esta se aprecia que durante la temporada 2017-2018 se realizaban riegos largos y frecuentes, respecto de 2018-2019, donde se disminuyeron los aportes realizados en la época de verano, momento en el cual el cultivo tiene gran parte del desarrollo foliar de la temporada, y durante el pleno crecimiento del fruto (fase II de crecimiento). El aporte de riego al cuartel, en ambas temporadas, se muestra en el Cuadro 2.

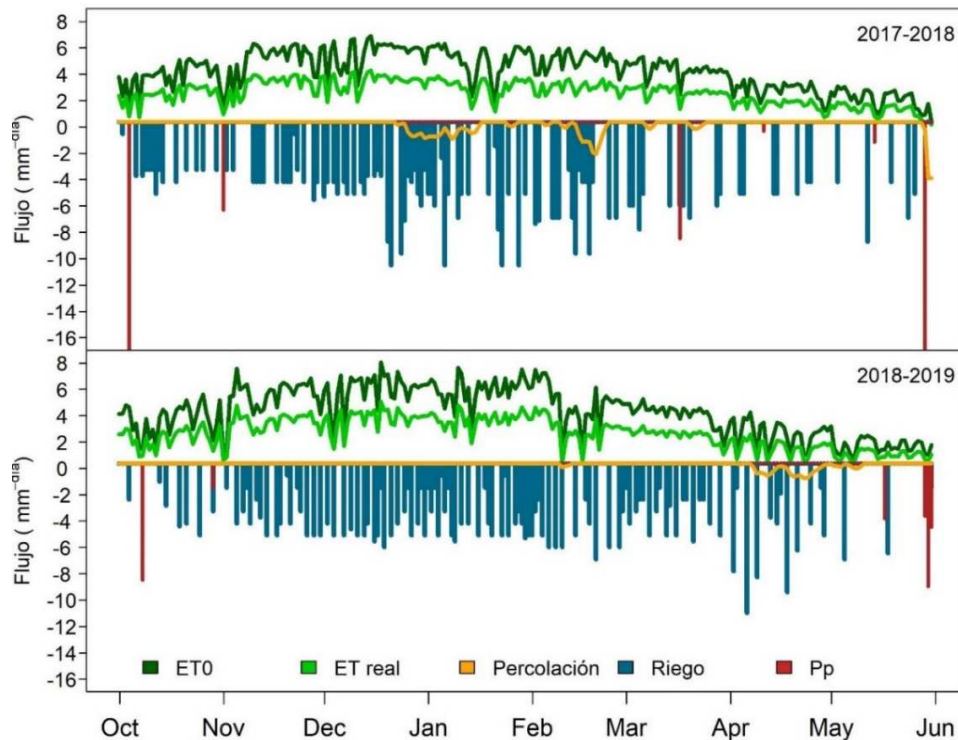


Figura 6. Serie temporal de variables del balance hídrico, obtenidas de la simulación con HYDRUS-1D, para ambas temporadas en un huerto de limoneros 'Fino 49'.

La evapotranspiración real (ET_r) diaria simulada mostró una gran dinámica temporal para las dos temporadas, con variaciones estacionales de los valores de ET_r diarios entre 0,18 y 4,3 mm d⁻¹ y de 0,46 y 5,0 mm d⁻¹, para la primera y segunda temporada respectivamente. La dinámica temporal de ET_r difiere de un año a otro, controlado mayormente por la variación de la demanda atmosférica mostrada como evapotranspiración potencial (ET₀)

(Figura 7). Para el caso de los meses de diciembre, enero y febrero (verano), de la primera temporada, el coeficiente de cultivo real (K_{c_r}) muestra alta variación (Figura 8), que de acuerdo con el funcionamiento del modelo deja en evidencia la presencia de estrés en la planta. Si bien no se debe a un estrés por falta de agua, puesto que es el periodo de máxima frecuencia y tiempo de riego dentro de la temporada, puede deberse al efecto contrario, exceso de agua. Esto queda en evidencia en las diferencias que se presentan entre años de riego; en la primera temporada se alcanza un máximo de 0,63 de K_{c_r} y un mínimo de 0,3, siendo 0,63 y 0,57 los máximo y mínimo, respectivamente, para la segunda temporada, en donde los riegos fueron más cortos que el año anterior, aplicando menos agua al regar, lo que mantiene el suelo aireado (buena relación agua/aire) y, por consiguiente, se logra una transpiración cercana a la potencial, experiencia similar a lo reportado por otros autores (Jímenez et al., 2013; Neira et al., 2015). Respecto a la evaporación, y para ambas temporadas, se presentó estable, con un promedio de $0,26 \text{ mm d}^{-1}$ (10% de la evapotranspiración del cultivo); esta variable no desaparece por completo a pesar de tener riego localizado, ya que la cobertura no es continua, lo que permite evaporar agua directamente desde el suelo en zonas descubiertas.

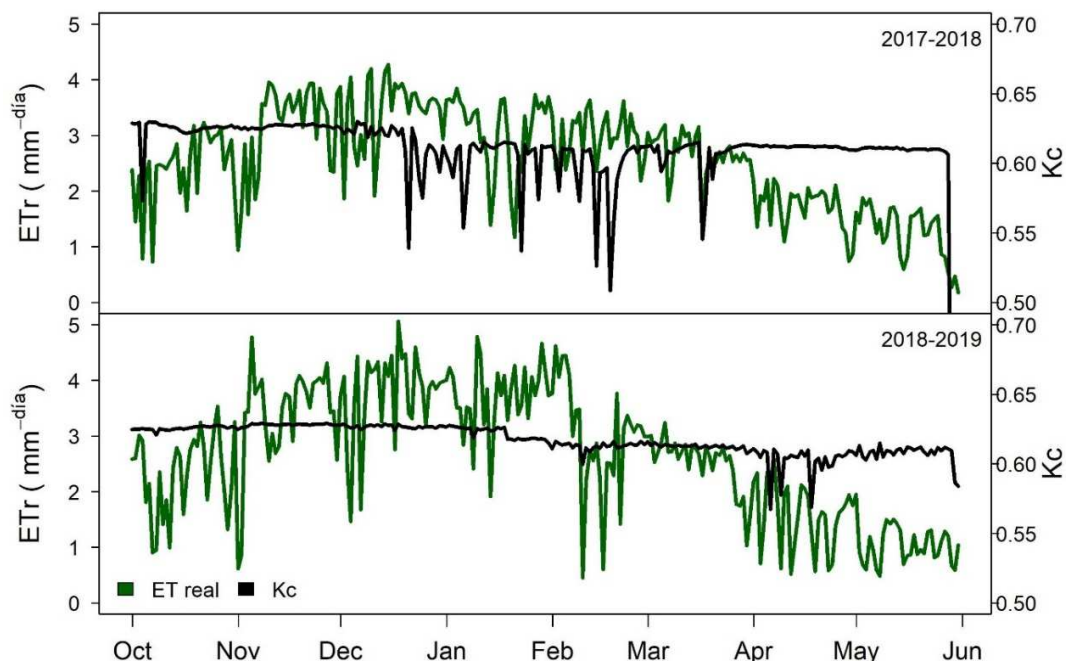


Figura 7. Serie temporal de evapotranspiración real (ETr) y K_{c_r} , obtenidos de la simulación con HYDRUS-1D, para ambas temporadas en un huerto de limoneros 'Fino 49'.

Cabe destacar que la diferencia de evapotranspiración real entre periodos fue de 18 mm, aproximadamente, siendo ligeramente mayor cuando menos agua se aplicó al cultivo. Por otro lado, lo que tiene un evidente cambio es la cantidad de agua empleada para el riego, la cual, al compararla con la ETr, muestra cuánta agua está entrando por riego al sistema,

respecto de lo que pierde por procesos de superficie (Cuadro 2). En cuanto al balance hídrico, se observa una mejora de la eficiencia en el manejo del riego por goteo entre una temporada y otra, ya que pasan de tener un déficit del 8% en la transpiración, respecto a lo demandado por la atmósfera (transpiración potencial), a un 6% en la segunda temporada, lo que refleja que la estrategia de riego apoyada por sondas de monitoreo continuo de humedad logró mejorar la gestión de riego y de los recursos hídricos a nivel de campo, apoyando lo mencionando por Callejas et al., (2014).

En vista de lo anterior, el uso de sondas permite aumentar la eficiencia de riego, lo cual es relevante frente a la escasez que presenta el recurso, dado que, en este caso, disminuyó la pérdida de agua por percolación en la segunda temporada (de 8% a 3,3%, respecto a la cantidad aplicada en el riego) y mejoró el desempeño de la planta, al mantener una mejor relación agua/aire, evitando la hipoxia en las raíces y, por consiguiente, una mejor transpiración y fotosíntesis.

Cuadro 2. Resumen de componentes de producción y balance hídrico obtenido de la simulación, para ambas temporadas.

Variable	Temporada	
	2017-2018	2018-2019
ET0 (mm temp ⁻¹)	1030,46	1045,5
Precipitación (mm temp ⁻¹)	68,15	30,17
ETr (mm temp ⁻¹)	629,44	648,15
Agua riego (m ³ ha ⁻¹)	5.268	4.540
Riego respecto ETr (%)	83,6	70
Transpiración (mm temp ⁻¹)	565,50	582,74
Evaporación (mm temp ⁻¹)	63,94	65,40
Percolación (mm temp ⁻¹)	42,85	15,13
T _r real / T _r potencial	0,92	0,94
Kc real (promedio)	0,61	0,62
Rendimiento (ton ha ⁻¹)	47,4	13,4

Finalmente, con relación al rendimiento, si bien se aprecia que existe una evidente caída de la producción, desde la primera a la segunda temporada en estudio, la causa de esta menor producción se debe a una alta e intensa frecuencia de heladas en el sector (Capítulo 5, Cuadro 3), y, probablemente, no al cambio de la gestión del riego (Ver capítulo 5).

Conclusión y recomendaciones

El exceso de riego en la zona de estudio no sólo es un factor de ineficiencia de los sistemas productivos, ya que aumenta el volumen de agua percolada, sino que también es uno de los factores de la baja productividad en los campos. De esta manera, es pertinente el uso de tecnología para mejorar la eficiencia del recurso agua y, a su vez, alcanzar el potencial productivo de cada especie.

La representación del funcionamiento de un sistema agrícola utilizando modelos es un proceso complejo, ya que requiere una serie de parámetros y variables (propiedades físicas del suelo, perfil de humedad, distribución de raíces, estructura de la copa, entradas y salidas de agua, entre otros) que aumentan la incertidumbre (Galleguillos et al., 2011). Sin embargo, el uso de modelos representa una alternativa operacional para predecir el balance hídrico en escenarios de manejo presentes y bajo condiciones futuras de cambios en las variables atmosféricas y de menor disponibilidad hídrica.

Para mejorar la toma de decisiones, a escala intra y extra predial, frente al escenario de cambio climático, es necesario generar y evaluar los modelos de balance hídrico de los diferentes frutales, de manera de predecir el impacto en el consumo de agua y su respuesta productiva.

Referencias

- AGRAWAL, J.; I. SHERAMETI AND A. VARMA. 2011. Detoxification of Heavy Metals: State of Art 1–34. In: SHERAMETI, I. AND A. VARMA. Detoxification of Heavy Metals. Springer, Berlin, Heidelberg.
- CALLEJAS, R.; C. KREMER Y M. RIOSECO. 2014. Experiencia práctica en la implementación de monitorización continua. En: CALLEJAS, R.; J. VERA Y C. KREMER. (Eds.), Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago de Chile, 112 p.
- COSGROVE, C. AND W. COSGROVE. 2012. The dynamics of global water futures driving forces 2011-2050 United Nations World Water Assessment Programme Report on the findings of phase one of the UNESCO-WWAP Water Scenarios Project to 2050 United Nations Educational, Scientific and Cultural Organi.
- DEVIA, G.; B. GANASRI AND G. DWARAKISH. 2015. A review on hydrological models. *Aquat. Procedia*, 4: 1001–1007.
- FEDDES, R.; P. KOWALIK AND H. ZARADNY. 1978. Simulation of field water use and crop yield. A Halsted Press book. Wiley. 188p.

- GALLEGUILLOS, M.; F. JACOB; L. PRÉVOT; A. FRENCH AND P. LAGACHERIE. 2011. Comparison of two temperature differencing methods to estimate daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed from ASTER data. *Remote Sens. Environ.*, 115: 1326–1340.
- GENUCHTEN, VAN. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 8: 892–898.
- HOEKSTRA, A. 2003. Virtual water trade. *Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade* 1–244.
- JÍMENEZ, J.; L. MORENO Y S. MAGNITSKIY. 2013. Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, 6: 96–109.
- KAHN, H. AND A. WIENER. 1968. The Year 2000: A framework for speculation on the next thirty-three years. *Am. J. Sociol.* 74: 200–201.
- KONIKOW, L. 1998. Uso de modelos numéricos para simular el flujo y el transporte subterráneo. *IGME. Temas Guías y Manuales*, 533–558.
- MUALEM, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12.
- NEIRA, J.; M. ORTIZ; L. MORALES-SALINAS AND E. ACEVEDO. 2015. Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling. *Chil. J. Agric. Res.* 75: 35–44.
- PIZARRO, E. 2019. Proyección de los componentes del balance hídrico que definen las estrategias de riego de uva de mesa en Chile central bajo escenarios de cambio global. Tesis de Magíster. Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Santiago. 94p.
- RICHARDS, L. 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics*, 1:318–333.
- ŠIMŮNEK, J. Y J. HOPMANS. 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecol. Modell.* 220: 505–521.
- ŠIMŮNEK, J.; M. ŠEJNA; H. SAITO; M. SAKAI AND M. VAN GENUCHTEN. 2015. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California.
- ŠIMŮNEK, J.; M. VAN GENUCHTEN AND M. ŠEJNA. 2012. Hydrus: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, 55: 1261–1274.

TINDALL, J.; J. KUNKEL AND D. ANDERSON. 1999. Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers. Prentice Hall. 639p.

CAPÍTULO 8. USO E INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES COMO HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES

Andrés Ceballos C. y Mauricio Galleguillos T.

Nociones fundamentales de la teledetección

Actualmente, nos encontramos en una época de grandes y acelerados avances tecnológicos, que han convertido a los datos e información en un protagonista clave. Una de las características que ha destacado en esta era es la creciente oferta de información y datos adquiridos desde sensores satelitales, que orbitan a cientos de kilómetros de la superficie de la tierra. La disciplina encargada de obtener y procesar la información obtenida desde estos sensores remotos se le conoce como “percepción remota” o “teledetección”. Los satélites de observación terrestre son las herramientas utilizadas para el estudio de la tierra y sus componentes, destacándose, por un lado, el programa Landsat (NASA, 2019), perteneciente al gobierno federal de Estados Unidos, el cual entrega información desde la década de los 70, y el reciente programa Copernicus (ESA, 2019), perteneciente a los estados que integran la Unión Europea, el cual entrega información desde el año 2014 en adelante. Ambos programas permiten la observación global de forma periódica, dejando a libre disposición todas las imágenes capturadas. Es específicamente el programa Copernicus, al que pertenece el satélite Sentinel-2, la fuente de las imágenes adquiridas que son la base para la plataforma geoespacial descrita en el presente capítulo.

Los sensores satelitales son homologables a una cámara fotográfica digital e, incluso, al ojo humano, ya que logran capturar la radiación reflejada por los materiales, diferenciando las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, lo que conocemos comúnmente como colores (Figura 1). El ojo humano es sensible a la radiación reflejada dentro del espectro visible, el cual contempla las longitudes de onda entre los 400 y los 700 nm, aproximadamente; sin embargo, los sensores artificiales permiten un rango de longitudes de onda mucho mayor, lo que permite una mejor representación de la radiación reflejada por los objetos. Además, estos sensores permiten discriminar la radiación recibida en diferentes rangos del espectro electromagnético, mediante su disociación en bandas espectrales. De estas bandas se obtienen imágenes digitales que representan la radiación reflejada para una extensión geográfica deseada (Figura 2).

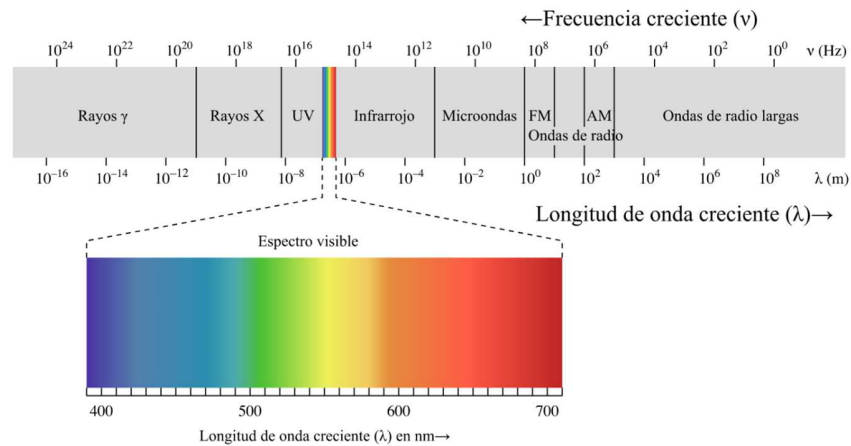


Figura 1. Diagrama representativo del espectro electromagnético. Muestra los distintos tipos de ondas electromagnéticas existentes, ordenadas de mayor a menor frecuencia y longitud de onda, medidas inversamente proporcionales entre sí (adaptada de Ronan, 2008).

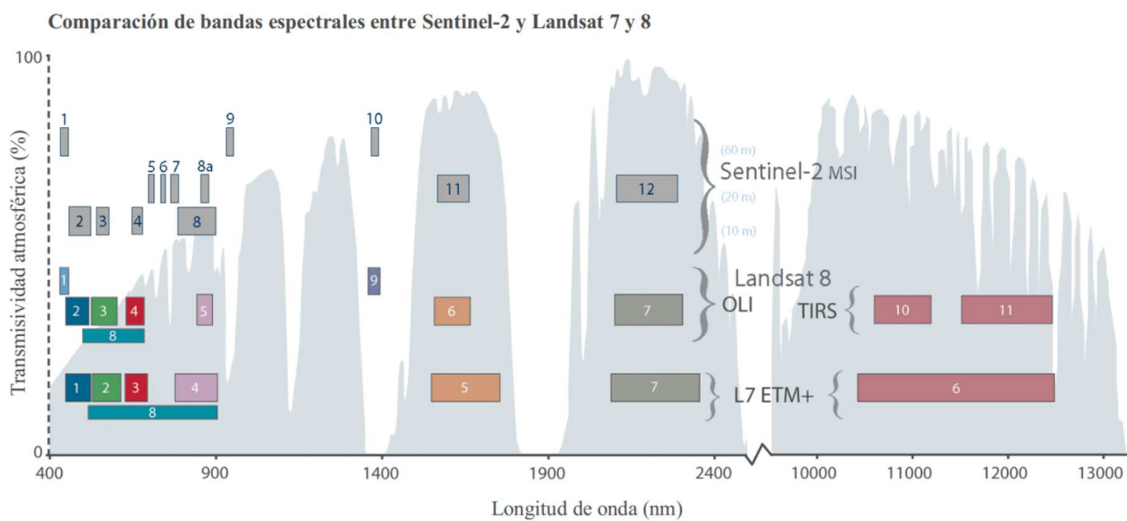


Figura 2. Ubicación espectral de las bandas satelitales (cajas con números) de Sentinel-2, comparadas con las del programa Landsat (7 y 8). En el eje X (horizontal) se muestra la longitud de onda en nanómetros (nm) desde los 400 hasta los 2500, aproximadamente, más la región entre los 9500 a 13000 nm. En el eje Y (vertical) y sombreado en gris, se muestra la transmisividad en porcentaje que posee la atmósfera para cada longitud de onda, atributo que representa cuanta radiación deja pasar a través de ella, es decir, que tan transparente es la atmósfera (adaptada de NASA, 2015).

La energía reflejada que es capturada por el sensor remoto se expresa en términos de radiancia, la cual es una medida de magnitud física que representa la cantidad de energía

saliente desde una superficie determinada, en una dirección particular, dado por el ángulo sólido que abarca, siendo su unidad de medida el $W\ m^{-2}sr^{-1}$ (Watt sobre metro cuadrado por estereoradián). Sin embargo, para facilitar el estudio de las características de la superficie terrestre y estandarizar esta variable, se utiliza una medida adimensional llamada reflectividad, la cual es una razón entre la energía reflejada por una superficie determinada (o radiancia) y la energía incidente desde el sol (o irradiancia), es decir, indica cuanta proporción de radiación incidente fue reflejada por una superficie. La reflectividad puede tomar valores entre 0 y 1, y puede expresarse en porcentajes (Figura 3).

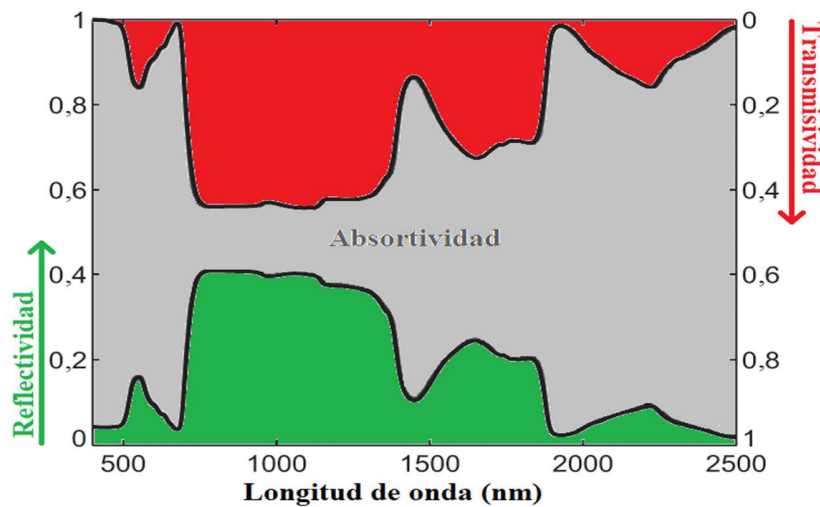


Figura 3. Curvas teóricas del principio de conservación de energía aplicado sobre una cubierta vegetal. Se muestra en rojo la transmisividad, en gris la absorptividad y en verde la reflectividad de la cubierta, en medidas adimensionales que, entre sí, suman 1 para cada valor de longitud de onda mostrada.

Teniendo en cuenta que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma; se sabe que cuando una onda electromagnética entra en contacto con la materia, la energía que contiene y transporta de acuerdo al principio de conservación de la energía, se puede absorber, transmitir y/o reflejar en distintas proporciones, dependiendo principalmente de los elementos y compuestos que forman la materia. Estas interacciones, además, dependen de la parte del espectro electromagnético que se esté considerando (Figura 3). Por ejemplo, una parte del espectro electromagnético correspondiente al color azul no tendrá la misma absorción, transmisión o reflexión que una parte correspondiente al color rojo, dada la diferente naturaleza en la composición del material que está interactuando con la radiación. Es por esto que la reflectividad representa una respuesta de los procesos de absorción y transmisión de energía por parte de las superficies, este punto es clave para dimensionar los alcances que proveen los datos basados en la reflectividad obtenida por la teledetección.

Adquisición de datos remotos

La adquisición de datos de la superficie terrestre desde un satélite se basa en que la luz proveniente desde el sol viaja hasta encontrarse con el límite superior de la atmósfera terrestre (A). Esta energía entra a la atmósfera (Figura 4B) hasta llegar a la superficie terrestre (Figura 4C). En este trayecto, se producen distintos tipos de interacción entre la energía entrante y la atmósfera, ya que las partículas gaseosas poseen distintos tamaños y estructuras moleculares, que reaccionan, en mayor o menor medida, con la radiación de diferentes longitudes de onda. Además, el ángulo de refracción del rayo de luz cambia ligeramente al atravesar las diferentes capas de la atmósfera, dependiendo de la longitud de onda. Este fenómeno es conocido como dispersión de la luz, y es el responsable de que el cielo tenga su color azul característico. Esta radiación solar (alterada por su interacción con la atmósfera) continúa su camino hasta tocar la superficie terrestre (Figura 4C), donde una parte de la misma se transmite, otra se absorbe y el resto es reflejado nuevamente hacia el cielo. Esta última cruza nuevamente la atmósfera (Figura 4B), para llegar al tope de la misma, donde es captada y almacenada por el sensor satelital (Figura 4D). Estos datos posteriormente son transmitidos hacia una estación receptora, la cual procesa y permite generar las imágenes satelitales de forma digital (Figura 4E). Estas después son preprocesadas y corregidas, mediante algoritmos automatizados específicos para cada sensor (Figura 4F), y en última instancia llegan a los usuarios finales para ser utilizadas en aplicaciones específicas (Figura 4G). La plataforma geoespacial presentada en este capítulo representa una extensión de la componente G del proceso descrito y esquematizado en la Figura 4.

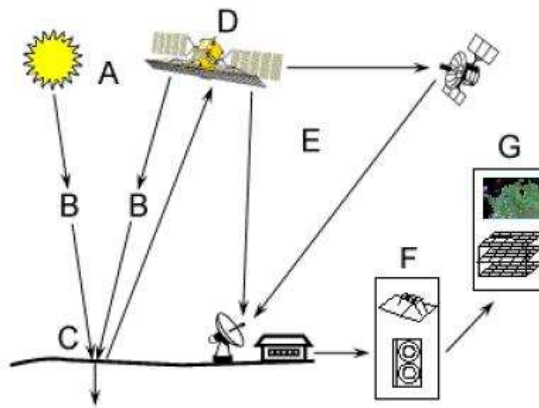


Figura 4. Diagrama explicativo de un sistema satelital de percepción remota. (A): Fuente emisora de energía electromagnética (sol); (B): Medio físico (atmósfera) que recorre la energía, desde la fuente al objeto y desde el objeto al sensor; (C): Superficie terrestre (suelo, vegetación u otras coberturas terrestres); (D): Sensor remoto que capta la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera; (E): Transmisión, recepción y procesamiento de la información para la conversión de los datos en imágenes satelitales digitales; (F): preprocesamiento y corrección automática de imágenes generadas; (G): Aplicaciones particulares de imágenes satelitales por

usuarios finales para la toma de decisiones y solución de problemas (adaptada de *Canada Centre for Remote Sensing*, 2007).

Propiedades de los sensores remotos

Las características básicas que definen a un sensor remoto, y las imágenes que se obtienen de estos, se resumen en los tipos de resolución:

- Espacial: corresponde al tamaño mínimo de integración de la información de la superficie captada por el sensor; es decir, el tamaño que posee cada píxel de la imagen satelital.
- Espectral: resume todas las características asociadas a la interacción del sensor con las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, esto es, el número de bandas espectrales y cada una de sus especificaciones técnicas en la captación de la energía.
- Temporal: define el tiempo que demora el/los satélite/s en volver a pasar por una misma extensión geográfica.
- Radiométrica: corresponde a la cantidad de valores digitales, niveles de grises o números enteros distintos que puede llegar a diferenciar el sensor dentro de una misma imagen, medida que se asocia a la sensibilidad de captación de éste.

Estas cuatro resoluciones son diferentes, de acuerdo al sensor utilizado, destacándose la superioridad de los productos Sentinel y su sensor MSI o *Multispectral Instrument* en inglés, de la agencia espacial europea, ya que presenta mejor resolución espacial, espectral y temporal que los sensores de uso libre existentes. Se destacan las 13 bandas espectrales (resolución espectral), con un tamaño de píxel más fino, 10 y 20 m (resolución espacial), un periodo de revisita de 5 días (resolución temporal), y 12 bits de resolución radiométrica, lo que permite discriminar 4096 niveles de grises diferentes en cada banda (Figura 2).

Propiedades radiativas de los cultivos

Cuando un rayo solar es interceptado por la vegetación, la energía se puede transmitir, absorber o reflejar en distintas proporciones, dependiendo de la longitud de onda, por ejemplo, mayor es la reflectividad en el espectro de los 800 nm con respecto al espectro de los 700 nm, para una vegetación fotosintéticamente activa (Figura 3). El espectro electromagnético referido a la reflectividad (entre los 400 y los 1500 nm) se puede dividir en cuatro regiones espectrales, el visible, el borde rojo, el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta (Figura 5). Éstas se detallan a continuación:

- Región del espectro visible (entre los 400 y 700 nm de longitud de onda): agrupa a las bandas centradas en la reflectividad de color azul, verde y rojo. Es en esta región en donde las moléculas de clorofila, y otros pigmentos de las hojas de las plantas, absorben fuertemente la radiación que utilizan para realizar fotosíntesis. Esto se observa en la forma que posee la curva de reflectividad de la vegetación sana en la región visible (Figura 5); en la región verde (~560 nm) se denota un máximo que determina el por qué vemos de color verde a las plantas, mientras que en la región azul (~460 nm) y roja (~660 nm) se ve una depresión, asociada a la absorción que produce la clorofila y otros

pigmentos en las hojas. Esta región del espectro electromagnético se le conoce también como “Radiación fotosintéticamente activa” (o *PAR* por su sigla en inglés).

- Región denominada borde rojo o “red-edge” (~700 a 800 nm): es la transición entre el visible y el infrarrojo cercano, y es donde se produce un ascenso significativo, con alta pendiente, de la reflectividad de las cubiertas con vegetación (Figura 5). La energía incidente sobre la vegetación, en esta región del espectro electromagnético, es capaz de penetrar las hojas mejor que la radiación roja. Las bandas presentes en esta zona son muy sensibles a los distintos contenidos de clorofila, sobre todo en plantas adultas con hojas maduras.
- Región del infrarrojo cercano (~800 a 1.400 nm): en donde la vegetación sana presenta los mayores valores de reflectividad, formando una meseta (Figura 5). Para estos niveles de radiación, la estructura interna de las hojas refleja en gran medida la energía incidente. A mayor cantidad de capas de hojas, mayor es el efecto sobre estas longitudes de onda. Esta región, además, aporta información relacionada con el contenido de materia seca.
- Región del infrarrojo de onda corta (SWIR) o infrarrojo medio (~1.400 a 2.500 nm): posee una alta sensibilidad al contenido de agua en la vegetación y a la estructura del mesófilo esponjoso de las hojas, presentando dos sectores: de alta absorción y baja reflectividad, cerca de los 1.500 y 2.000 nm, aproximadamente (Figura 5).

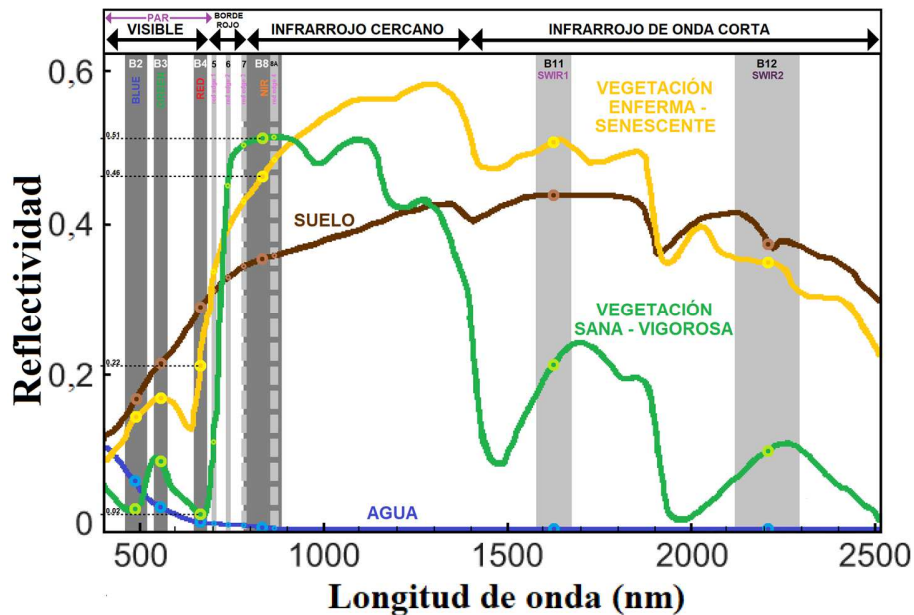


Figura 5. Firma espectral (reflectividad por longitud de onda) de cuatro tipos de cubiertas de suelo típicas (líneas continuas en colores). Se muestran: en el encabezado superior el nombre y extensión de las regiones del espectro electromagnético; barras grises los rangos espectrales que abarcan las bandas del sensor MSI de Sentinel-2 (el nombre y número de cada banda se muestra en la parte superior de cada barra); en gris oscuro las bandas con resolución espacial de 10 metros; las gris claro las de 20 metros (las bandas que presentan traslape se muestran como barras entrecortadas); las circunferencias en la intersección de la firma espectral y las bandas representan el valor de reflectividad que toma la banda satelital en el rango definido por el ancho de cada barra; como ejemplo se incluyen líneas punteadas negras con proyección al eje Y de la reflectividad de la banda roja e infrarroja cercana para dos tipos de cubiertas vegetales.

La Figura 5 se traduce en que, si la reflectividad en el infrarrojo cercano es notablemente superior a la reflectividad en el visible, la vegetación en ese píxel tiende a ser densa, asociándose a sectores boscosos o sanos. Si existe poca diferencia en la intensidad de la reflectividad entre el infrarrojo cercano y el visible (pero manteniéndose la reflectividad del infrarrojo por sobre la del visible), generalmente, se está en presencia de vegetación dispersa, menos densa o, incluso, entrando en senescencia. Por otro lado, si la reflectividad del visible es mayor que la reflectividad del infrarrojo cercano, se está en presencia de un píxel que no posee vegetación, como podría ser el caso de cubiertas de agua (Figura 5).

Estas variaciones en los valores de la curva de reflectividad, que representa la firma espectral, son las que sustentan la base teórica de los índices de vegetación, pues los índices espectrales son relaciones matemáticas entre las magnitudes de reflectividad que se alcanza en distintas regiones del espectro electromagnético. Estos se calculan a partir de dos o más bandas espectrales satelitales, por medio de una operación algebraica con los valores de cada píxel, de una o más bandas, respecto a los valores del mismo píxel en otra u otras

bandas espectrales. Estos índices tienen la peculiaridad de resaltar ciertas propiedades espectrales de las distintas cubiertas presentes en cada imagen y, cuando destacan atributos de las cubiertas vegetales, se les denomina específicamente como índices de vegetación. Para lograr comprender de mejor forma el cómo estos índices pueden llegar a representar aspectos de la vegetación, los que, a su vez, pueden ayudar en el manejo agronómico de los cultivos, se explica en el siguiente ejemplo:

En la Figura 5 se aprecian cuatro firmas espectrales determinadas por los valores de reflectividad de cada cobertura: vegetación sana, vegetación enferma, suelo y agua. Los sensores satelitales captan la reflectividad en bandas espectrales (franjas grises en la Figura 5), es decir, realizan una simplificación de la información, quedándose sólo con partes de esta firma espectral continua. La línea punteada negra en la Figura 5 muestra los valores de reflectividad para la banda NIR y RED de la firma espectral de la vegetación sana y enferma. Uno de los índices de vegetación más utilizados es el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, por sus siglas en inglés, o Índice de vegetación de diferencia normalizada), el cual ocupa las bandas NIR y RED para su estimación. Según los valores presentados en la Figura 5, el cálculo de NDVI sería el siguiente:

$$NDVI_{veg\ sana} = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} = \frac{(0,51 - 0,02)}{(0,51 + 0,02)} = \frac{0,49}{0,53} = \mathbf{0,92}$$

$$NDVI_{veg\ enferma} = \frac{(0,46 - 0,22)}{(0,46 + 0,22)} = \frac{0,24}{0,68} = \mathbf{0,35}$$

Siguiendo lo anterior, si se obtienen los valores de reflectividad, proyectando la banda RED y NIR de las firmas espectrales del suelo y el agua (Figura 5), se obtiene:

$$NDVI_{suelo} = \frac{(0,36 - 0,29)}{(0,36 + 0,29)} = \frac{0,07}{0,65} = \mathbf{0,10}$$

$$NDVI_{agua} = \frac{(0,005 - 0,013)}{(0,005 + 0,013)} = \frac{-0,008}{0,018} = \mathbf{-0,44}$$

Los resultados de estos cálculos representan el NDVI calculado para cada píxel presente en cada imagen. Se puede observar que a mayor NDVI, más sana y vigorosa está la vegetación. Por otro lado, valores menores a 0,3 pueden representar al suelo desnudo, y valores negativos se asocian a cuerpos de agua. De esta misma forma son calculados los demás índices vegetacionales utilizados en la plataforma geoespacial (Cuadro 1).

Lo anterior quiere decir que el NDVI, al igual que todos los otros índices, da una idea de las diferencias que se ve en la parcela (medidas relativas a cada cuartel), por lo que no representa directamente el por qué se producen estas diferencias y, por ende, no indica cómo trabajar para neutralizarlas. De esta manera, para hacer operativos a estos índices, y utilizarlos como herramientas de toma de decisión, se hace indispensable hacer el nexo de éstos con información y conocimiento del terreno, además del respectivo conocimiento del agricultor que maneja el predio.

Cuadro 1. Detalle de los índices de vegetación calculados a partir de las distintas bandas espectrales Sentinel-2 en un nivel de procesamiento L2A. La columna “Res.” indica la resolución espacial del índice en metros. El número de banda en la fórmula corresponde al presentado en la Figura 3. El subíndice ₂₀ indica que para el cálculo del respectivo índice se utilizó la banda remuestreada a una resolución espacial de 20x20.

Res.	N°	Nombre	Abreviación	Fórmula	Referencia
10	1	<i>Normalised difference vegetation index</i>	NDVI	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	Tucker et al., 1979
	2	<i>Green normalized difference vegetation index</i>	gNDVI	$(B8 - B3) / (B8 + B3)$	Gitelson et al., 1996
	3	<i>Enhanced vegetation index</i>	EVI	$(2.5*(B8 - B4)) / (B8 + (6*B4) - (7.5*B2) + 1)$	Huete et al., 2002
	4	<i>Normalised difference vegetation index</i>	NDVI ₂₀	$(B8A - B4_{20}) / (B8A + B4_{20})$	Tucker et al., 1979
	5	<i>Green normalized difference vegetation index</i>	gNDVI ₂₀	$(B8A - B3_{20}) / (B8A + B3_{20})$	Gitelson et al., 1996
20	6	<i>Enhanced vegetation index</i>	EVI ₂₀	$(2.5*(B8A - B4_{20})) / (B8A + (6*B4_{20}) - (7.5*B2_{20}) + 1)$	Huete et al., 2002
	7	<i>Normalised difference water index</i>	NDWI	$(B8A - B11) / (B8A + B11)$	Gao, 1996
	8	<i>Moisture stress index</i>	MSI	$(B11 / B8A)$	Hunt & Rock, 1989
	9	<i>Normalized difference red-edge index 1</i>	NDRE1	$(B6 - B5) / (B6 + B5)$	Sims & Gamon, 2002
	10	<i>Chlorophyll index red edge</i>	CIr	$(B7 / B5) - 1$	Gitelson et al., 2006

En síntesis, la fotosíntesis neta de una planta, así como otros atributos de ésta, está directamente relacionada con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa que absorbe. Mientras más luz solar visible absorba la planta durante la temporada de crecimiento, más fotosintetiza y más productiva será, y viceversa. Cualquiera de los escenarios da como resultado un valor de un índice de vegetación, que, en el tiempo, puede promediarse para establecer las condiciones de crecimiento "normales" para la vegetación en una región y época determinada del año. El reflejo de la radiación, durante un período de tiempo determinado para un predio en estudio, puede usarse para caracterizar distintos atributos de la vegetación allí presente, en relación con el comportamiento “normal” de cada índice. Esto fundamenta la utilización de los productos estadísticos espacio-temporales. Tanto los productos estadísticos descriptivos espacio-temporales como el producto estadístico de agrupación espacio-temporal (Anexo, Cuadro 1).

La imagen digital

Cada imagen digital se almacena en un formato denominado “ráster”, el cual está compuesto por píxeles ordenados en una grilla bidimensional, matriz que posee un número

finito de filas y columnas. Cada píxel posee un único valor numérico que representa el promedio de la reflectividad captada por el sensor en un rango espectral determinado y dentro de una extensión geográfica determinada (Figura 6). La reflectividad es variable de acuerdo a la longitud de onda considerada (o banda satelital), siendo esta variabilidad propia a la naturaleza de la superficie considerada. De esta forma, cada píxel o zona posee una única reflectividad, la cual varía de acuerdo al espectro electromagnético, generando una huella o firma espectral (Figura 6). Los distintos tipos de cubiertas terrestres pueden ser diferenciadas a partir de su firma espectral lo que es uno de los fundamentos de la teledetección.

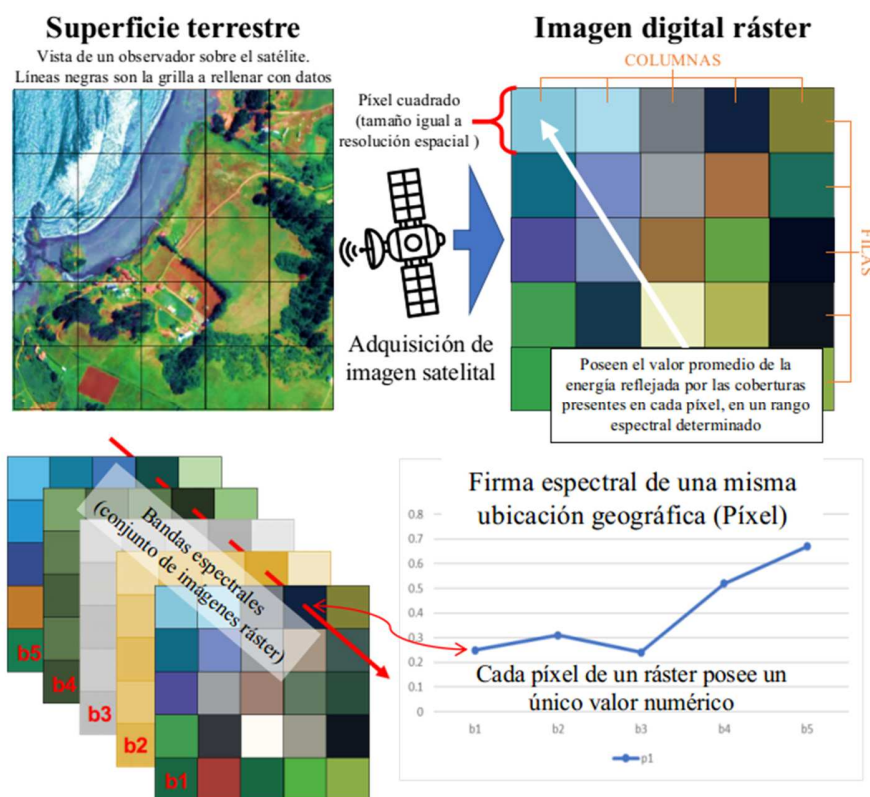


Figura 6. Esquema resumen de la adquisición de una imagen satelital ráster. Cada color de los píxeles mostrados se genera a partir de un único valor numérico. Este valor inicialmente es un nivel digital (valor entero entre 0 y 4095 en el caso del sensor MSI), el cual se puede transformar mediante ecuaciones conocidas en valores de radiancia o reflectividad (eje Y en gráfico de firma espectral).

Una vez que el sensor remoto adquiere los datos que formarán la imagen satelital, éstos son procesados, sistemáticamente, para generar un conjunto de productos básicos predefinidos, los que se asocian a un nivel de procesamiento determinado (ESA, 2014). A un mayor nivel de procesamiento que posea la imagen, mayor es la cantidad de procesamientos y

algoritmos por los que han pasado los valores de los píxeles de las distintas bandas. En el caso particular de Sentinel-2, el nivel de procesamiento 0 (L0) y 1A (L1A) no están disponibles para ser utilizados por los usuarios. L0 y L1A contienen los datos brutos (niveles digitales) del sensor. Los niveles de procesamiento que estiman reflectividad son el L1C (reflectividad al tope de la atmósfera, TOA) y el L2A (reflectividad al fondo de la atmósfera, “*Bottom-Of-Atmosphere*”, BOA); ambos presentan una corrección de las distorsiones geométricas y de escalas (llamado ortorectificación) de las imágenes, las cuales abarcan extensiones espaciales de 10.000 km² (100x100 km), llamadas “tiles” (baldosas), y que están proyectadas al sistema de coordenadas UTM, datum WGS84. Los datos que se utilizan en los análisis y visualizaciones, incluidos en la presente plataforma geoespacial, se basan en la reflectividad BOA, o reflectividad de superficie, es decir, el producto Sentinel-2 con un nivel de procesamiento L2A. Este nivel se alcanza al aplicar una corrección atmosférica (eliminación del efecto atmosférico sobre los píxeles de cada banda espectral), sobre el producto en nivel de procesamiento L1C (ESA, 2015).

Cabe destacar que las nubes, los aerosoles atmosféricos y el humo (incendios), a menudo, pueden bloquear por completo la vista de la superficie por los satélites; el resplandor del sol puede saturar ciertos píxeles, y el mal funcionamiento temporal de los propios instrumentos satelitales puede distorsionar una imagen, pudiendo generar vacíos en los datos utilizados en la plataforma geoespacial.

Teniendo en cuenta la información y características básicas anteriores, se presentan algunos antecedentes generales sobre la plataforma geoespacial desarrollada en el presente proyecto, mostrando elementos de su constitución y funcionamiento.

Generalidades de una plataforma geoespacial

La plataforma geoespacial se compone por un programa informático de descarga y procesamiento de imágenes satelitales (máquina virtual de cómputo, MVC) y por una aplicación web, que permite la visualización e interacción geoespacial con información previamente recopilada y generada (servidor web, SW). El objetivo de una plataforma geoespacial es la generación y despliegue de información espacialmente explícita, que permita la optimización del manejo agronómico de predios agrícolas.

Una plataforma geoespacial consta de programas basales escritos en lenguaje de programación, donde los códigos permiten realizar tareas de forma automatizada. La información que alimenta esta plataforma permite alimentar una MVC, la cual es equivalente a un cerebro artificial. Esta contiene de forma concatenada los diferentes procesos informáticos que realizan la transformación de datos externos en salidas en forma de mapas de diagnóstico para el manejo agrícola (Figura 7).

Diagrama funcionamiento Plataforma Geoespacial

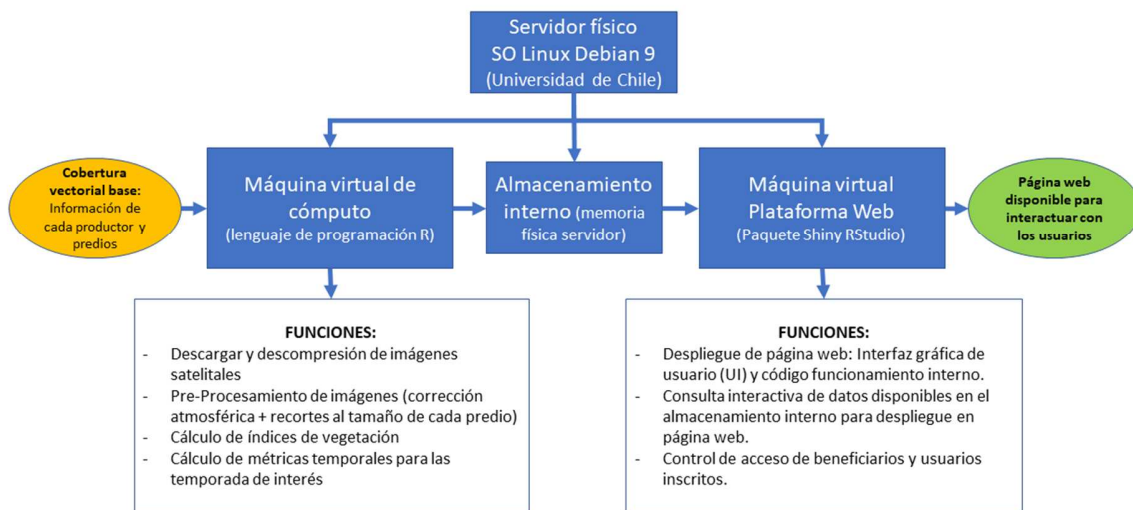


Figura 7. Representación esquemática del funcionamiento de la plataforma geoespacial generada para el proyecto FIC-R O'Higgins "Plataforma geoespacial para la optimización del recurso hídrico en cultivos de paltos y cítricos de agricultores pequeños y de subsistencia".

La función y procesos de la MVC, correspondiente a la plataforma geoespacial del proyecto, se describe en ocho pasos:

1. Descarga automatizada de imágenes satelitales.
2. Descompresión automática de los archivos originales.
3. Corrección atmosférica para imágenes que no tengan este preprocesamiento.
4. Preprocesamiento de todas las imágenes para que sean homologables entre sí, de acuerdo al área de estudio establecida.
5. Generación de imágenes de referencia, basadas en falso color RGB visible y falso color convencional en formato imagen, para todas las imágenes.
6. Generación de un mosaico RGB de imágenes de alta resolución espacial (~1 metro), como Google Maps.
7. Cálculo de índices de vegetación a partir de las bandas espectrales para la extensión completa en estudio (Figura 8), y para cada uno de los predios (Cuadro 1).
8. Generación de productos estadísticos descriptivos espacio-temporales y producto estadístico de agrupación espacio-temporal (Figura 9).

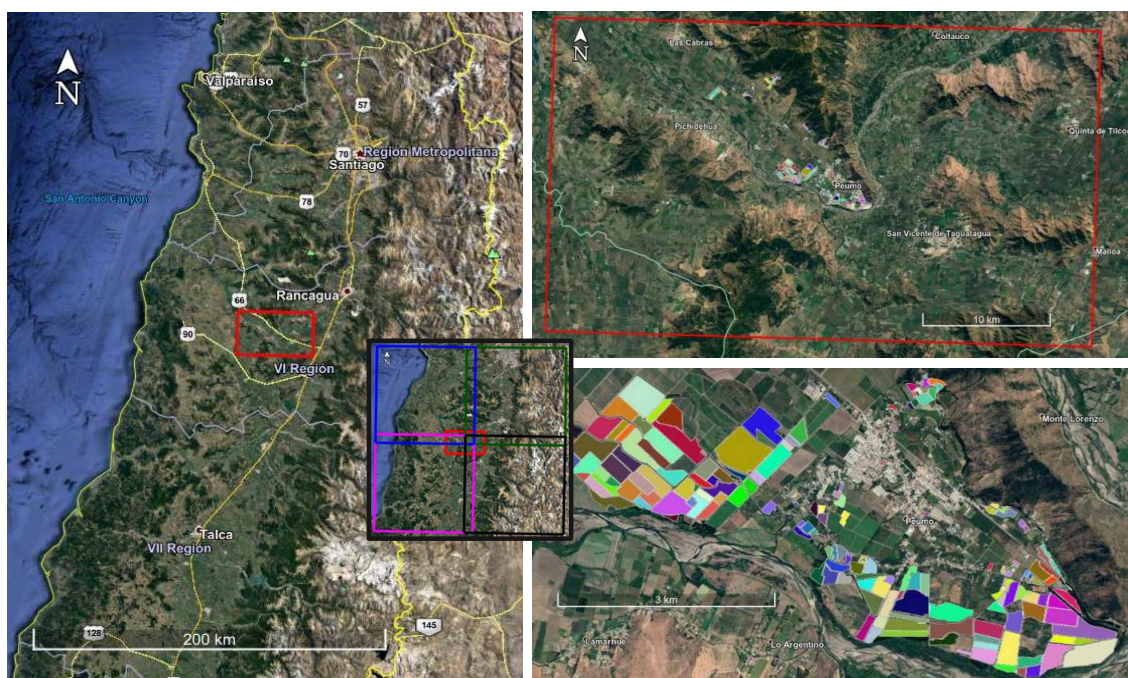


Figura 8: Extensión del área de estudio (polígono rojo) y detalle de parte de los predios incluidos en la plataforma geoespacial (polígonos de colores sólidos). En el recuadro central se muestra la posición de los “tiles” de Sentinel-2 que intersecan el área de estudio.

Los productos estadísticos descriptivos espacio-temporales corresponden a operaciones algebraicas que utilizan los valores calculados de los índices de vegetación de los píxeles, filtrados y enmascarados para cada uno de los predios en estudio. Estas operaciones se aplican considerando todas las imágenes adquiridas dentro de un rango temporal previamente establecido; a estos rangos de fechas se les denomina temporadas, las que pueden ser fijas (temporadas preestablecidas) o variables (temporada personalizable). Se incluyen tres temporadas fijas: temporada de riego, temporada estival y temporada invernal. Por su parte, en la temporada variable, las fechas inicial y final son personalizables manualmente por el usuario (Cuadro 2).

Cuadro 2. Temporadas consideradas en la generación de los productos estadísticos descriptivos espacio-temporales, y fechas inicial y final que deben tener las imágenes para el cálculo de dichos productos.

Tipo	Nombre	Fecha inicial	Fecha final
Temporadas fijas	Temporada de riego	01 de septiembre de un año particular	31 de mayo del año siguiente
	Temporada estival	01 de diciembre de un año en particular	31 de marzo del año siguiente
	Temporada invernal	01 de mayo de un año en particular	31 de septiembre del mismo año
Temporada variable	Temporada personalizada	Definible por el usuario	Definible por el usuario

Las operaciones algebraicas consideradas para las temporadas entregan el valor mínimo (MIN), máximo (MAX), mediana (ME), media (X), desviación estándar (SD), coeficiente de variación (CV) y la desviación absoluta de la mediana (MAD) para la temporada, de cada predio. Además, se incluye la obtención de la diferencia (DIF) entre dos fechas para cualquiera de estos productos estadísticos y de los índices de vegetación (Figura 9).

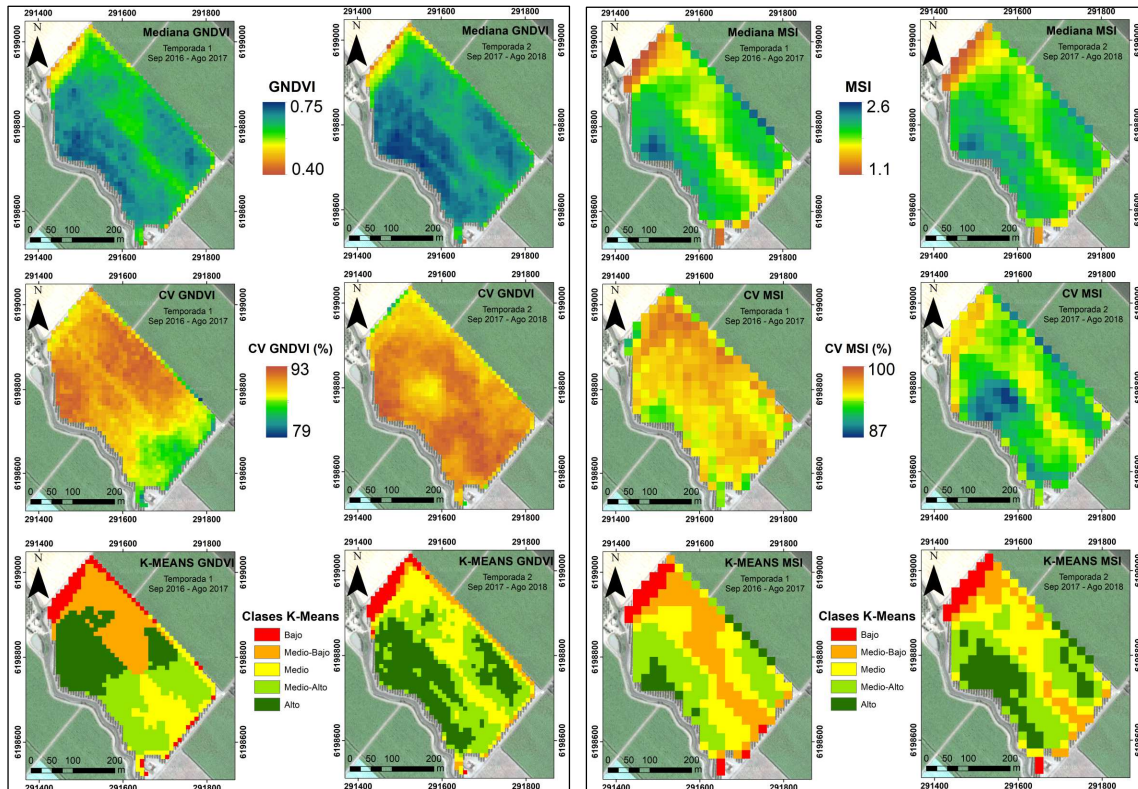


Figura 9. Cartografías de los productos de la plataforma geoespacial, comparando dos temporadas productivas (septiembre de 2016 a agosto de 2017 versus septiembre de 2017 a agosto de 2018); en el panel izquierdo (enmarcado en negro), los índices de vegetación GNDVI a 10 metros de resolución espacial; en el panel derecho, el índice de vegetación MSI a 20 metros de resolución espacial. De arriba a abajo, la mediana temporal; el coeficiente de variación temporal (CV) , y los mapas del análisis de *cluster* (sectorización automática) utilizando el algoritmo K-MEANS.

El producto estadístico de agrupación espacio-temporal se obtiene mediante la utilización de la técnica estadística multivariante K-MEANS, ampliamente utilizada para la realización de análisis de *cluster* o análisis de conglomerados (Kassambara, 2015) y en la clasificación no supervisada de imágenes satelitales (Borra et al., 2019). Esta técnica tiene por finalidad agrupar elementos (en este caso, píxeles), procurando lograr la máxima homogeneidad

interna de cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. Esto lo realiza de forma automática y considerando la propia esencia de los datos suministrados (no supervisado), ordenándolos de forma iterativa en grupos homogéneos (conglomerados o *cluster*) que no son conocidos de antemano, pero que se forman a partir de las similitudes y diferencias entre los valores de los píxeles y su distancia a las medias de los *clusters* (Borra et al., 2019). En la práctica, dichos conglomerados de píxeles son sectores que poseen características y comportamiento espectral-temporal similar y, por ende, una respuesta agronómica similar, es decir, sirven como un mapa de sectorización de cada predio que puede ser utilizado para dirigir de mejor forma el manejo de este.

Finalmente, a cada producto generado en esta última etapa, se les da una representación cartográfica (mapa) acotada a una escala predial, y se dejan disponibles para ser utilizadas por parte de la plataforma web (figuras 8 y 9).

En el Anexo de este capítulo se entrega un resumen, descripción e interpretación de los productos satelitales generados.

Conclusiones y recomendaciones

La teledetección se ha vuelto un actor clave en la agricultura del siglo XXI, al proveer de cuantiosa información de libre acceso para todo el mundo y con una periodicidad que permite realizar evaluaciones objetivas de diversas propiedades de los cultivos. La inclusión de esta información en plataformas geoespaciales de uso amigable, para agricultores y asesores agrícolas, resulta fundamental para garantizar una correcta asimilación de la información disponible.

La implementación de estas tecnologías está sujeta a la interpretación de los conceptos fundamentales que rigen los principios de la teledetección, por lo que se debe tener precaución de los alcances que permite la tecnología. El trabajo conjunto entre diferentes actores, del mundo académico, agricultores, empresas y organismos públicos, resulta esencial para adoptar esta tecnología en todos los sectores de la agricultura.

Referencias

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING. 2007. Fundamentals of Remote Sensing.

En:

https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf. Visitado el: 30 de octubre de 2019.

BORRA, S.; R. THANKI AND N. DEY. 2019. Satellite image analysis: clustering and classification. Springer Briefs in Computational Intelligence. 97p.

- EUROPEAN SPATIAL AGENCY (ESA). 2014. The Copernicus Space component (CSC): Sentinels Data Products list. 18 p.
- EUROPEAN SPATIAL AGENCY (ESA). 2015. Sentinel-2 user handbook. ESA Standard Document. 64 p.
- EUROPEAN SPATIAL AGENCY (ESA). 2019. Copernicus open access hub. En: <https://scihub.copernicus.eu/> Visitado el 28 de octubre de 2019.
- GAO, B. 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257–266.
- GITELSON, A.; Y. KAUFMAN AND M. MERZLYAK. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 58(3): 289–298.
- GITELSON, A.; A. VINA; S. VERMA; D. RUNDQUIST; T. ARKEBAUER; G. KEYDA ET AL. 2006. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research*, 111: 1-13.
- HUETE, A.; K. DIDAN; T. MIURA; E. RODRÍGUEZ; X. GAO AND L. FERREIRA. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83: 195–213.
- HUNT J. AND B. ROCK. 1989. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*. 30(1): 43–54.
- KASSAMBARA, A. 2015. *Multivariate Analysis 1: Practical Guide to Cluster Analysis in R (real version)*. Taylor & Francis Group, 1–187.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). 2015. Comparison of Landsat 7 and 8 bands with Sentinel-2. En: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/Landsat.v.Sentinel-2.png>. Visitado el: 30 de octubre de 2019.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). 2019. *Landsat Science: The Landsat Program*. En: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>. Visitado el: 30 de octubre de 2019.
- RONAN, P. 2008. Image: EM spectrum.svg, Permission CC BY-SA 3.0. En: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2521356>.
- SIMS, D. AND J. GAMON. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81: 337–354.

TUCKER, C.; J. ELGIN; J. MCMURTREY AND C. FAN. 1979. Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 8(3): 237–248.

Anexo

Cuadro 1. Resumen, descripción e interpretación de los productos satelitales generados por la plataforma geoespacial.

N°	Tipo de producto	Nombre	Rango	Descripción e interpretación
1	Índices espectrales / índices de vegetación	NDVI	-1 a 1	<p>Este corresponde a uno de los índices más utilizados para describir la cantidad de vegetación (biomasa) presente en un píxel y se asocia al vigor fotosintético o verdor de esta. A mayor NDVI, más capas de vegetación y vigor posee un píxel de cultivo.</p> <p>Los píxeles con valores negativos de NDVI (entre -1 y -0,1) corresponden a cuerpos de agua. Valores entre -0,1 y 0,1 se asocian a suelos desnudos, recién labrados, afloramientos rocosos o nieve. Valores positivos bajos (0,2 - 0,4 aprox.) representan arbustos o pastizales; así como también plantas incipientes, con caída o decoloración de hojas. Valores sobre 0,4 y cercanos a 1 representan plantas fotosintéticamente activas.</p>
2		GNDVI	-1 a 1	<p>Este índice es una versión modificada del NDVI (utiliza la banda verde en vez de la roja), que mejora la sensibilidad a la variación del contenido de clorofila en el cultivo, asociado a la cantidad de nitrógeno en el follaje, y es considerablemente más sensible a la variabilidad de la vegetación cuando la cobertura (LAI; índice de área foliar) es elevada.</p> <p>Se interpreta de manera similar al NDVI. Los píxeles con valores entre -1 y 0,2 se asocian a sectores de cuerpos de agua, suelos desnudos, recién labrados, afloramientos rocosos o nieve. Valores mayores a 0,2 se asocian de manera directamente proporcional con el aumento progresivo de la cubierta vegetal (estado de desarrollo de las plantas) y la sanidad del cultivo.</p>
3		EVI	-1 a 1	<p>Este índice es calculado de manera similar al NDVI (al igual que su interpretación), pero incluyendo factores de corrección de distorsiones en la reflectividad, causadas por partículas en el aire y por coberturas de suelo bajo la copa. Además, tiende a no saturarse con el aumento de la cobertura vegetal y concentración de clorofila presente en un píxel determinado, haciéndolo más sensible tanto a la vegetación incipiente, como a la vegetación más densa.</p> <p>Valores mayores a 0 están asociados a presencia de vegetación, mostrando a la vegetación sana entre 0,2 y 0,8.</p>
4		NDWI	-1 a 1	<p>Este índice refleja el contenido de humedad en plantas y suelos. Su interpretación es directamente proporcional, es decir, mientras más alto el valor de este, más alto es el contenido de agua (humedad) en las plantas y/o el suelo; valores bajos representan baja humedad (estrés hídrico) o una baja cobertura vegetal. Durante los períodos de estrés hídrico, el valor del NDWI disminuye y viceversa.</p>

(continuación)

5	MSI	-1 a 1	<p>Este índice se asocia al estrés hídrico en el follaje y a la producción de biomasa en el cultivo.</p> <p>Su interpretación es inversamente proporcional, es decir, a valores más altos, existe un mayor estrés hídrico de las plantas y, por ende, un menor contenido de humedad del suelo.</p> <p>A medida que la vegetación se seca, se produce un aumento de reflectividad en la banda roja y en el infrarrojo de onda corta (zona de absorción de agua), resultando en un mayor grado de estrés hídrico. Un cultivo en buen estado hídrico presenta valores entre 0,2 y 0,45, mientras que la vegetación con estrés hídrico muestra valores entre 0,45 y 0,6. Los valores 0 y negativos corresponden a suelo descubierto o cuerpos de agua, mientras que valores mayores a 0,7 son considerados extremos y rara vez se presentan.</p>
6	Índices espectrales / índices de vegetación NDRE1	-1 a 1	<p>Las bandas presentes en el borde rojo (red-edge) son muy sensibles a los distintos contenidos de clorofila; esto hace que los índices que utilizan estas bandas sean buenos indicadores de la salud del cultivo en etapas de desarrollo medias y tardías, donde la clorofila es relativamente alta. Además, este tipo de índices se utilizan para representar la variabilidad del nitrógeno foliar, lo cual puede ayudar en la comprensión de los requerimientos de fertilizantes en los cultivos.</p>
7	CIr	0 a 15	<p>Este índice se asocia al contenido total de clorofila en las hojas del cultivo (relación lineal, directamente proporcional), siendo muy sensible a pequeñas variaciones en la cantidad de clorofila, de manera consistente entre distintas especies vegetales. Utiliza las bandas de reflectividad estrechas presentes en la transición del rojo y el infrarrojo cercano. Valores cercanos a 5 han mostrado una concentración de clorofila total de 2 g/m² en distintos tipos de cultivos. Este valor aumenta o disminuye de manera lineal, con pequeñas variaciones entre especies.</p>

(continuación)

8	MIN	Según cada índice de vegetación	<p>De cada píxel se obtiene el valor mínimo entre todos los valores del píxel, dentro de una temporada determinada, de los distintos índices vegetacionales. El rango de valores que toma depende del índice de vegetación que se esté evaluando.</p> <p>En términos prácticos, este producto da cuenta de cuán bajo ha sido el comportamiento en el tiempo de determinado índice vegetacional.</p>
9	MAX	Según cada índice de vegetación	<p>De cada píxel se obtiene el valor máximo entre todos los valores del píxel, dentro de una temporada determinada, de los distintos índices vegetacionales. El rango de valores que toma depende del índice de vegetación que se esté evaluando.</p> <p>En términos prácticos, este producto da cuenta de cuán alto ha sido el comportamiento en el tiempo de determinado índice vegetacional.</p>
10	X	Según cada índice de vegetación	<p>Para cada píxel se obtiene el valor promedio (media aritmética) de todos los valores del píxel, dentro de una temporada determinada, de los distintos índices vegetacionales. El rango de valores que toma depende del índice de vegetación que se esté evaluando. Corresponde a la medida de tendencia central más utilizada, y resume en un valor todos los valores con que se calcula (valor representativo). Sin embargo, este valor se ve afectado fuertemente cuando existen valores extremos (muy altos o bajos) en los datos.</p>
11	SD	Según cada índice de vegetación	<p>Se obtiene para cada píxel el valor de la desviación estándar (estadístico que describe que tan dispersos o variables son los datos) de todos los valores del píxel, dentro de una temporada determinada, de los distintos índices vegetacionales. El rango de valores que toma depende del índice de vegetación que se esté evaluando.</p> <p>De forma general, mientras mayor sea la SD, más variables en el tiempo son los valores del índice analizado y, viceversa. Dependiendo de cómo se mire, lo anterior puede tener implicancias positivas o negativas, ya que puede ser deseable que un índice se mantenga estable en el tiempo o no.</p>
12	CV	Relativo a cada índice de vegetación	<p>Para cada píxel se obtiene el coeficiente de variación (medida de dispersión estadística relativa) de todos los valores del píxel, de una temporada determinada, de los distintos índices vegetacionales. Este coeficiente es una proporción de la variabilidad de los datos (DS) en relación a la media de los mismos. Se calcula dividiendo la desviación estándar por el promedio de cada píxel.</p> <p>De manera general, valores bajo 0,4 de CV representan una baja a moderada variabilidad del índice (datos homogéneos, la media es más representativa), mientras que valores sobre 0,4 se asocian a una variabilidad alta a muy alta (datos heterogéneos, media menos representativa).</p>

(continuación)

13		ME	Relativo a cada índice de vegetación Para cada píxel se obtiene el valor de la mediana (valor ubicado en el centro al ordenar todos los datos de menor a mayor) de todos los valores del píxel, dentro de una temporada determinada, de los distintos índices vegetacionales. El rango de valores que toma depende del índice de vegetación que se esté evaluando. Al igual que la media, también es una medida de tendencia central que resume en un valor todos los valores con los que se calcula (valor representativo). Esta medida no se afecta por valores extremos (muy altos o muy bajos), lo que hace que en ciertas condiciones tienda a ser más representativa que la media.
14	Productos estadísticos descriptivos espacio-temporales	MAD	Relativo a cada índice de vegetación Para cada píxel se obtiene la desviación absoluta de la mediana (medida de dispersión estadística) calculada con todos los valores del píxel, dentro de una temporada determinada, de los distintos índices vegetacionales. Esta medida, al igual que la desviación estándar, muestra la variabilidad de los datos respecto a una medida de tendencia central, en este caso es la mediana. Como utiliza la mediana en su cálculo, esta medida no se ve afectada por posibles valores extremos en los datos. De forma general, mientras mayor sea la MAD, más variables, en el tiempo, son los valores del índice analizado y, viceversa. Dependiendo de cómo se mire, lo anterior puede tener implicancias positivas o negativas, ya que puede ser deseable que un índice se mantenga estable en el tiempo o no.
15		DIF	Relativo a cada índice de vegetación o métrica espacio-temporal Para cada píxel se obtiene la diferencia (resta), entre dos fechas que se requieren comparar, de cualquier índice de vegetación o variable espacio-temporal. Este producto se obtiene de manera interactiva, lo que quiere decir que el usuario es quien define que variable quiere analizar, y en qué periodo de tiempo, definiendo una fecha inicial y una final. De forma general, valores cercanos a 0 representan que no hay cambio en el periodo de tiempo, mientras que valores positivos o negativos representan cambios en el periodo. Dichos cambios se interpretan dependiendo del índice o variable que se esté analizando y del orden en que se agreguen las fechas de interés.

(continuación)

<p>Producto estadístico agrupación espacio-temporal</p>	<p>KMEANS</p>	<p>1 - 5</p>	<p>Cada píxel se asigna a uno de cinco grupo/clase/sector/<i>clúster</i> de comportamiento homogéneo, generados a partir del algoritmo de agrupación espectral KMEANS, para cualquiera de los índices de vegetación calculados para una temporada determinada.</p> <p>Los grupo/clase/sector/<i>cluster</i> se ordenan de menor a mayor (1 a 5), y representan, respectivamente, a valores bajos, medios-bajos, medios, medios-altos y altos, del índice considerado en el algoritmo de agrupación KMEANS.</p> <p>En términos prácticos, cada agrupación de píxeles similares representa una zona con un comportamiento similar entre sí, lo que sustenta que sean posibles de ser consideradas de una misma forma, como una unidad de manejo agronómico. Esto último debe validarse con información desprendida del análisis temporal de las variables disponibles en cada predio y en base a datos e información adquirida en terreno.</p>
<p>17</p> <p>Productos gráficos</p>	<p>Gráficos estáticos (Histograma y gráfico de caja o boxplot)</p>	<p>Relativo a cada variable o índice de vegetación</p>	<p>Gráficos estadísticos que resumen los datos generados por los productos espacio-temporales. El histograma muestra la frecuencia de los valores que toman los píxeles para cada variable o índice de vegetación; el gráfico de caja o <i>boxplot</i> muestra de forma abreviada los estadísticos de posición principales: mínimo, máximo, 1^{er} cuartil (25% de los datos), 2^{do} cuartil o mediana (50% de los datos) y el 3^{er} cuartil (75% de los datos), para cada variable o índice de vegetación. Con ambos gráficos se puede observar la distribución y comportamiento general que presenta cada variable o índice de vegetación, lo que da cuenta de cómo se está comportando la información espacio-temporal disponible en la presente plataforma geoespacial.</p>
<p>18</p>	<p>Gráficos dinámicos (consultas espacio-temporales)</p>	<p>Relativo a cada variable o índice de vegetación</p>	<p>Gráficos dinámicos que muestran la variabilidad temporal de un índice de vegetación determinado, para un predio en estudio. Este gráfico muestra en el eje X el tiempo (desde el año 2015 en adelante) y en el eje Y el valor del índice de vegetación medio, mínimo y máximo para la fecha en que existe una imagen satelital de Sentinel-2. Este gráfico permite tener una visión temporal de la variabilidad de los distintos índices generados por la plataforma y, así, comprender el valor medio y sus altos y bajos.</p>

Los autores agradecen el financiamiento otorgado a través del Fondo de Innovación para la Competitividad del Gobierno Regional de O'Higgins y su Consejo Regional, enmarcado en la Estrategia Regional de Innovación, elaborado durante el desarrollo del proyecto FIC “Plataforma geoespacial para la optimización del recurso hídrico en cultivos de paltos y cítricos de agricultores pequeños y de subsistencia”



UNIVERSIDAD
DE CHILE



VÍCTOR BEYÁ-MARSHALL Y MAURICIO GALLEGUÍN
OPTIMIZACION DEL RENDIMIENTO Y COSTOS
DE UN PATENTE DE CHILE