



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Paquete tecnológico para la optimización del recurso hídrico en pequeños productores de aguacates y cítricos en Chile Central

Technological packages for optimizing water resources in avocado and citrus family farmers in the Central Chile

Víctor Beyá-Marshall¹, Brian Baeza¹, Chris Bustamante¹, Andrés Ceballos¹
Estefanía Pizarro¹, Óscar Seguel¹, Cristián Kremer¹, Rodrigo Callejas¹, Mauricio Galleguillos*¹

Recibido: 12/02/2021

Aceptado: 18/03/2021

*Autor de correspondencia

Resumen

En un contexto de cambio climático con menor disponibilidad de agua, resulta relevante incorporar tecnologías de riego que facilitan el uso eficiente y sustentable del agua en la agricultura familiar campesina (AFC). Por ello, se aplicó una metodología de estimación del tiempo y frecuencia de riego, utilizando tecnologías para el seguimiento del estado de la vegetación, la humedad de suelo y el diagnóstico físico de los suelos. Esta metodología se aplicó durante tres temporadas en huertos de aguacate y cítricos de 40 productores pertenecientes a la AFC de la región de O'Higgins, incorporando un fuerte componente de transferencia tecnológica. Los resultados indican que la principal limitante productiva, desde el punto de vista físico del suelo, correspondió al bajo nivel de poros gruesos ($>50 \mu\text{m}$), los cuales no superaron el 15% en el 60% de los casos, y, sumado a un ineficiente manejo del riego (sistemas de riego con baja mantención y erróneas prácticas de riego), ha limitado la productividad de estos frutales. Se logró un ahorro en el uso de agua de riego en el 96% de los productores, con una reducción promedio del consumo de agua de un 34% (3,221 m³ ha⁻¹ temporada). Esto permitió un aumento de la eficiencia del uso del agua de riego, una reducción del consumo eléctrico y un aumento monetario del uso de agua entre un 17% a 35%, dependiendo del parámetro, con respecto al manejo tradicional. Se concluye que el paquete tecnológico propuesto redujo considerablemente la brecha tecnológica en la AFC, optimizando así el recurso hídrico.

Palabras clave: Sonda de capacitancia, estado hídrico de suelo y planta, eficiencia en el uso del agua, teledetección, telemetría, agricultura familiar campesina.

Abstract

In a climate change scenario with less water availability, it becomes relevant to incorporate a technology that facilitates the efficient and sustainable use of water. To do this, was applied a methodology to estimate the time and frequency of irrigation using technologies that monitor the vegetation health (spatial and temporal), soil moisture, and assess the physical properties of the soil. This method was applied, during three seasons, in small-scale avocado and citrus orchards of 40 farmers in the O'Higgins region, with a strong technological transfer component. The results indicate that the main causes of low crop yields, regarding to the soil properties, corresponded to the low amount of coarse pores ($> 50 \mu\text{m}$), which did not exceed 15% in 60% of the cases, in addition to an inefficient irrigation management (poor irrigation systems maintenance and practices), has largely limited the productivity of these crops. Water savings were achieved in 96% of the producers, with an average reduction in water consumption of 34% (3,221 m³ ha⁻¹ per season). This allowed an increase in irrigation water use efficiency, a reduction in electricity consumption and an increase in water productivity, depending on the parameter, between 17% to 35% with respect to traditional management. It was concluded that the proposed technological package can considerably reduce the technological gap of the small producers, thus, optimizing the water resources.

Keywords: capacitance probes, soil and plant water status, water use efficiency, remote sensing, telemetry, family farmers.

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Centro de Regional de Estudios Agronómicos UCHILECREA. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile. mgalleguillos@renare.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

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 (Garreaud *et al.*, 2017; 2020) y, de acuerdo con las proyecciones de cambio climático, todo indica que el déficit será más profundo en el futuro, siendo Chile Central particularmente afectado (Bozkurt *et al.* 2018). En este sentido, el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), principal institución gubernamental de apoyo a la pequeña agricultura, ha fomentado 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 escenarios adversos, se requiere conjugar esfuerzos en diversas dimensiones, en especial para la agricultura familiar campesina, al ser un sector vulnerable a la escasez hídrica. En Chile, al igual que en el resto de América Latina, la agricultura familiar campesina (AFC) es un segmento social y económico de gran importancia, ya que representa un universo del orden de las 260,000 explotaciones, equivalentes a casi el 90% del total de unidades productivas del país (ODEPA, 2017). 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 costo, lo que atenta contra las posibles mejoras de su competitividad. A su vez, 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 este sentido, el desarrollo de una investigación e innovación participativa con los diferentes actores podría asegurar una mejor transferencia de la tecnología.

En la Región de O'Higgins, ubicada en Chile Central, la producción de aguacate (palto) 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-CIREN, 2018). 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.*, 2014a). A su vez, gran parte de los huertos están ubicados sobre suelos de clases texturales finas (suelos "pesados"), 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 aguacate, especie altamente susceptible a la baja aireación, baja porosidad, exceso de agua y compactación (Beyá-Marshall, *et al.*, 2020b). En este sentido, un grupo importante de agricultores, 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 (Programa de Desarrollo Local), tienen un gran interés en mejorar la competitividad de sus cultivos a través de la innovación de procesos. Es así como, para hacer frente a la escasez hídrica, solicitaron apoyo para la implementación de un paquete tecnológico de gestión del riego, el cual ya ha sido validado para la agricultura de exportación en Chile (Callejas *et al.*, 2014a; Callejas *et al.*, 2019), pero que en la pequeña agricultura resulta ser un desafío mayor, dada la importante brecha tecnológica. De esta manera, se 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 y desarrollado por el Centro Regional de Estudios Agronómicos (UCHILECREA), de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Dado el alto interés concitado, contó con la estrecha colaboración de pequeñas, medianas y grandes empresas ligadas a la producción de aguacate y cítricos de la región.

1.2 Objetivo

El objetivo fue desarrollar y transferir un paquete de herramientas tecnológicas para el riego de precisión en el cultivo de paltos y cítricos, con el fin de optimizar el recurso hídrico y mejorar la competitividad de la pequeña agricultura de la región. Los objetivos específicos fueron: 1) Establecer una plataforma de asistencia técnica continua del riego a través de herramientas tecnológicas de precisión (teledetección y sondas de capacitancia) que permitan disminuir la brecha tecnológica y, así, optimizar el

consumo de agua y electricidad; 2) Evaluar y optimizar la huella hídrica a nivel predial a través de teledetección y uso de modelos de transferencias hídricas; 3) Fortalecer las competencias para un correcto uso de la plataforma y difundir sus beneficios entre los actores involucrados.

2. METODOLOGÍA

El equipo de trabajo estuvo conformado por un grupo interdisciplinario de académicos y profesionales (suelos, riego, fisiología, modelación y teledetección), más el apoyo de estudiantes de pre y post grado, quienes realizaron sus memorias de título y/o tesis de grado en temáticas relacionadas.

2.1 Vinculación con actores involucrados y área de estudio

Se trabajó con 40 pequeños productores de aguacates y cítricos pertenecientes a la AFC de las comunas de Peumo, Pichidegua, Las Cabras y San Vicente de Tagua Tagua, Región de O'Higgins (Figura 1) y la Escuela Agrícola Jean Buchanan de Larráin de Peumo (JB). Estos agricultores pertenecen a diferentes organizaciones gremiales y cooperativas: AFRUPAL S.A, COOPEUMO, usuarios INDAP y PRODESAL. Se trabajó también con los técnicos transferencias, de manera de generar una red entre la Universidad, los técnicos de PRODESAL e INDAP, los productores y los profesores y alumnos del liceo técnico agrícola. Se realizaron reuniones generales de motivación y capacitación en el uso de tecnologías basadas en el internet de las cosas (vinculación de los datos de humedad de suelo a través de telemetría y vinculados a una plataforma con interfaz práctica para la gestión del riego). Esto se fortaleció con siete reuniones, a modo de días de campo masivos y jornadas de capacitación técnicas del tipo talleres, y de a lo menos 20 visitas por año en forma personalizada a cada productor, principalmente entre primavera y verano. Se hace hincapié en mencionar estas actividades, dado que a diferencia de las investigaciones clásicas en pequeñas unidades de estudio (grupo de plantas), la intervención de cuencas, y sobre todo cuando el público objetivo son pequeños agricultores, requiere de un trabajo de socialización y de adopción de la tecnología que se quiere instalar, de manera de asegurar su sustentabilidad en el tiempo. La superficie intervenida equivale a una superficie de 137 hectáreas de 5,029 hectáreas de la región destinada a estos cultivos, de las cuales el 81% cuenta con riego

tecnificado (goteo o microaspersión) y un 19% cuenta con riego tradicional (surco, tendido, tasas, bordes y platabandas) (ODEPA-CIREN, 2018). Si bien estas comunas pertenecen al extenso Valle del Cachapoal, sus condiciones geomorfológicas y cercanía al río Cachapoal, generan un microclima adecuado que les permiten tener una baja frecuencia de heladas, ideal para el cultivo de aguacates y cítricos. 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, un período seco de 7 meses y una evapotranspiración potencial anual de 1,375 mm. El principal cauce de la cuenca del Cachapoal (6,370 km²) es el río Cachapoal, que tiene una extensión de 250 km, el cual nace en la zona cordillerana de los Andes y desemboca en el río Rapel (DGA, 2004). Sin embargo, un alto número de productores cuentan con norias y pozos profundos, donde la profundidad del nivel freático varía, en general, de 3 a 10 metros (BiRH, 2020). Los suelos de la zona 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 (CIREN, 2002; Cuadro 1).

2.2. Diagnóstico de las propiedades físicas

Se realizó un diagnóstico de las condiciones físicas de suelo de 15 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 (Figura 2, A y B), evaluando textura, densidad aparente (D_a), distribución de tamaño de poros y retención de agua según Sandoval *et al.* (2012), mientras que en terreno se midió la resistencia a la penetración (RP), en condiciones de capacidad de campo, con un medidor de fuerza digital EXTECH (Figura 2, C) según la metodología propuesta por Lowery *et al.* (2002). Las propiedades físicas de suelo fueron cotejadas con los

niveles de vigor de los cuarteles, obtenido con índices de vigor fotosintético de la vegetación mediante imágenes satelitales, con el fin de conocer la variable de suelo que estuviera teniendo la mayor influencia en el vigor de las plantas.

2.3. Diagnóstico de los sistemas de riego.

Se realizó el diagnóstico del sistema de riego de 40 productores. Para ello se evaluaron indicadores de

uniformidad de riego y se revisaron el estado de los cabezales de riego, bombas, tuberías de succión y filtros. Se evaluaron en 16 a 20 goteros por sector de riego el caudal entregado por cada emisor siguiendo la metodología propuesta por ISO 9261 (2004), para luego calcular Coeficiente del área sub-irrigada (CU 25%) y el coeficiente de uniformidad (CU) de distribución de Christiansen (Christiansen, 1942), según las ecuaciones Eq 1. y Eq 2, respectivamente.

$$CU\ 25\% = \left(\frac{q\ 25\%}{q\ \bar{u}} \right) \times 100 \quad (1)$$

donde

CU 25% = Coeficiente del área sub-irrigada (%)

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)

$$CU(\%) = \left(1 - \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - X}{X \times n} \right| \right) \times 100 \quad (2)$$

donde

CU (%) = Coeficiente de uniformidad (%)

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

n = número de emisores evaluados (16 a 20)

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

2.3 Unidades de control del riego de lectura continua y uso de telemetría.

Las tecnologías que se integran en el paquete tecnológico para optimizar el riego y las metodologías de instalación se detallan en Callejas *et al.* (2014 a;b). Se instalaron a través del Valle del Cachapoal (Figura 1), 15 unidades de sondas de capacitancia (*Frequency Domain Reflectometry*; FDR) EnviroSCAN® (Sentek Sensor Technologies, Stepney, Australia) conformadas por 4 sensores ubicados cada 10 a 20 cm, permitiendo evaluar la humedad volumétrica del suelo a profundidades de 60 y 100 cm de profundidad (Figura 3, A). Se utilizaron las calibraciones de fábrica de los equipos para las estimaciones del contenido de agua. Las sondas de lectura continua (cada 15 minutos), se ubicaron en la sobrehilera 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 doble líneas de goteros, se ubicó a 10 cm del emisor de una de ellas. Las sondas estaban administradas por telemetría en una plataforma *on line* de gestión del riego (Dropcontrol, Wiseconn). Para esto, se montaron nodos *gateway* (concentrador y transmisor de datos) y nodos transmisores, a una altura de entre 4 a 8 m (Figura 3, B).

Los criterios a considerar para definir el lugar de instalación fueron: la productividad de los cuarteles y el tipo de suelo predominante, seleccionando el

sector que representa la expresión vegetativa del cuartel. Para objetivar este criterio de selección de sitio de instalación, se desarrolló una metodología de diagnóstico de la variabilidad temporal (temporada anterior a la instalación septiembre a mayo) y espacial del vigor de los huertos (Figura 4), a través de índices espectrales de vigor fotosintético de la vegetación, como el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), obtenido mediante imágenes satelitales (10 m x 10 m) del sensor MSI de Sentinel 2, agrupando las zonas a través del estadístico de agrupación espacio-temporal multivariante K-MEANS, ampliamente utilizado para la realización de Análisis de Clúster o Análisis de Conglomerados (Kassambara, 2015) y en la clasificación no supervisada de imágenes satelitales (Borra *et al.*, 2019). La información de la variabilidad del vigor se utilizó para identificar las zonas más homogéneas del cuartel, de manera de establecer la mejor ubicación para la sonda de seguimiento continuo de agua, seleccionando el lugar que permitiera tomar de manera representativa las decisiones de riego. Las Líneas de Gestión o indicadores de referencia para el uso de las sondas de capacitancia, requeridas para determinar el tiempo y la frecuencia de riego, se definieron de acuerdo a Abrisqueta *et al.* (2012), Thompson *et al.* (2007) y Callejas *et al.* (2014b). El primer componente es el nivel de lleno (NLL), 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. El segundo componente es la capacidad de campo sonda (CCs), obtenida después de un riego profuso (mínimo $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para riego por goteo) o lluvia abundante (superior a 50 mm), siendo dependiente de las características físicas del suelo. En este caso, se definieron aprovechando las lluvias invernales, considerando 1 día después de la lluvia para las texturas gruesas, 2 días para texturas medias y entre 3 a 4 días para texturas finas, esperando que se produjera el drenaje natural y se estabilizara el contenido de agua del suelo. El punto de recarga o Punto de quiebre “*Breaking point*” es el límite que marca el “déficit admisible”, y corresponde al momento en que hay que volver a regar, evitando provocar problemas fisiológicos y disminución del potencial productivo de las plantas (Callejas *et al.*, 2013). Este punto se define cuando se observa un cambio de la pendiente en la curva de extracción de agua desde el suelo por la planta, a una misma evapotranspiración referencial (Abrisqueta *et al.*, 2012; Thompson *et al.*, 2007).

2.4 Unidades de control del riego de lectura discontinua.

A su vez, se instalaron 25 unidades de control de lectura discontinua, conformadas por un tubo de acceso de PVC (Arregui y Quemada, 2006) y el uso del equipo Diviner 2000 (Sentek Sensor Technologies). El tubo de acceso se instaló siguiendo la misma metodología descrita anteriormente para las unidades de seguimiento continuo. Las mediciones se realizaron, principalmente, durante el periodo de primavera y verano, cada 15 a 20 días por productor.

2.5. Evaluaciones en calicata

Para verificar la información obtenida con las sondas, se realizaron evaluaciones del contenido de agua del suelo y su distribución lateral, utilizando calicatas (Figura 2 C) y el equipo TDR100 (Spectrum Technologies, Inc.). Para esto se realizó una grilla de 20 x 20 cm, donde se evaluó en toda la pared (1,2 m de ancho por 0,7 a 1 metro de profundidad) de la calicata el contenido de agua en el perfil, generando imágenes de fácil entendimiento por el productor, para la evaluación del bulbo de mojamiento.

2.6 Condición hídrica de las plantas.

En forma paralela y con el objeto de validar las Líneas de Gestión, se realizaron evaluaciones del

estado hídrico de las plantas con cuatro repeticiones (árboles), utilizando la cámara de presión tipo Scholander modelo Pump up (PMS Instrument Company MR) (Figura 3, D). El potencial hídrico xilemático se evaluó siguiendo el protocolo de McCutchan y Shackel (1992). Si bien el potencial hídrico xilemático permite 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 variables ambientales que expliquen esas diferencias. En este sentido, el déficit de presión de vapor (DPV) es una de las variables que mejor representa esta condición. 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. La curva de respuesta del potencial xilemático al DPV de cada especie, a un nivel de contenido de humedad o tensión de agua en el suelo no limitante para la planta, se denomina línea base de referencia (Shackel *et al.*, 1997), y se ha implementado como un criterio eficaz para determinar el momento óptimo de riego en diversas especies frutales (Shackel, 2007; Gálvez *et al.* 2014; Corell *et al.* 2016), incluidos cítricos y aguacates (Beyá-Marshall *et al.*, 2020a).

2.7 Estaciones meteorológicas.

Se implementó una red de estaciones meteorológicas (Davis, Vantage Pro2) (Figura 1), obteniéndose los registros de precipitación, viento, humedad relativa, Temperatura y radiación, lo que permitió estimar la evapotranspiración potencial del sector (ET0), según la ecuación de FAO-Penman-Monteith (Allen, *et al.* 2006)

2.8. Evaluaciones.

Las principales evaluaciones fueron: a) descripción de los suelos utilizando calicatas y análisis de suelo, b) presencia de raíces en la zona de mojamiento de los sistemas de riego, para validar la ubicación de las sondas de capacitancia, c) diagnóstico de la operación de los sistemas de riego (eficiencia de mojamiento, presión de operación y aforo), d) volumen de agua de riego anual en $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$, e) costo de la energía a eléctrica ocupada para regar, f) contenido de agua en calicata (TDR 100), g) evolución del contenido del agua en el suelo (sondas continuas y discontinuas), h) potencial hídrico xilemático, y i) producción por hectárea.

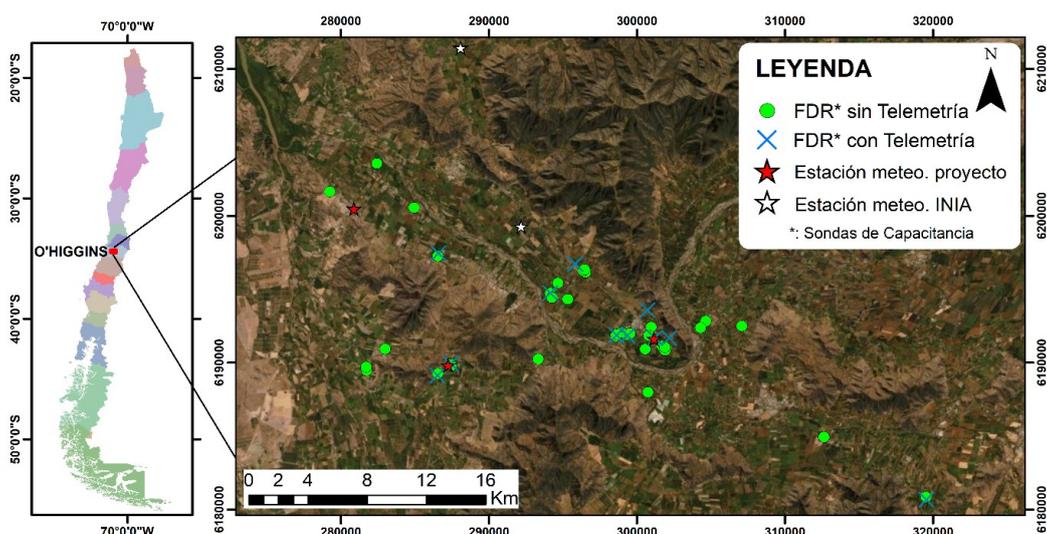


Figura 1. Emplazamiento de unidades de control dentro del Valle del Cachapoal; sondas de capacitancia de medición continua con telemetría (cruz), discontinua o Diviner (punto verde) y estaciones meteorológicas (estrella). INIA: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.



Figura 2. A) Toma de muestras para caracterización física de suelo B) Descripción morfológica de calicata, C) Evaluación de la resistencia a la penetración en el perfil de suelo con medidor de fuerza digital EXTECH, D) Implementación de evaluación sistemática del contenido de agua en el suelo con equipo TDR 100.



Figura 3. A) Pequeño productor con sonda Enviroscan, B) nodo gateway para telemetría, C) Equipo Diviner 2000 para seguimiento discontinuo del contenido de agua en el suelo y D) seguimiento del estado hídrico de la planta a través de la evaluación del potencial xilemático.

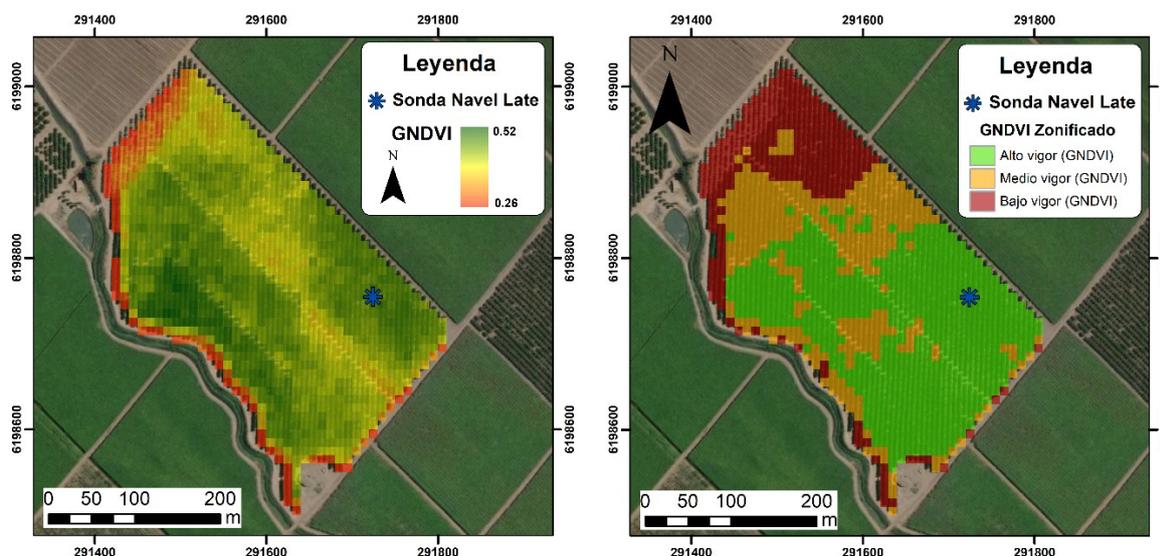


Figura 4. (A) Índice de vegetación GNDVI, a 10 metros de resolución espacial, en pleno desarrollo vegetativo el 18/02/2017. (B) Mapas del análisis de cluster (sectorización automática) utilizando el algoritmo K-MEANS en las imágenes de GNDVI de la temporada anterior al establecimiento de la sonda FDR; se clasificó por alto, medio y bajo vigor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diagnóstico de la condición física de suelo

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 (platabandas de suelo de hasta 1,5m de altura y 2m de base, con relleno del material que se encuentra inmediatamente a los lados de la futura línea de plantación; Figura 3B). 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 ($>50 \mu\text{m}$), los cuales no superaron el 15% en el 60% de los casos (Cuadro 1) y explicaron un bajo vigor según el índice GNDVI (Figura 5). En este sentido, 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 poros gruesos 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), en tanto valores bajo 12% repercuten fuertemente en la productividad. Esta falta de macroporosidad está atribuida 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 la elevada resistencia a la penetración (RP) (Figura 6) y la alta densidad aparente (D_a) (Cuadro 1). Los niveles de D_a variaron entre 1,2 y 1,60 Mg m^{-3} , con la mayoría de los predios (66%) con valores cercanos al valor crítico de 1,4 Mg m^{-3} en texturas medias a finas (Daddow y Warrington, 1983), indicando serios problemas de compactación; 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 para la profundidad de enraizamiento, 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.

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 porosa en el perfil, 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, 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, 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.

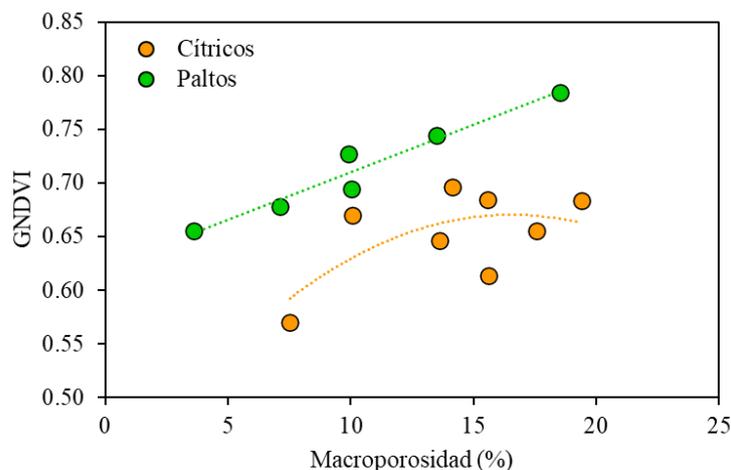


Figura 5. Vigor de huertos de paltos y cítricos, expresado como índice GNDVI (Vegetación de Diferencia Normalizada Verde), en función de la macroporosidad (%) de diferentes suelos de la Región de O'Higgins.

Cuadro 1. Caracterización de las propiedades físicas de los suelos, en los primeros 50 cm de profundidad (valores promedio n=3), cultivados con aguacates y cítricos

Comuna	Sector	Serie de suelo	Cultivo	Clase textural	Da	Macroporosidad	CC	PMP
					(Mg m ⁻³)	(%)	(%)	(%)
Peumo	Gulutrén	La Rosa	Limonero	F	1.31	16.8	29.2	20.4
Pichidegua	Santa Amelia	Palquiales	Limonero	Fa	1.66	17.6	24.0	15.2
Peumo	Codao	Peumo	Mandarino	F	1.56	13.6	32.5	19.9
San Vicente TT	Los Rastrojos	Zamorano	Naranja	FAL	1.20	16.9	35.1	28.2
Pichidegua	Santa Amelia	Millahue	Naranja	Fa	1.28	14.9	39.4	13.7
Malloa	El Tambo	T. aluvial	Naranja	F	1.33	19.7	27.1	14.9
Peumo	La Rosa	Pataguas	Naranja	FA	1.35	14.1	31.1	21.5
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
Peumo	Aguas Claras	Peumo	Aguacate	FL	1.28	13.5	37.5	14.7
Peumo	La Granja	Peumo	Aguacate	F	1.34	19.4	27.6	15.9
Peumo	Gulutrén	Pimpinela	Aguacate	F	1.35	3.6	45.6	21.0
Peumo	Aguas Claras	La Rosa	Aguacate	FA	1.42	10.0	38.9	25.4
Peumo	La Cantera	Peumo	Aguacate	F	1.46	18.5	29.6	15.5
Peumo	Codao	La Rosa	Aguacate	F	1.52	8.6	37.7	23.3

Da: Densidad aparente; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente.

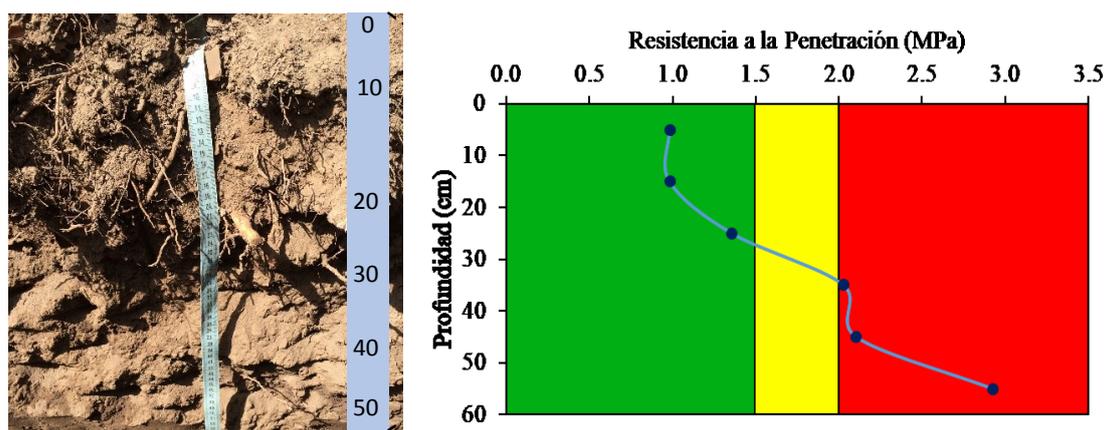


Figura 6. Distribución del crecimiento de raíces de palto en profundidad y resistencia a la penetración en el camellón de suelo. Se observa que la mayor parte de las raíces se encuentra en los primeros 30 cm (zona verde), donde los valores de resistencia a la penetración son menores a 1.5 MPa. En profundidad 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.

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 maduro o compostado o el uso de enmiendas líquidas comerciales aplicadas con el sistema de riego (Seguel *et al.*, 2003; Seguel *et al.*, 2015).

3.2 Diagnóstico de los sistemas de riego tecnificado.

De los 40 sistemas de riego evaluados, 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 categoría “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%) (Figura 7). 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 con baja potencia por desgaste de rodetes, mala 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. En este sentido, antes de realizar cualquier instalación de tecnologías para el seguimiento de la humedad del suelo, es necesario contar con sistema de riego que esté operando en óptimas condiciones, de manera de asegurar que el proceso de toma de decisiones con las sondas sea representativo del cuartel, evitando fracasos en la implementación de las tecnologías. Por otro lado, sólo un 10% de los sistemas de riego diagnosticados contó con caudalímetros y con contador volumétrico a la salida de la bomba para cuantificar el volumen de agua utilizado en cada riego. Este tipo de instrumentos son fundamentales para obtener indicadores de eficiencia sobre la estrategia de fertilización y sobre el consumo de agua en la temporada de riego; al respecto, se recomendó a todos los beneficiarios realizar las inversiones correspondientes para adquirir estos equipos. Para estimar el volumen de agua utilizado se instalaron contadores volumétricos en las líneas de riego; conociendo la cantidad de emisores por superficie y la uniformidad de los caudales (%CUC) fue posible cuantificar el volumen de agua utilizado en cada temporada.



Figura 7. Diagnóstico de la operación de los sistemas de riego tecnificado

3.3 Control del contenido de agua del suelo

Para cada unidad de monitorización con sonda, se pudo definir el nivel de lleno (NLL) (Figura 8), CCs y el punto de recarga (Figura 9), una vez estabilizada la variabilidad de las evaluaciones del equipo por efecto de la instalación. Con esta información y el uso del gráfico “sumado”, el cual suma los valores de contenido de agua de los tres primeros sensores, fue factible determinar la frecuencia de riego (Figura 9). Posteriormente y analizando el comportamiento individual de cada sensor gráfico “apilado”, se pudo obtener el tiempo de riego de cada productor, evitando la pérdida excesiva de agua de riego por percolación profunda (Figura 8). En resumen, las sondas de todos los sitios quedaron funcionando y en línea, mostrando buena actividad del sistema radical en relación a la ETO diaria del lugar, tal como se muestra en la Figura 9.

Por otro lado, en huertos con problemas de macroporosidad se pudo observar que incluso a niveles de contenido de agua por debajo de capacidad de campo el consumo de agua se ve reducido por la falta de aireación (hipoxia), y el consumo se maximiza a niveles de agua menores (mayor oxígeno disponible), al observarse una mayor tasa de consumo aparente de agua (Figura 10). En estos casos se recomendó la aplicación de materia orgánica y/o enmiendas líquidas (ácido húmico), con el

objetivo de mejorar la estructuración del suelo y disminuir la frecuencia de riego para evitar periodos de hipoxia.

Por otro lado, para la estimación de los tiempos de riego con mediciones de humedad de sondas discontinuas, se realizaron evaluaciones antes y después del riego, corroborando una óptima condición hídrica del bulbo húmedo y evitando la percolación profunda. Los criterios de riego para cada caso fueron corroborados a través de las evaluaciones del estatus hídrico de la planta y en calicata usando el equipo TDR100, generando una prospección del bulbo húmedo, en particular el desplazamiento lateral del agua de riego (Figura 11). En este sentido, si bien los equipos de lectura continua son una potente herramienta de trabajo, la experiencia deja de manifiesto que las evaluaciones en calicata con equipos TDR portátiles son fundamentales para validar los resultados de los estudios, desde el comportamiento del agua en el perfil hasta la interacción con el sistema de riego, la condición del suelo y las plantas y la demanda atmosférica (Callejas et al., 2014b; Callejas et al., 2019). También permiten detectar problemas de uniformidad del bulbo de mojamiento, como excesos de humedad (Figura 11 A) y cambios en la continuidad hidráulica del suelo (Figura 11B), entre otros.

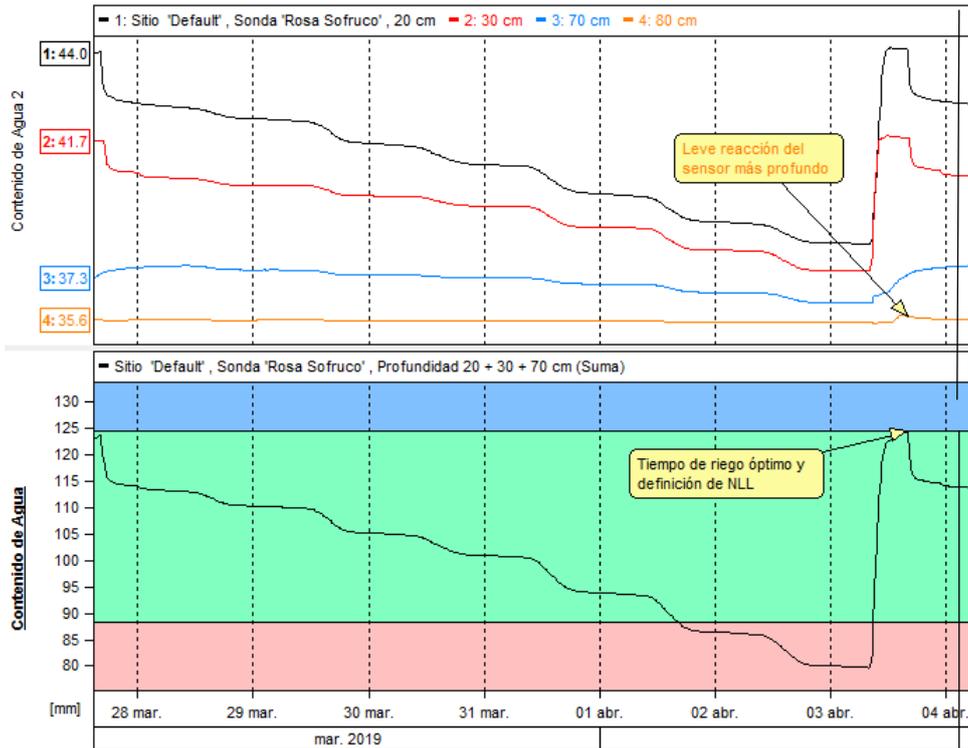


Figura 8. Visualización en software Irrimax® de los gráficos apilado (arriba) y sumatoria (abajo), con los que se determina el Nivel de Lleno (NLL) y el tiempo de riego óptimo. En el gráfico apilado se observa una leve reacción del sensor más profundo con el riego.

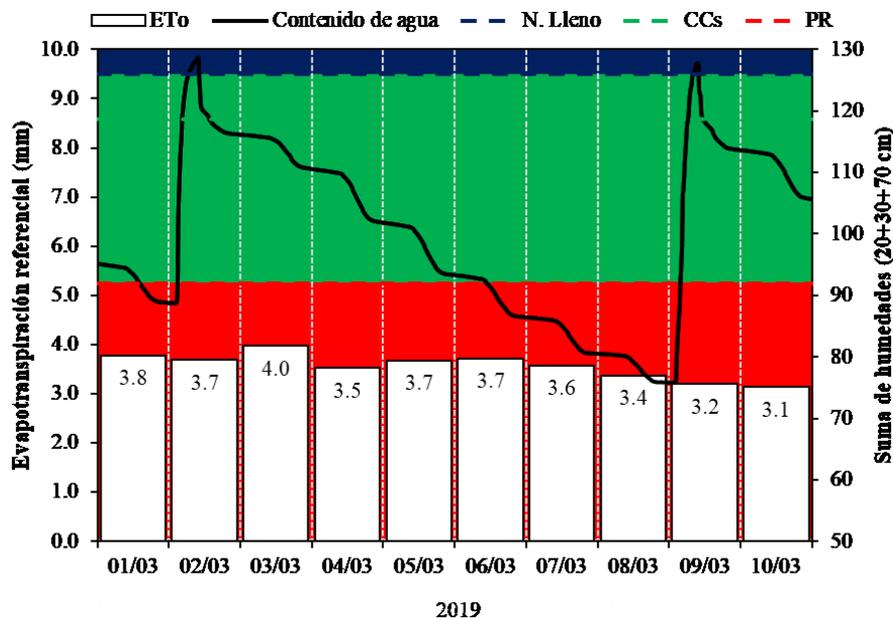


Figura 9. Determinación del punto de recarga (PR; línea roja) en verano, con similar evapotranspiración (barras blancas) durante un ciclo de riego, en un huerto de naranjo. Dinámica del contenido de agua (línea negra) en la zona de mayor proporción de raíces, expresado como la suma de las lecturas de la sonda Envirosca a 3 profundidades. Se observa que las caídas diarias de humedad o déficit diario (Δ) van siendo 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).

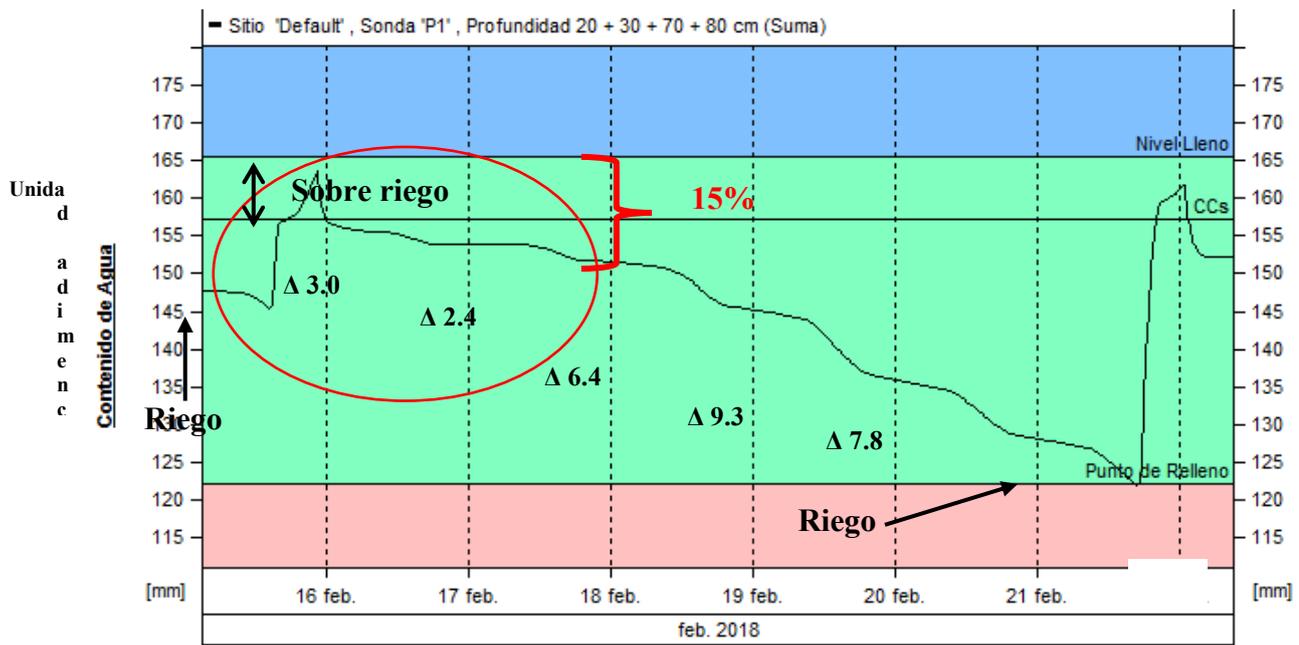


Figura 10. Reducción del consumo de agua por efecto de la falta de aireación o hipoxia (círculo rojo: dos días con menos de un 15% de poros con aire), generado por sobreriego en suelo con baja macroporosidad cultivado con Naranja Late/Citrumelo. Todos los días fueron soleados con una evapotranspiración de referencia promedio de 5 mm/día. Color azul, verde y rosado, indican niveles de humedad en el suelo saturado, adecuado y con estrés hídrico, respectivamente.

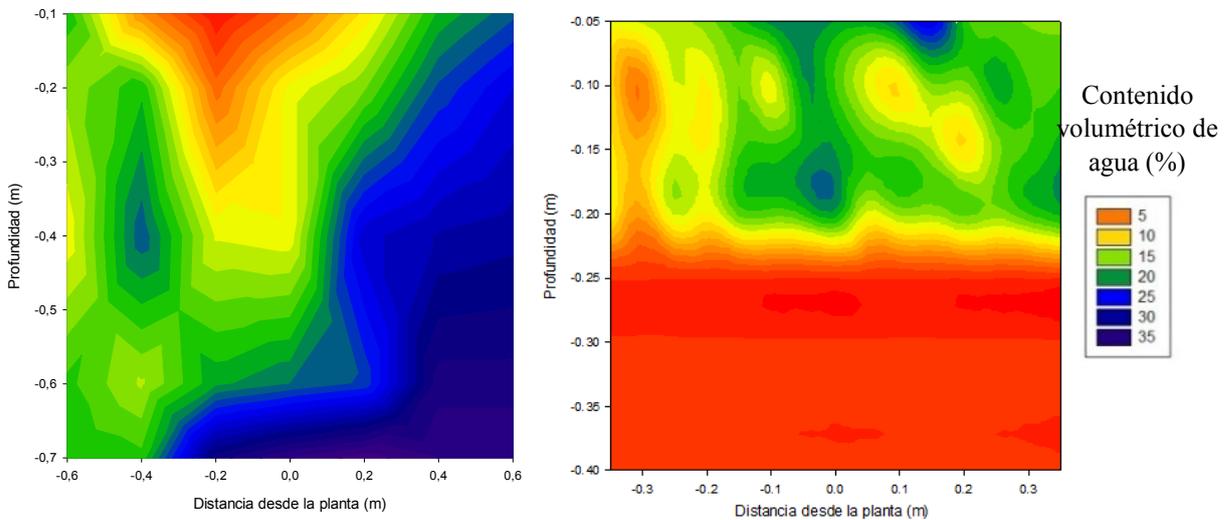


Figura 11. Contenido volumétrico de agua del suelo evaluado con equipo TDR100 en sentido perpendicular a la hilera de plantación (ubicada en el punto 0,0 m de la escala en el eje horizontal). A. Calicata en un suelo franco, posterior a un riego, en un huerto de aguacate. Flechas negras indican la posición del emisor de riego (doble línea de goteros 4 L/h). Se observa que el emisor izquierdo entrega una menor cantidad de agua comparado con el emisor derecho. B. Calicata en suelo franco, inmediatamente antes de un riego, en un huerto de aguacate. Flecha negra indica la posición del emisor de riego (micro-aspersor 32 L/h). Se observa pérdida de la continuidad hidráulica del suelo, con sectores compactados donde el movimiento del agua se ve dificultado.

3.4 Seguimiento del estado hídrico de planta

El propósito de esta medición fue validar el establecimiento de las líneas de gestión del riego a nivel de la planta, ajustar la frecuencia de riego y definir el momento oportuno del riego, asegurando que no exista estrés hídrico relacionado con el manejo de las sondas. Para ello, anteriormente se desarrollaron líneas base de referencia (potencial hídrico xilemático en función del DPV en cultivos en condiciones sin limitación hídrica) para cada uno de los frutales trabajados en este proyecto (Beyá-Marshall et al., 2020a). En la Figura 12 se muestran las evaluaciones de potencial xilemático realizadas justo antes del riego a diferentes beneficiarios. En general, la frecuencia de riego de la mayoría de los agricultores no era la adecuada, sometiendo la planta a condiciones de estrés hídrico durante la temporada (valores bajo la línea base de referencia). Por otro lado, valores muy por sobre la línea base indican una alta frecuencia de riego, lo que podría indicar riegos innecesarios y, en algunos casos, mayor susceptibilidad a enfermedades como Phytophthora

(Ferreira et al., 2006). De esta manera, la línea de base puede usarse para evaluar si el programa de riego está abordando efectivamente las necesidades de agua de los cultivos. ¿El riego aumentó el potencial hídrico hasta o cerca de la línea de base un día después del riego? Si no es así, es posible que se esté subirrigando. ¿Se mantiene el cultivo cerca de la línea de base antes del próximo riego? Puede retrasar el riego unos días (si es posible) o reducir la cantidad de agua aplicada en el próximo riego. ¿Están los valores de potencial hídrico xilemático por encima de la línea de base? Es probable que el suelo esté demasiado húmedo. En este sentido, Beyá-Marshall et al. (2020a) demostraron que plantas sobre regadas (30% más que el tratamiento de referencia, regado con las líneas de gestión) presentaron un estatus hídrico por sobre esta curva durante toda la temporada, pero sin mejorar la productividad, disminuyendo la eficiencia en el uso del agua. Por lo tanto, mantener los cultivos cerca de los valores esperados (líneas de referencia) permitiría un ahorro de agua sin afectar la productividad.

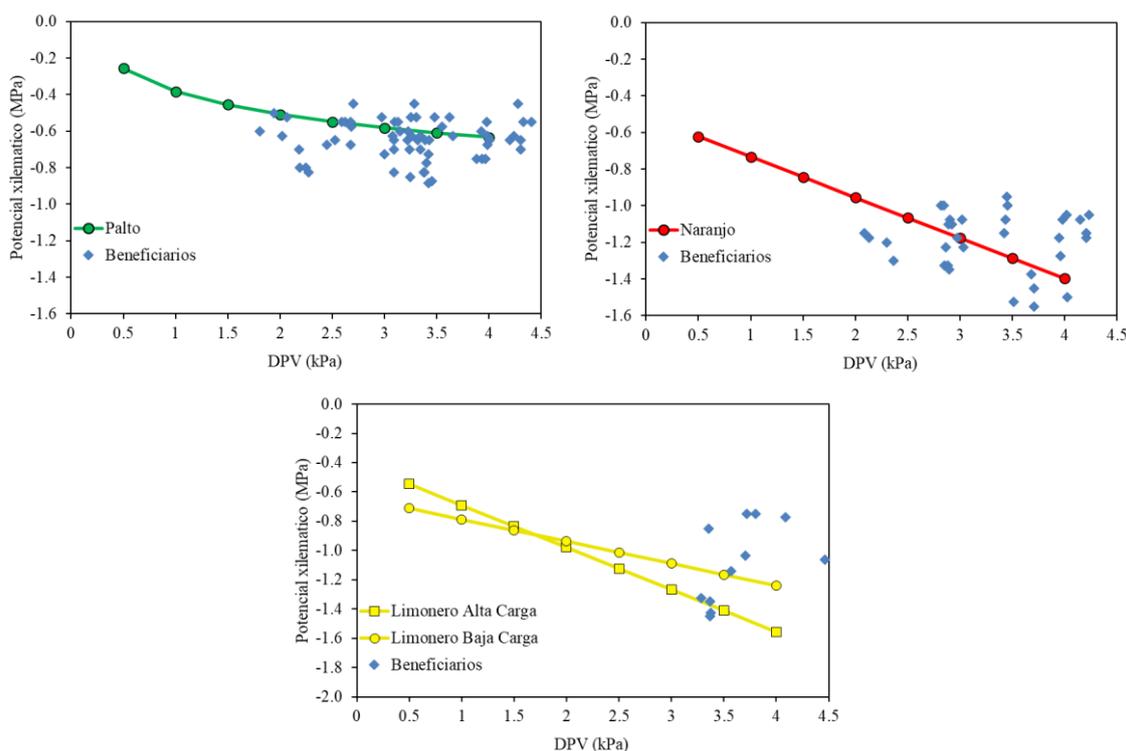


Figura 12. Evaluaciones de potencial xilemático y déficit de presión de vapor (DPV) a los beneficiarios con cultivo de aguacate, naranja y limonero. La línea continua denota el valor de potencial hídrico xilemático esperado para una planta sin limitaciones hídricas a diferentes condiciones de déficit de presión de vapor (DPV), en tanto los rombos azules corresponden a los diversos agricultores (Beyá-Marshall et al., 2020a).

3.5 Ahorro hídrico y eficiencia en el uso del agua

La cantidad de agua utilizada fue estimada mediante el uso de calendarios de riego, cálculos de descarga de los equipos, caudalímetros de línea, lecturas de la sonda e información proporcionada por el productor. En general, con el paquete tecnológico propuesto, se logró un 28% (2,640 m³/ha) y un 40% (3,803 m³/ha) de ahorro promedio en el uso de agua de riego respecto a la situación ante proyecto, respectivamente para la primera y la segunda temporada de proyecto. En la primera temporada se logró que 85% de los 40 productores disminuyeran su consumo de agua, mientras que en la segunda el 96% de ellos redujo su consumo. Esto permitió un aumento de la eficiencia

del uso del agua agronómica de entre un 23a 30%, una reducción del consumo eléctrico de entre un 17 a un 23% y un aumento monetario del uso de agua de entre un 22 a 35% con respecto a la situación ante proyecto (Figura 13). Resultados similares de eficiencia del uso de agua han sido previamente obtenidos por Callejas et al., (2014a) y Callejas et al. (2019) en agrícolas de mayor escala destinadas a exportación de fruta fresca. Esto demuestra que una transferencia tecnológica asociada al mejor uso del agua a través de tecnología y una investigación participativa es un mecanismo eficaz para optimizar el recurso hídrico de la AFC.

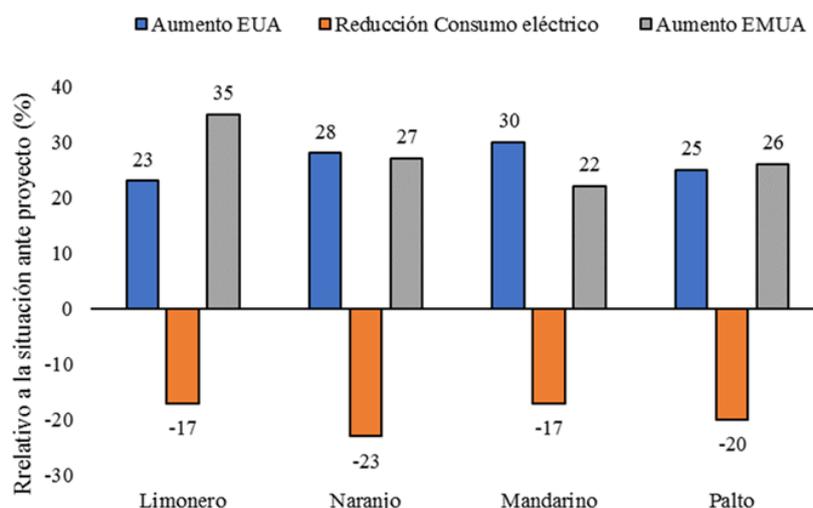


Figura 13. Indicadores de eficiencia del uso de agua agronómica (EUA; kg/m³ de agua aplicada), eléctrica (US\$/año) y monetaria (EMUA; ingresos (US\$) por la venta de la producción por cada metro cúbico de agua de riego aplicado) relativa a la situación ante proyecto.

La mayor eficiencia puede ser explicada por:

a) Determinación de primer riego acorde a las reservas del suelo y la variabilidad climática primaveral. Usualmente los productores comenzaban a regar en el mes de septiembre con una frecuencia de riego fija y frecuente, con el suelo aún húmedo, sin considerar la variabilidad de la demanda atmosférica (ET₀) característica de la primavera (1.2 mm a 4 mm). Esto tiende a generar condiciones de hipoxia y/o anoxia radical, que se manifiestan por un desacople entre el consumo de agua de raíces y la ET₀, lo que se observa como una disminución leve en el contenido de agua en el suelo en este periodo (Figura 14). Con la información entregada por las

sondas de humedad, se puede observar cómo el contenido de agua en el suelo varía según la demanda, entregando el agua de manera oportuna, ajustando la frecuencia según los consumos diarios, sin generar estrés en las plantas por exceso de agua en el suelo.

b) Disminución en el tiempo de riego con el consecuente aumento en la frecuencia de riego para mejor distribución de la humedad en la zona de raíces (primeros 50 cm en palto y 80 en cítricos), evitando percolación.

c) Ajuste de la frecuencia y tiempo de riego durante la temporada, que guarda relación con los cambios en la necesidad hídrica de la planta, según potencial

xilemático, en un momento determinado y las características del suelo (Figura 12).

d) No menos importante, correcta mantención de los sistemas de riego, lo que implicó protocolos de retrolavado de filtros y mantención de las laterales de riego, con descoles en función de la calidad del agua de riego y/o reemplazo de líneas antiguas con goteros de baja uniformidad.

En síntesis, y tal como ha sido previamente demostrado en otros estudios con pequeños productores en América Latina (Córdoba et al., 2004; Pérez y Clavijo, 2012), la investigación e innovación participativa, al incorporar activamente a los agricultores en la definición, priorización y solución de sus problemas, aportando al mismo tiempo sus

conocimientos sobre los complejos sistemas productivos y otros (políticos, sociales) en los cuales se desenvuelven, hace más pertinente y asegura que los resultados de este trabajo en conjunto entre productores, universidades e instituciones sean más apropiados para una parte importante de los productores; todas ventajas que en los sistemas tradicionales de investigación y extensión pocas veces se cumplen (Córdoba et al., 2004). El presente trabajo podría servir de base para ser replicado y/o adaptado en otras zonas y/o regiones de América Latina, donde sea altamente relevante incorporar tecnologías de riego en la agricultura familiar campesina para hacer frente a la menor disponibilidad de agua.

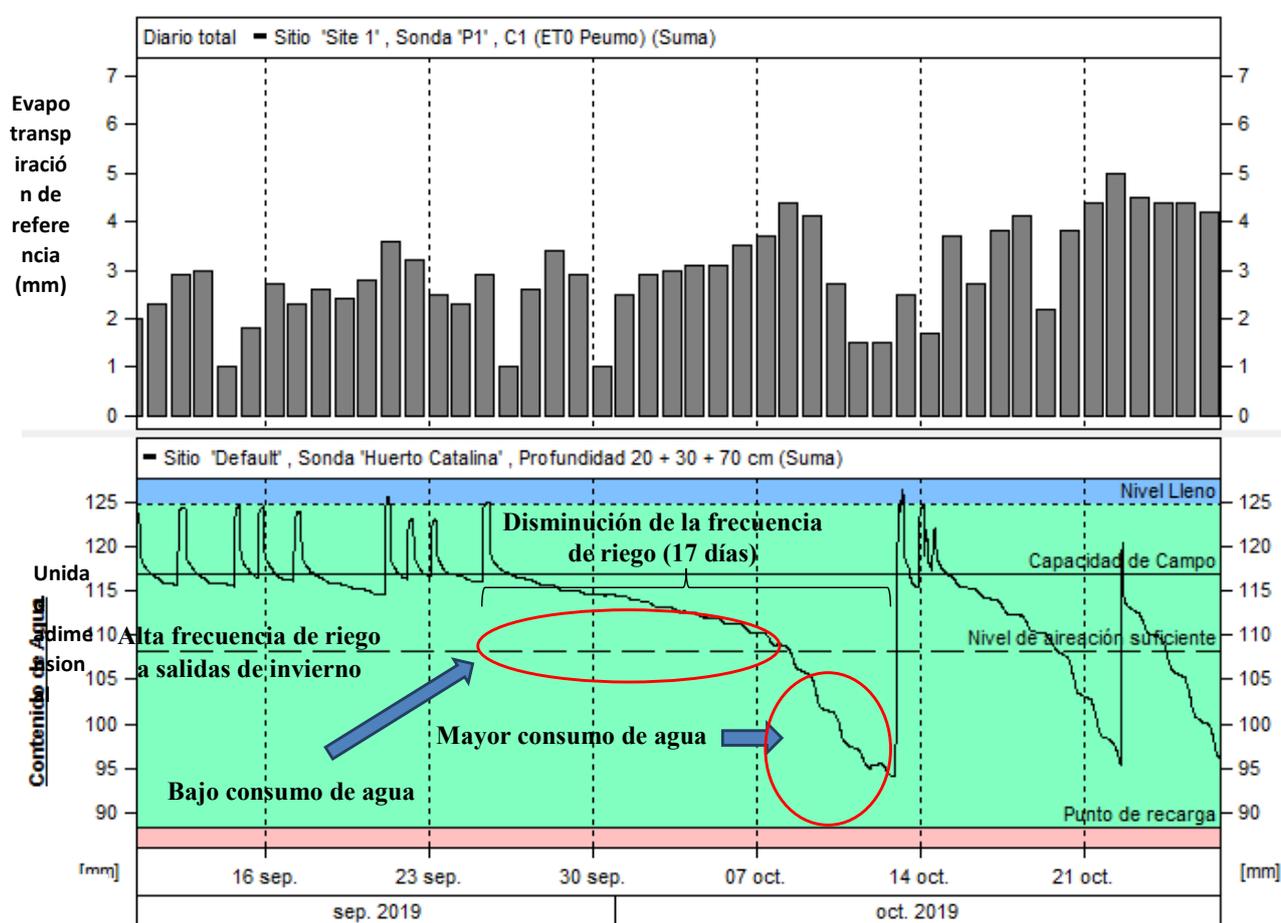


Figura 14. Reducción de la frecuencia de riego a inicios de primavera, en un suelo franco arcilloso con problemas de macroporosidad, de acuerdo a la necesidad hídrica de la planta y evitando situaciones de hipoxia. Se observa cómo, cuando se dejó de regar, el consumo de agua cada vez fue mayor a medida que el suelo empezaba a tener menor relación agua/aire, hasta alcanzar un nivel de aireación suficiente, donde el consumo de agua aparente es máximo, incluso con menor demanda atmosférica (ET0).

4. CONCLUSIONES

Se concluye que la brecha tecnológica de los pequeños productores puede ser considerablemente reducida si se utiliza un paquete tecnológico adecuado. Este no solo debe incluir tecnología, sino que también un acompañamiento permanente y con estudios prácticos de validación de tecnologías, desarrollados en conjunto con los agricultores. Además, un adecuado diagnóstico de la condición del sistema productivo y de su variabilidad espacial y temporal son necesarias para garantizar un correcto establecimiento de las tecnologías de seguimiento del estado hídrico del suelo y del cultivo. Con todo lo anterior, se logró mejorar la estrategia de riego, aumentando la precisión en las estimaciones de los tiempos y frecuencias con información objetiva. Esta información debe ser de simple visualización y útil, de manera de que el agricultor pueda apropiarse de la tecnología y pueda prolongar su uso en el tiempo. El

establecimiento del paquete tecnológico se valida mediante la importante mejora registrada en los indicadores de eficiencia de uso del agua, de uso de energía y eficiencia monetaria, logrando el objetivo de mejorar la competitividad de la agricultura familiar campesina. Este paquete podría ser replicado y/o adaptado a otras realidades de productores de Chile y/o América Latina

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Gobierno y Consejo Regional de O'Higgins, por haber financiado este proyecto (IDI 30474710) a través del Fondo de Innovación para la Competitividad. A los productores que apoyaron en todo momento la correcta ejecución de las actividades comprometidas, al equipo técnico de PRODESAL Peumo y a los profesores de la Escuela Agrícola Jean Buchanan de Larráin de Peumo.

REFERENCIAS

- Abrisqueta, I., Vera, J., Tapia, L., Abrisqueta, J., & Ruiz-Sánchez, M. (2012). Soil water content criteria for peach trees water stress detection during the postharvest period. *Agric. Water Manag.*, 104: 62–67.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. FAO, Roma, Italia. ISBN:-92-5-304219-2
- Arregui, L., & Quemada, M. (2006). Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. *Plant Soil*, 288: 57-69.
- Beyá-Marshall, V., Kremer, C., & Baeza, B. (2020a). Relaciones hídricas en paltos y cítricos, 122-136. En: Beyá-Marshall, V., Galleguillos, M (Eds). Optimización del riego en paltos y cítricos. Serie Ciencias Agronómicas N° 34, Universidad de Chile. Chile. ISBN: 978-956-19-1182-6.
- Beyá-Marshall, V., Seguel, O. & Baeza, B. (2020b). Diagnóstico de las condiciones físicas de suelo y su relación con el potencial productivo de paltos y cítricos en la región de O'Higgins. En: Beyá-Marshall, V., Galleguillos, M (Eds). Optimización del riego en paltos y cítricos. Serie Ciencias Agronómicas N° 34, Universidad de Chile. Chile. ISBN: 978-956-19-1182-6.
- BiRH-VI, (2020). Banco de Información de Recursos Hídricos de la Región de O'Higgins. [Consultado el 16 de julio 2020]. Disponible en: <http://www.birh.cl/>
- Borra, S., Thanki R., & Dey N. (2019). Satellite image analysis: clustering and classification. Springer Briefs in Computational Intelligence. ISBN: 978-981-13-6424-2.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150(3-4), 131–147. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7>
- Callejas, R., Vera, J., Río seco, M., Prohens, F., Osorio, H. Pino, P. Navarrete, J., & Gálvez, R. (2014a). 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., Vera, J., & Kremer, C. (2014b). Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Serie Ciencias Agronómicas N° 23. Universidad de Chile, Chile. ISBN: 978-956-19-0893-2
- Callejas R., Saavedra, R., Seguel, O., Bustamante, C., & Camilla, D. (2019). El internet de las cosas como herramienta para enfrentar la sequía provocada por el cambio climático en la producción de uva para pisco. *Aqua-LAC*, 11, 1–16.
- Callejas, R., Navarrete, J., & Río seco, M. (2013). Líneas de gestión para el riego: umbrales para interpretar los datos de humedad del suelo registrados por sondas de capacitancia. *Revista Antumapu Profesional*. Volumen

2. Número 3. Dirección de desarrollo y transferencia tecnológica. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.
- Córdoba, M., Gottret, M., Asociados, T., Montes, A.; Ortega, L. & Perry, S. (2004). Innovación participativa: experiencias con pequeños productores agrícolas en seis países de América Latina. Red de desarrollo agropecuario. Unidad de Desarrollo Agrícola. División de Desarrollo Productivo y Empresarial. Santiago, Chile. ISBN: 92-1-322600-4
- Christiansen, J. (1942). Irrigation by sprinkling. California Agriculture Experiment Station Bulletin, No. 670.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2002). Descripciones de suelo, Materiales y Símbolos - Estudio Agrológico de la VI Región. Pub. CIREN N°114. 595 p.
- Corell, M., Pérez-López, D., Martín-Palomo, M., Centeno, A., Girón, I., Galindo, A., Moreno, M.M., Moreno, C., Memmi, H., Torrecillas, A., Moreno, F., & Moriana, A. (2016). Comparison of the water potential baseline in different locations: usefulness for irrigation scheduling of olive orchards. *Agric. Water Manage.* 177, 308–316
- Daddow, R., & Warrington. G. (1983). Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. Watershed Systems Development Group, USDA Forest Service. 17p.
- DGA (Dirección General de Aguas). (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Rapel. Informe MOP (Ministerio de Obras Públicas). Gobierno de Chile.
- Ferreira, R., Sellés. G., Maldonado, P., Celedón, J. Barrera C., & Gil, P. (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 (INIA). La Cruz, Chile
- Galvéz R., Callejas, R., Reginato, G., & Peppi, M. (2014). Irrigation schedule on table grapes by stem water potential and vapor pressure deficit allows to optimize water use. *Ciência Téc. Vitiv.* 29(2), 60-70.
- Garreaud, R., Álvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., Le Quesne, C., Mcphee J., & 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., Boisier, J. Rondanelli, R. Montecinos, A., Sepúlveda H., & Veloso-Águila D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40, 421–439.
- ISO 9261. (2004) Agricultural Irrigation Equipment—Emitters and Emitting Pipe—Specification and Test Methods. Austrian Standards Institute, Wien.
- Kassambara, A. (2015). *Multivariate Analysis 1: Practical Guide to Cluster Analysis in R (real version)*. Taylor & Francis Group. ISBN: 9781542462709
- Lowery, B., Morrison, J.E. & Hopmans, J.W. (2002). Soil penetrometers and penetrability. Pp.363-388. In: Dane, J.H., Topp G.C (Ed). *Method of soil analysis*. SSSA book series. Madison, Wisconsin, USA. ISBN: 978-0-891-18893-3.
- McCutchan, H., & Shackel, K. (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.
- Nel, D., & Bennie, A. (1984). Soil factors affecting tree growth and root development in a citrus orchard. *South African Journal of Plant and Soil*, (2), 39-47.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2017). Principales resultados del programa AFC de ProChile noviembre de 2017. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. 11p.
- ODEPA-CIREN (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias- Centro de Información de Recursos Naturales). (2018). Catastros frutícolas, principales resultados, Región de O'Higgins/ Julio 2018. [Revisado el 2 de mayo de 2019]. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/CatastroOhiggins2018.pdf>
- Patt, L., Carmeli, D., & Zafrir, I. (1966). Influence of soil physical conditions on root development and on productivity of citrus trees. *Soil Science*, 102, 82 – 84.

- Pérez, M., & Clavijo, N. (2012). Experiencias y enfoques de procesos participativos de innovación en agricultura. Estudios sobre innovación en la agricultura familiar. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Roma, Italia. ISBN: 978-92-5-307425-9
- Sandoval, M., Dörner, J. Seguel, O. Cuevas, J., & Rivera, D. (2012). Métodos de análisis físicos de suelos. Publicación N°5, Chillán: Universidad de Concepción.
- Santana, M. Souza, L. Da S., Souza, L., & Fontes, L. (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., Santibáñez, P. Caroca, C., & González, P. (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. ISBN: 9789561910447
- Seguel, O. G. Arancibia, & 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*. ISBN: 978-956-19-0945-8
- Seguel, O. V. García De Cortázar, & 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.
- Shackel, K. (2007). Water relations of woody perennial plant species. *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin*, 41, 121–129.
- Shackel, K. Ahmadi, H. Biasi, W. Buchner, R. Goldhamer, D. Gurusinge, S. et al. (1997). Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *Horttechnology*, 7, 23–29.
- Thompson, R., Gallardo, M. Valdez, L., & Fernández, M. (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.

Como citar este artículo:

Beyá-Marshall, V. et al., (2021). Paquete tecnológico para la optimización del recurso hídrico en pequeños productores de aguacates y cítricos en Chile Central. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 16-33. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-02



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license