



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Paquete tecnológico UchileCrea para el control inteligente del riego en sistemas frutícolas

UchileCrea technological package for the intelligent control of irrigation in fruit systems



Rodrigo Callejas-Rodríguez^{1*}, Oscar Seguel¹

Recibido: 9/08/2021

Aceptado: 10/10/2021

*Autor de correspondencia

Resumen

El manejo del riego en la fruticultura es una de las principales labores agrícolas que deben ejecutar los productores en sus predios. A pesar de existir, teóricamente, un sinnúmero de alternativas para su control, ellas no son necesariamente eficientes en determinar en forma clara el tiempo y la frecuencia de riego durante la temporada de producción. Por esta razón, el equipo UchileCrea de la Universidad de Chile ha trabajado por más 20 años para definir y validar un paquete tecnológico (PT) para el control del riego, enmarcado en la integración de nuevas tecnologías (sondas de capacitancia, IoT, manejo de precisión, NDVI, etc.) y que en la actualidad se hace más necesario, por el recurrente incremento de la escasez hídrica que vive el país producto del cambio climático, lo que obliga a aumentar la eficiencia de uso del agua de riego (EUAr). De acuerdo a la metodología internacional establecida para la generación de paquetes tecnológicos, se definieron 4 etapas que se debían cumplir. Etapa 1: selección de tecnologías y conformación de sub-paquetes. Etapa 2: propuesta de paquete tecnológico. Etapa 3: validación y retroalimentación. Etapa 4: promoción y adopción del PT. Se pudo verificar que es posible definir el tiempo y frecuencia de riego en forma óptima, mejorando los rendimientos, ahorrando entre 20 a 40% del recurso hídrico utilizado, aumentando la EUAr y disminuyendo el consumo de energía eléctrica. Adicionalmente, este PT permite tener una nueva herramienta probada para enfrentar la escasez hídrica que vive el país y, a través de la promoción permanente, seguir incorporándolo en el sistema frutícola nacional.

Palabras clave: Escasez hídrica, sonda de capacitancia, NDVI, Bomba de Scholander, eficiencia de uso del agua de riego (EUAr).

Abstract

Irrigation management in fruit growing is one of the main agricultural tasks that producers must carry out on their farms. Despite the theoretical existence of a number of alternatives for irrigation control, they are not necessarily efficient in clearly determining the time and frequency of irrigation during the season. For this reason, the UchileCrea team from the University of Chile has worked for more than 20 years to define and validate a technological package (PT) for irrigation control, framed in the integration of new technologies (capacitance probes, IoT, management of precision, NDVI, etc.) and a recurrent increase in the country's water shortage, as a result of climate change, forcing to increase the water use efficiency of irrigation (EUAr). According to the international methodology established for the generation of technological packages, 4 stages were defined that had to be fulfilled: Stage 1, selection of technologies and creation of sub-packages. Stage 2, proposal for a technological package. Stage 3, validation and feedback. Stage 4, promotion and adoption of the PT. It was possible to verify that it is possible to define the time and frequency of irrigation in an optimal way, ensuring maintenance or improving yields, saving between 20 to 40% of the water used, increasing the EUAr and decreasing the electrical energy consumption. Additionally, this PT allows to have a proven program to face the water scarcity that the country is experiencing and through permanent promotion, it has been incorporated into the national fruit system.

Keywords: Water scarcity, capacitance probes, NDVI, Scholander pump, water use efficiency of irrigation (EUAr).

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

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Chile es uno de los países privilegiados en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos superficiales a nivel mundial (Fundación Chile, 2018), valorizándose la Cordillera de Los Andes a lo largo de todo el territorio, la cual juega un rol central en la disponibilidad del recurso hídrico del país, dado que en sus altas cumbres se acumula la nieve invernal que queda disponible para los meses secos, principalmente entre primavera y verano (Belmar *et al.*, 2020). A nivel nacional, el consumo se reparte entre el rubro pecuario (0.7%), minería (3.9%), eléctrico (4.5%), industrial (6.7%), agua potable (11.8%) y la agricultura (72.3%) (DGA, 2017a). Si a esto se suma, según la clasificación de Köppen (Santibáñez y Uribe, 1993), un clima mediterráneo templado con veranos secos, se explica el gran desarrollo de la fruticultura chilena, llegando a tener en la actualidad 350 mil ha en producción, las cuales generan cinco millones de toneladas de fruta al año, llegando con exportaciones a más de 140 países en el mundo (ODEPA, 2020) y alcanzando un PIB agrícola ampliado equivalente al 14.36% (ODEPA, 2019).

Sin embargo, desde la década del 2000 se comenzó a constatar claramente en el centro-norte de Chile un cambio en el régimen de las precipitaciones que se fue acentuando con el pasar de los años, dando origen al trabajo realizado por el Centro Regional de Estudios Agronómicos de la Universidad de Chile (UchileCrea) en la zona desértica de la Región de Atacama (FIA-Universidad de Chile, 2003; FDI-CORFO-Universidad de Chile, 2004).

De situaciones puntuales de sequía en algunos territorios, rápidamente se pasó a una escasez hídrica más amplia (CR2, 2015 y 2020; Santibáñez, 2017), constatándose que, desde el año 2010 en adelante, gran parte del país experimentó un déficit de precipitaciones cercano al 30% en forma ininterrumpida, siendo la década más cálida de los últimos 100 años y denominándose esta situación como una “megasequía” que se intensificará en los próximos 30 años (DGA; 2017b, 2020; Araya-Osses *et al.*, 2020).

El mundo agrícola, en conjunto con el Estado, determinan que se requiere implementar cambios tecnológicos a la brevedad a nivel extra e intrapredial (FIA, 2015), siendo fundamental el fortalecimiento del trabajo público-privada (Fernández *et al.* 2020).

Se define que es de vital importancia evitar las pérdidas por conducción del agua de riego, que pueden llegar al 40% (Sandoval, 2003; CNR, 2009) y aumentar la eficiencia del uso del recurso hídrico, asociada a sistemas de riego tecnificado o paquetes tecnológicos (PT) que promuevan un manejo eficiente del riego, dado que se ratificaban pérdidas de agua a nivel intrapredial de hasta un 45% (Callejas *et al.*, 2014 a y b; Ferreyra y Sellés, 2014).

Los PT se definen como un conjunto de conocimientos de prácticas agrícolas provenientes de la investigación pero validado en terreno (Bazán, 1977; Torres *et al.*, 2014). Como método de adopción de tecnologías se generaron durante la “Revolución Verde” en los años 70’, advirtiendo Briones (2015) que, para no cometer los mismos errores de esa época, requieren ser generados y probados con los productores, evitando que sean impuestos desde arriba o de otras realidades productivas diferentes a los sitios donde se requiere impactar. Rose *et al.*, (2016) plantean que en la agricultura hay que tener conciencia que, a pesar de una amplia oferta y formato de tecnologías para optimizar la toma de decisiones, la aceptación a nivel mundial es decepcionantemente baja, ocurriendo lo mismo en Chile (Banco Mundial, 2009).

Si bien existen en la actualidad innumerables avances y/o herramientas tecnológicas en la agricultura (FIA, 2008; Carpio Santos, 2018), esto no es equivalente a señalar que los agricultores gozan de nuevos PT, en otras palabras, la existencia de múltiples tecnologías por separado sin una integración lógica y eficaz, no puede ser denominado PT. Una vez integradas las tecnologías, esta nueva propuesta debe estar probada en terreno y validada a través del incremento de la productividad y la seguridad alimentaria (Silva, 2011, Naranjo 2004).

Bazán (1977) es claro en señalar que un nuevo PT debe poseer las siguientes características: A) debe ser de tipo integral y no una suma de partes individuales, B) creado y validado a nivel predial, C) no desechar lo que el agricultor tiene y sabe y D) introducir paulatinamente el PT, mostrando mejoras de acciones positivas. Normalmente estos PT deben desagregarse en “Sub-paquetes” para facilitar su adopción, especialmente entre pequeños productores (Bazán, 1977; Silva, 2011). Finalmente, hay que hacer un gran esfuerzo en la promoción del PT y evaluar reiteradamente su adopción y resultados efectivos (de Janvry *et al.*, 2011).

1.2 Objetivo

El objetivo fue desarrollar, validar y promover un paquete tecnológico (PT) que permitiera una eficiente determinación del tiempo y la frecuencia del riego en sistemas frutícolas, logrando importantes ahorros en el uso del recurso hídrico, pero sin afectar negativamente los rendimientos y la calidad de la fruta.

2. ÁREA DE ESTUDIO

Se ejecutó, ordenadas de norte a sur (regiones desérticas a mediterráneas), en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Región Metropolitana y de O'Higgins. Atacama (25°18' y 29° 43' latitud sur y entre los 68° 19' y 71° 30' de longitud oeste) posee un clima desértico, con menos de 30 mm de precipitación anual (según clasificación de Köppen; Santibáñez y Uribe, 1993; UNESCO, 2010). En el sur, la Región de O'Higgins (33°51' y 35°01' de latitud sur y desde 70°02' de longitud oeste) presenta un clima templado-cálido (según la clasificación de Köppen, Santibáñez y Uribe, 1993) con lluvias invernales que alcanzan los 550 mm al año y estación seca prolongada (7 a 8 meses). Los suelos ocupan posiciones de terrazas aluviales y coluvios con pendientes menores al 20%, de profundidad y pedregosidad variable, principalmente con texturas medias y finas, incrementándose las texturas gruesas cercano a los ríos (Casanova *et al.*, 2013).

3. METODOLOGÍA

3.1. Marco conceptual

El desarrollo del PT se enmarcó en dos importantes conceptos: "innovación tecnológica" y "manejo de precisión". Respecto a lo primero, FIA (2019) señala que se deben abordar problemas relevantes para las personas o empresas del sector agrario, desarrollando nuevos o mejorados productos, servicios y/o procesos, mediante soluciones que aporten valor y que queden a disposición de los agricultores. Respecto del manejo de precisión en la agricultura, Villalobos *et al.*, (2009) lo define como un conjunto de herramientas tecnológicas que permiten identificar, analizar y modelar la variabilidad espacial y temporal de los cuarteles agrícolas, con la finalidad de poder manejarla de acuerdo a los objetivos productivos de cada agricultor. En este caso en particular, el PT ha sido el resultado de un importante

número de proyectos de investigación y desarrollo, así como de los aportes de alumnos de pre y postgrado de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, a través de sus memorias de título y maestrías.

3.2. Generación del paquete tecnológico

La metodología para la generación del PT se adaptó a partir de los pasos señalados por Torres *et al.*, (2014) y consideraciones señaladas por Bazán (1977) y de Janvry *et al.*, (2011), definiendo cuatro etapas:

Etapa 1. Selección de tecnologías y conformación de sub-paquetes. A partir del año 2003, se procedió a definir las tecnologías que permitieran la clara definición del tiempo y la frecuencia de riego, que soportaran las condiciones de campo y su utilización en las evaluaciones de terreno.

Etapa 2. Propuesta de paquete tecnológico, estrategias y explicación del rol o función de cada sub-paquete. En función de la complementación de las diferentes tecnologías y manejos, se seleccionaron aquellas que presentaban mayor utilidad en el manejo del riego y un manejo sustentable del suelo.

Etapa 3. Validación y retroalimentación. El paquete tecnológico fue aplicado en varias zonas y especies frutícolas, considerando para su validación: a) que permitiera lograr igual o mayores rendimientos, b) en lo posible mejor calidad de la fruta, c) ahorro de agua de riego, d) ahorro de energía eléctrica en sistemas tecnificados y e) rescate de cualquier otra externalidad positiva, como la mejora de las características del suelo y el sistema radical.

Etapa 4. Promoción y adopción del PT. Se identifican las razones que dificultan la adquisición del PT o sub-paquetes, determinando los retos del futuro.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Etapa 1. Selección de tecnologías y conformación de sub-paquetes

4.1.1 Sondas de capacitancia FDR y plataformas de gestión

Gracias al trabajo en conjunto con el Dr. Juan Vera, SEBAS-CSIC Murcia, España (Vera, 2004; Callejas *et al.*, 2014b, Fernández *et al.*, 2020), se definió optar por la sonda de capacitancia FDR Enviroscan y/o Drill & Drop (Sentek). Como plataformas de gestión se eligieron: a) IrriMAX Software (Sentek) para PC, dado el gran potencial de administración de datos y generación de información a partir de ellos, b)

IrriMAXLive (Sentek), para un trabajo más simple en la nube y c) DropControl (Wiseconn), plataforma web de fácil manejo en la que se pueden ejecutar otras tareas, tales como riegos y fertirrigación, siendo esencial para ejecutar ensayos en terreno.

Instalación de los equipos en terreno. Se realizaron de acuerdo a los protocolos y criterios de Sentek (2021), evitando la generación de flujos preferenciales de agua. Ya instaladas las sondas de capacitancia, hubo un periodo de “estabilización de la variabilidad de las lecturas”, donde se evalúa el comportamiento de los sensores y el sistema de transferencia de datos, corroborando su óptimo funcionamiento, continuidad en las lecturas y la ausencia de anomalías.

Definición de la frecuencia de riego. Se debe generar el gráfico conocido como “gráfico sumatoria” (Figura 1, inferior), donde se integran los datos provenientes de todos los sensores, con la excepción del más profundo, el que no debiera mostrar actividad o

dinámica (agotamiento evidente entre riegos por consumo de las raíces). En algunas ocasiones, cuando los suelos no son profundos y se observa una importante actividad en el último sensor, este debe ser considerado en el gráfico sumatoria.

Definición del tiempo de riego. En el gráfico “apilado” (Figura 1, superior) se muestran los registros de todos los sensores por separado. Con esta información se puede definir en qué profundidad se encuentra la mayor cantidad de raíces absorbentes (20 cm), esto quiere decir, mayor actividad del sistema radical (mayor agotamiento diario del agua). La profundidad del último sensor debe ser aquella donde no se observan raíces de manera evidente, permitiendo definir el tiempo de riego cuando el frente de agua llega a esa profundidad (sensor 4, 80 cm de profundidad), lo que se manifiesta en un ligero incremento del contenido de agua.

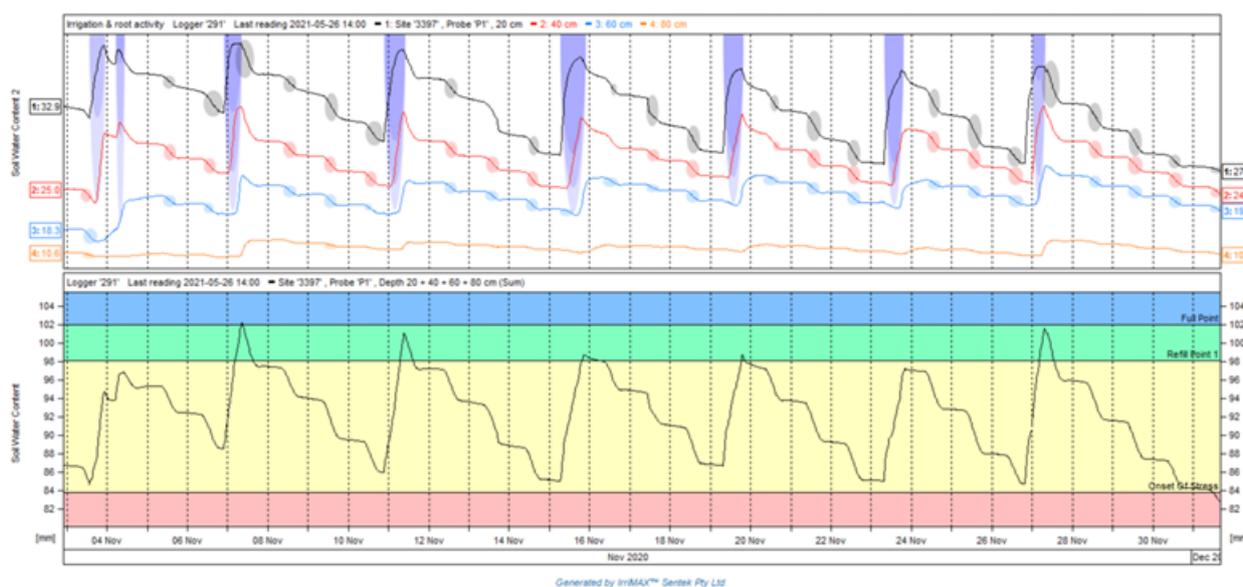


Figura 1. Gráfico apilado (superior), donde se observan las mediciones de los cuatro sensores instalados a sus respectivas profundidades; los primeros tres sensores muestran gran actividad (agotamiento del agua) y el cuarto no. Gráfico sumatoria (inferior) generado con los sensores ubicados a 20, 40 y 60 cm de profundidad, mostrando la dinámica del contenido de agua en el suelo; cada peak corresponde a un evento de riego y la serie de escalones en la curva, representa el agotamiento diario de agua en el suelo que realiza la planta.

Líneas de Gestión (LG). Es fundamental en el gráfico sumatoria generar puntos de referencia, denominados “Líneas de Gestión” del riego, que facilita la ejecución del riego en la práctica para la correcta toma de decisiones (Callejas *et al.*, 2014b).

a) Nivel de Lleno (NLL) o *full point*. Es la máxima cantidad de agua que puede contener el suelo sin que se produzca percolación profunda, condición que debe ser determinada analizando el gráfico apilado según el registro del sensor más profundo, lo que define el tiempo de riego. Se debe hacer una excepción si el objetivo es hacer un riego de lavado

de sales, en cuyo caso el tiempo de riego se extiende y el sensor de mayor profundidad presenta un incremento evidente en el contenido de agua.

b) Capacidad de Campo sonda (CCS) o *refill point* 1. Se usa la denominación CCs ya que se refiere al mismo concepto de capacidad de campo definido por Veihmeyer y Hendrickson (1950), pero determinado con la sonda, lo que integra posibles discontinuidades entre horizontes. Por lo tanto, se puede fijar la CCs en invierno, sin transpiración y mínima evaporación desde la superficie, después de una lluvia abundante, un riego profuso o con la ayuda de un cilindro infiltrómetro, sobre todo en áreas con bajas o sin precipitaciones. En el gráfico apilado de la Figura 1, se observa en la base de la franja verde el momento en que se estabiliza la pérdida de agua una vez que se cortó el riego.

c) Punto de Recarga (PR) u *onset of stress*. Conocido como umbral de riego, lo que define la frecuencia del riego. Es el punto donde la caída diaria del contenido de agua, evaluada por los sensores superiores a una máxima demanda atmosférica y constante (ET_o), comienza a disminuir producto de la reducción del contenido de agua en el suelo (aumento de la tensión de retención), dificultando la absorción del agua por parte de la planta. Algunas plataformas nombran a esta LG como “inicio de estrés”, pero hemos descartado esta denominación dado que no necesariamente es factible constatar, a través de otras variables fisiológicas, que la planta está sufriendo estrés (Ej: potencial hídrico xilemático, conductancia estomática, etc.). Adicionalmente, promueve alarma entre los agricultores, procediendo a regar anticipadamente.

d) Relleno en Zona de Inicio Estrés (RZIE). Umbral claramente por debajo del PR, utilizado en casos especiales donde se requiere lograr un objetivo comercial o condición especial sobre la planta, que deben ser validados en la práctica con investigación aplicada. Algunos ejemplos son: mejor calidad de la materia prima para la producción de vinos, mayor color en variedades de uva de mesa, promoción de crecimiento de raíces, maduración de madera en zonas donde las condiciones templadas se prolongan en otoño, etc.

e) Relleno Temprano (RT). Esta LG se utiliza para adelantar el riego respecto del PR, tales como: 1) En algunos estados fenológicos donde la presencia de un estrés mínimo podría afectar, hipotéticamente, los rendimientos o calidad de la fruta, como por ejemplo el crecimiento de baya en uva de mesa. 2) Mantener

un mayor estatus hídrico en la planta durante un período. 3) Las raíces estén centrada en una zona bien delimitada del perfil de suelo y, por ende, se produce un mayor consumo de agua o desecamiento más rápido de ese sector del suelo. En este caso se requiere estudiar los sensores específicos de esta zona y que no generen múltiples micro-estrés en el tiempo, afectando el óptimo desarrollo de las plantas. 4) Gran proliferación de raíces en superficie, por ejemplo por el uso de *mulch* naturales, compost o compost in situ (estiércol y materia seca), lo que obliga a una mayor atención del primer sensor, de manera de evitar deshidratación o muerte de las raíces que crecen en este sustrato. Así, la definición de las LG permitirá al agricultor no sólo determinar el tiempo y la frecuencia de riego a lo largo de la temporada, sino manejar estrategias específicas en función del patrón de enraizamiento del cultivo o los objetivos buscados. El complemento de esta tecnología con medidores de caudal, más el correcto registro de los rendimientos, permite calcular la eficiencia de uso del agua de riego y optimizar el consumo energético.

4.1.2 Estaciones meteorológicas

En la determinación del riego usando sondas de capacitancia, es importante obtener datos de evapotranspiración potencial (ET_o) del lugar, idealmente a nivel diario. Se pueden instalar estaciones meteorológicas en el predio u obtener la información desde la web, por ejemplo, www.agroclima.cl.

4.1.3 Bomba de Presión tipo Scholander

Se seleccionó la cámara *Scholander modelo Pump-up* (PMS Instrument Company, Oregon, USA), diseñada por el Dr. Ken Shackel, que sirve para evaluar el potencial hídrico xilemático a medio día (Ψ_{xm}) en la gran mayoría de los frutales bajo riego (Naor *et al.*, 1998; Choné *et al.*, 2001; Williams y Trout, 2005; Rosati *et al.*, 2006; Shackel, 2011). Presenta la ventaja de no requerir un tanque de gas comprimido ya que la generación de presión depende del bombeo manual de un pistón, lo que facilita su uso en terreno. Sin embargo, las evaluaciones se dificultan en algunos frutales como los olivos bajo tratamientos de riego deficitario controlado (RDC), dado que el equipo alcanza una presión máxima de -2 MPa. En zonas con permanentes cielos nublados, es recomendable desarrollar las líneas de referencia respecto del déficit de presión de vapor (DPV) (Shackel *et al.*, 1997; Olivo *et al.*, 2009; Gálvez *et al.*, 2014).

4.1.4 Sensor TDR para evaluaciones en calicatas o desde la superficie del suelo

Para evaluaciones discontinuas del contenido de agua en el suelo se eligió el sensor TDR100, que evolucionó al TDR150 (Spectrum Technologies Inc., Illinois, USA), el cual además entrega valores de temperatura y conductividad eléctrica, esta última muy importante en condiciones climáticas áridas o con agua de riego de mala calidad. En comparación con otros equipos similares, en este sensor tanto su cuerpo como las sondas de penetración (varillas) son robustas para el trabajo de campo, lo que asegura su gran durabilidad.

Si bien este tipo de sensor es más económico que uno de monitoreo continuo, requiere de la confección de calicatas y entrega sólo información parcial al momento de medir, no dando una visión completa de la dinámica temporal del agua del suelo. Se deben realizar calicatas frente a los árboles (a 40 cm del tronco), generalmente en sentido perpendicular al sentido del riego, de 2 m de ancho y 1.5 m de profundidad; en este caso se puede evaluar con varillas de 7.5 cm de largo, realizando evaluaciones a diferentes profundidades o en un reticulado, como se verá más adelante, y los datos pueden ser gestionados en Excel (*Microsoft*) o SigmaPlot (*Systat Software Inc.*) para facilitar el manejo de la información, por ejemplo, calcular promedios por profundidad o realizar gráficos 2D de distribución del agua en torno a la zona de riego. Otra posibilidad de evaluación es obtener información desde la superficie, usando las varillas de 20 cm de largo.

4.1.5 Uso de imágenes satelitales

Se utiliza principalmente el índice espectral de vigor fotosintético de la vegetación NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), obtenido de imágenes satelitales (10m x 10m) 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).

Las imágenes son de naturaleza gratuita y abarcan todo el territorio a nivel nacional, con una frecuencia temporal y una escala espacial que permite conocer la dinámica de un huerto durante la temporada y a lo largo de los años, ya que se dispone además de imágenes históricas. Si bien existen otros índices de

estrés, el NDVI está ampliamente validado, siendo aplicable a cualquier especie vegetal de una manera fácil de interpretar.

4.2 Etapa 2. Propuesta de paquete tecnológico, estrategias y explicación del rol o función de cada sub-paquete

4.2.1. Criterios para la instalación de las sondas

La gran mayoría de la experiencia del PT se basa en el trabajo con frutales bajo riego por goteo. La unidad básica es el “Sector de Riego”, definido según la homogeneidad del suelo, el que puede ir de 0.5 ha, en pequeños agricultores, hasta 10 y más hectáreas en productores grandes. A continuación se mencionan los pasos:

Paso 1. Determinación de un sector representativo, donde se elegirá la planta indicadora para instalar la sonda. Para esto utilizamos las imágenes satelitales con el objetivo de definir la variabilidad temporal (temporadas anteriores) y espacial del vigor de los huertos (Figura 2). Lo esperable, si la plantación se hizo correctamente, es que la mayor superficie del huerto presente condición vegetativa similar y con altos valores.

En un huerto productivo referencial (Figura 2, derecha), se ve que el 2° y 3° cuartil están muy cerca uno del otro, situación ideal, ya que esto indica que el 50% de la superficie se encuentra entre dichos valores y que la diferencia entre el valor mínimo y máximo (IQR) es ínfima. Por lo tanto, este comportamiento es el óptimo, al observarse valores altos de NDVI y un IQR pequeño durante el periodo crítico. Siempre será importante realizar calicatas (3) en el sector elegido, para verificar la presencia y densidad de raíces que tienen las plantas dentro del bulbo húmedo.

En la Figura 2, es factible instalar el sensor en cualquiera de los sectores con el tono verde más representativo del huerto (no el verde más intenso). En caso de tener una unidad de riego no homogénea (con grandes diferencias de vigor), se deberá buscar un sector homogéneo y representativo, teniendo presente la necesidad de hacer manejos específicos en los sectores de bajo vigor.

Paso 2. Caracterización del bulbo de mojamiento y observación de la presencia de raíces. Luego de un riego, se aconseja realizar unas tres calicatas en el sector elegido en el Paso 1. De esta manera se ratificarán los datos del “estudio de suelo” que se utilizó para diseñar el sistema de riego. Se

recomienda tomar una muestra de suelo del sector de mayor presencia de raíces (15 a 60 cm de suelo) y se mandará a laboratorio solicitando un análisis textural, pudiendo usar el *software Spaw* (USDA) para su interpretación (Callejas *et al.*, 2014b). En las mismas calicatas, se procederá a evaluar con el equipo TDR150 y cada 20 x 20 cm, el contenido volumétrico de agua en el suelo para determinar la conformación del bulbo húmedo; observando la abertura hacia la lateral o entre hilera (ancho) y si el tiempo de riego permite humedecer la profundidad de suelo deseada para la especie frutal (Figura 3, izquierda).

Adicionalmente, se podrán realizar evaluaciones con la varilla de 20 cm desde la superficie, para verificar que el bulbo es continuo en la sobre hilera de plantación. Se sugiere registrar, a través de una caracterización cualitativa, la abundancia de raíces en el bulbo húmedo y, en lo posible, dejar constancia con fotografías (Figura 3, derecha). En suelos salinos o salinos sódicos, se debe registrar adicionalmente la conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1}) con el mismo equipo (Figura 3, centro).

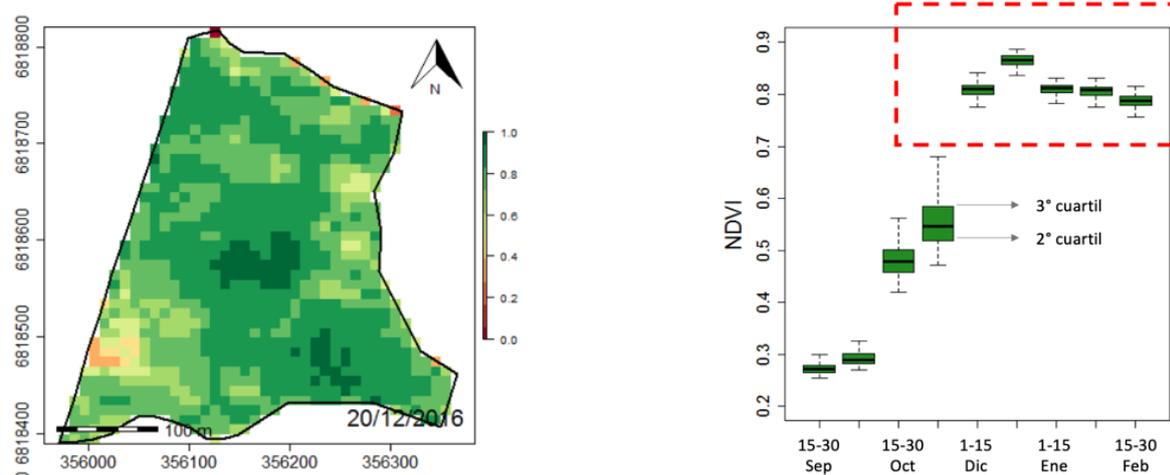


Figura 2. Determinación de sector donde se instalará la sonda, según la variabilidad espacial (izquierda, el sector de riego) y temporal (derecha, durante 5 meses) del vigor, determinado a través del NDVI. Los tonos verdes más oscuros reflejan el mayor vigor, en tanto colores anaranjados acusan el menor vigor.

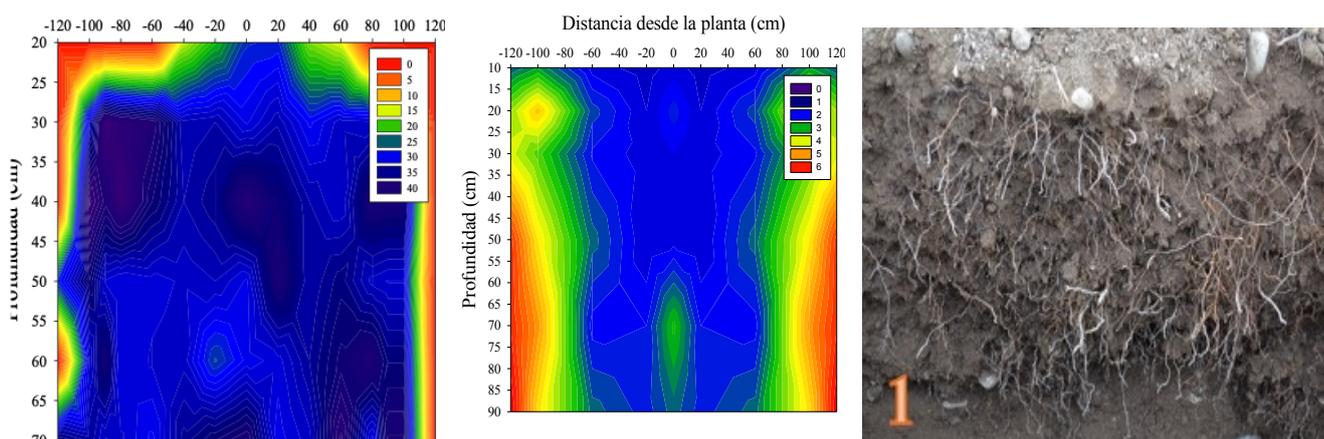


Figura 3. Izquierda, contenido de agua en el suelo (escala de 0 a 40 % de humedad) y determinación de la conformación del bulbo húmedo usando un equipo TDR150. Centro, contenido de sales del bulbo, con escala entre 0 y 6 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Derecha, determinación visual de la presencia de raíces en el bulbo húmedo.

Paso 3. Elección de planta indicadora y validación de un buen sistema radical. Del sector definido se elegirán 5 plantas sanas, bien desarrolladas, ojalá con fruta a la vista y que podrían convertirse en las plantas indicadoras donde se instale la sonda. Posteriormente se procede a evaluar con la Bomba de Scholander el comportamiento del Ψ_{xm} (Gálvez *et al.*, 2014; Navarrete, 2012) durante días continuos, para ratificar la adecuada presencia de raíces en el bulbo de mojamiento a partir de la reacción de las plantas a los ciclos de riego. Se busca que la velocidad de absorción de agua esté equilibrada con la velocidad de pérdida por transpiración de la parte aérea de las plantas, de manera de trabajar con un “Bulbo Húmedo Activo” (con raíces), dado que se ha observado en algunos casos que se puede estar en una situación de estrés aún inmediatamente después de un riego (Munizaga, 2019), dado que el sistema agua-suelo-raíces no es lo suficientemente eficiente para compensar la velocidad de pérdida diaria de agua a través de los estomas, normalmente por una baja densidad de raíces. Por lo tanto, se propone evaluar después de un riego, esperando registrar un alto Ψ_{xm} (ejemplo en vides de mesa: -0.35 MPa), procediendo a realizar un seguimiento de la caída diaria del potencial hídrico hasta el próximo riego, recomendándose usar en este caso un umbral de riego ideal para la especie (ejemplo en vides de mesa: entre -0.68 a -0.7 MPa; Ferreyra *et al.*, 2006; Gálvez *et al.*, 2014). Posterior al riego, se vuelve a verificar el Ψ_{xm} , de manera de ratificar la capacidad de rehidratación de las plantas. Valores normales de Ψ_{xm} y una evolución lógica entre riegos, podrán ratificar que las plantas elegidas (incluido el sistema radical) tiene una estrecha relación con el sistema de riego y la conformación del bulbo húmedo, pudiendo ser planta indicadora.

Paso 4. Ratificación de LG, tiempo y frecuencia. Instalada la sonda en la planta indicadora, pasada la etapa de estabilización de la variabilidad, definidas las LG y habiendo ratificado una buena actividad del sistema radical observada en la plataforma de gestión, se procede a validar la frecuencia y tiempo de riego. Para esto y utilizando la Bomba de Scholander, se procede a evaluar en diferentes ciclos de riego definidos por la sonda, los valores de Ψ_{xm} registrados en el PR. Para esto se eligen plantas al azar dentro del sector de riego, inclusive de diferentes niveles de expresión de vigor (NDVI), procediendo a ratificar que las plantas se encuentran en un rango óptimo de Ψ_{xm} o estatus hídrico. De esta forma se

soluciona el gran desafío que tenía la operación del riego y que es la gran falencia de los sistemas de control tradicionales: “¿cómo definir el umbral de riego, para cada suelo y especie frutal, de acuerdo al concepto de nivel de agotamiento permisible?” (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005). Es importante aclarar que el contenido de agua en el suelo “fácilmente disponible” es definido en este caso entre CCs y PR; con un umbral de riego sujeto a decisiones objetivas.

Paso 5. Mantener la mayor densidad de raíces activas y un adecuado balance de agua y oxígeno en el bulbo de mojamiento. El riego inteligente considera dos aspectos centrales: a) que se permita la conjunción en un bulbo húmedo no compactado (“suelo vivo”), de una alta densidad de raíces con una adecuada dotación de agua de riego y un óptimo programa de fertilización y b) el riego no es solamente adicionar agua al suelo, sino que es fundamental mantener un óptimo balance de agua y oxígeno. Por lo tanto, un buen riego no solamente se logra aplicando agua antes que se llegue al nivel de agotamiento admisible, sino asegurando tener un sistema radical denso, creciendo activamente, sano y que permita, tal como lo dice Gurovich (2001), que la velocidad de absorción de agua equilibre la velocidad de pérdida por transpiración de la parte aérea de las plantas.

Dado que los suelos de la zona frutícola en Chile se caracterizan por bajos niveles de materia orgánica (< 1.5%) y considerando el uso masivo de riego por goteo junto a la imposibilidad de usar estiércol en huertos destinados a exportación, es que se ha propuesto en el marco de este PT el uso permanente de sustancias orgánicas líquidas para promover una buena estructura de suelo y desarrollo de las raíces (Seguel *et al.*, 2020a). Las enmiendas orgánicas líquidas han demostrado incrementar la porosidad de aireación y la retención de agua aprovechable por la planta, además de disminuir la resistencia mecánica del suelo, por lo que son efectivas en mejorar las condiciones para una óptima exploración radical, incluso en condiciones de restricción hídrica, como estrategia de adaptación al cambio climático (Seguel *et al.*, 2020b).

Una de las ventajas que tiene el uso de sondas de capacitancia bajo estos manejos, es la posibilidad de evaluar año a año los cambios de la actividad (intensidad diaria de agotamiento de agua del suelo) o la presencia de raíces (profundidades en las cuales se verifican estos cambios), recomendándose

comparar, para un mismo mes de años diferentes y en días de alta demanda climática (alta ETo o DPV), la caída diaria del contenido de agua en el suelo. Si hay mejores raíces, se observará una mayor expresión de los escalones de caída, sobre todo en la zona de mayor presencia de raíces, normalmente entre los 15 y 50 cm de profundidad.

Paso 6. Extrapolación de tiempo y frecuencia de riego a sectores sin sondas de capacitancia (Kcs). La definición del riego con este PT y la información registrada, permite obtener el volumen de agua requerido por semana, meses o temporada, equivalente a la demanda bruta (Db) que multiplicado por la eficiencia del riego (Efa) permite determinar la evapotranspiración de cultivo (ETc). Ocupando la fórmula $Kcs=(Db \times Efa)/ETo$, podemos determinar un factor que hemos denominado “coeficiente de

cultivo sonda (Kcs)” que permite extrapolar los resultados de un sector de riego con sondas a otro que no tiene los equipos. Para esto, se requiere que este nuevo sector de riego sea vecino (igual condición climática), tenga un suelo similar, la misma especie y manejo, en plena producción y validando con las imágenes satelitales un comportamiento similar de la variabilidad espacial y temporal del índice de vigor (Gordillo *et al.*, 2014; Castañeda *et al.*, 2015; Pocas *et al.*, 2015; Balbontín *et al.*, 2017; Odi-Lara *et al.*, 2016). Cumpliendo con estas exigencias, se implementa el mismo programa de tiempo y frecuencia del sector con sondas y se verifica el comportamiento de las plantas frente a los ciclos de riego a través de la evaluación del Ψ_{xm} con la Bomba de Scholander. En la Figura 4 se presenta un resumen de los diferentes pasos del PT.

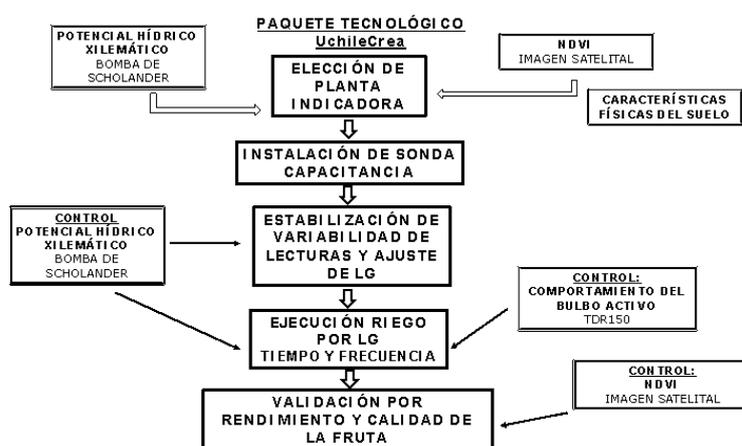


Figura 4. Resumen de los pasos que conforman el PT

4.3 Etapa 3. Validación y retroalimentación

4.3.1 Regiones de Atacama y O'Higgins

La información fue publicada en Callejas *et al.*, (2014a) resumiéndose en: Caso A) Atacama, proyecto UchileCrea (Bip: 33-03-779, 33-03-218 y 30137081): un ahorro de agua de riego en uva de mesa entre 20 a 50%, con una rebaja promedio de 15.000 a 8.000 m³ ha⁻¹ en tres años de proyecto. La eficiencia del agua de riego (EUAr) se incrementó de 1.5 a 3.8 kg m⁻³, así como la eficiencia monetaria del uso del agua (EMUA) de 2.6 a 7.4 US\$ m⁻³. Caso B) Para el caso de O'Higgins, proyecto FIC (IDI: 30112430-0); se produjeron ahorros de agua de riego en cerezo, ciruelo europeo, duraznero, manzano y uva de mesa, en un promedio de 35.6%, con una rebaja de 8,401 a 5,413 m³ ha⁻¹ en tres años de

proyecto. La eficiencia del agua de riego (EUAr) se incrementó para todos los frutales. Caso C) O'Higgins, proyecto FIC (IDI: 30474710) donde se trabajó con productores de palta y cítricos; publicado en Beyá-Marshall *et al.*, (2021). En general se logró un ahorro promedio en el uso de agua de riego de 28% (2,640 m³ ha⁻¹) y 40% (3,803 m³ ha⁻¹), para la primera y la segunda temporada de trabajo, respectivamente; también se obtuvo un ahorro en el consumo eléctrico entre un 17 a un 23% y un aumento monetario del uso de agua de 22 a 35 %. Complementariamente, se desarrollaron estrategias de aplicación de diversos tipos de enmiendas orgánicas para mejorar la condición física del suelo y favorecer la exploración radical de los cultivos, generando incrementos en la calidad y los rendimientos.

4.3.2. Región de Coquimbo, trabajo con Cooperativa Capel y empresa privada

Caso A) Cooperativa Capel. En el proyecto FIC-Limarí (BIP:30137738-0) se trabajó con 50 viticultores productores de uva para pisco, quienes por la gran sequía que estaban viviendo tenían disponible entre 3,400 y 3,800 m³ ha⁻¹ al año, más las eventuales lluvias invernales. A pesar de todo, un 40% de los cooperados aumentó su eficiencia del uso del agua en un 14% y lograron una mejor distribución anual del agua disponible.

A lo anterior se suma un ahorro del 13% en los costos de energía eléctrica. Caso B) Cooperativa Capel, proyecto FIC-Choapa (BIP: 30404130-0) cuyos resultados se publicaron en Callejas *et al.*, (2019), lográndose un ahorro del 21% del agua de riego (cerca de 2,000 m³ ha⁻¹) sin afectar negativamente el potencial productivo de los viñedos, sino por el contrario, en la mayoría de los casos se incrementó. Se estimó un ahorro anual de 161,300 m³ de agua de riego, considerando las 75 ha implicadas directamente en el estudio. El paquete tecnológico permite un significativo aumento de la EUA (45%), valorándose el esfuerzo de la Cooperativa Capel. Caso C) Empresa HC Ltda., 10 años de trabajo con este PT y un uso comercial del mismo en toda su superficie, logrando reducir el consumo de agua de 11,500 a 7,400 m³ ha⁻¹ en uva de mesa (cerca de 24 ha); de 8,700 a 5,500 m³ ha⁻¹ en 49 ha de Chirimoyo (*Annona cherimola* MILL); de 11,500 a 8,300 m³ ha⁻¹ en 28.5 ha de papayo (*Vasconcellea Pubescens* A.DC.); de 5,800 a 1,967 m³ ha⁻¹ en papas (entre 30 a 60 ha). En general los rendimientos por hectáreas se mantuvieron o incrementaron, pero en ningún caso disminuyeron.

4.3.3. Región de Valparaíso, trabajo con pequeños productores de durazneros, damasco y uva de mesa

Proyecto FIC (BIP: 30350827), donde se trabajó con 20 productores de carozos y 60 productores de uva de mesa. A pesar de la baja disponibilidad hídrica entre el 2013 y 2015, en general hubo un ahorro de un 21.7 % del agua de riego y un 20.9% en los costos de energía eléctrica. En carozo se rebajó en promedio solamente de 6,182 a 5,810 m³ ha⁻¹, dado que los huertos se encontraban en un valle (Putando) con muy baja disponibilidad de agua para riego.

En uva de mesa se logró una rebaja de 12,182 a 8,677 m³ ha⁻¹, con un incremento en este último de un 11% en los rendimientos, sin disminuir la calidad de la fruta.

4.4 Etapa 4. Promoción y adopción del PT

4.4.1 Transferencia tecnológica

La adquisición del PT requiere de un gran esfuerzo en el fortalecimiento de la capacitación y acompañamiento de los productores que quieren usarlo en sus campos (de Janvry *et al.*, 2011). Si bien inicialmente se requiere presencia de técnicos capacitados en terreno, posteriormente al trabajar bajo la internet de las cosas (IoT) es factible apoyar en forma telemática la ejecución del riego en las plantaciones (Guerrero-Ibañez *et al.*, 2017). Este apoyo es independiente del tamaño del productor. Para el caso de las experiencias con los productores de uva pisquera, la Cooperativa Capel desarrolló un nuevo cargo, de manera de dar asesoría y acompañamiento permanente a los cooperados; en el resto de las experiencias, los beneficiados terminan capacitados en el uso de las tecnologías asociadas al PT, especialmente en el uso e interpretación de sensores de humedad de suelo.

4.4.2 Falta de capacitación de asesores o técnicos

Una de las principales dificultades que se ha detectado, tiene que ver con el miedo y/o falta de interés en capacitarse por parte de asesores o técnicos que apoyan a grupos de productores, ralentizando el proceso de ingreso del PT. En algunos casos es por la edad, otras por la amenaza de su trabajo que ven en las tecnologías o “Agricultura 4.0”, pero se entiende que es una actitud que siempre es factible encontrar cuando se promueven nuevos PT (Rose *et al.*, 2016).

4.4.3 Promoción y mejoras

Se han realizado varias gestiones para promocionar y mejorar este PT. A) En la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, se creó en el postgrado-magister un curso especial para formar a los nuevos ingenieros agrónomos en esta temática. B) Se siguen realizando memorias de título y tesis de magister, para ir mejorando o creando nuevas herramientas que se han desprendido del trabajo con el PT. C) Se han realizados un sin número de charlas a todo tipo de productores de fruta e inclusive en <https://www.youtube.com/channel/UC6sIMuWCyIM7QE8LCtpM7g>. D) Se ha hecho un esfuerzo especial en publicar los diversos resultados para que queden a disposición de cualquier interesado. E) Se está trabajando con las empresas que manejan o comercializan los diferentes equipos que forman parte de los sub-paquetes tecnológicos. D) Se están generando las primeras herramientas en plataformas IoT, para la gestión del riego y fertilizantes, basado en el PT presentado (FIA

PYT-2020-0445), denominado “Plataforma para la digitalización del manejo inteligente del riego y la fertilización en uva pisquera, basado en el cooperativismo y el internet de las cosas”.

4.4.4 Retos futuros

Uno de los principales desafíos es que el Estado promueva la formación de “Cooperativas Tecnológicas”, para que los productores puedan abordar en conjunto el acceso a las nuevas tecnologías o PT, así como la capacitación que requieren tanto ellos como los técnicos/asesores. Adicionalmente, se debe fortalecer el apoyo a los pequeños y medianos productores para facilitar las inversiones de nuevas tecnologías, dado que el ahorro de agua de riego que puede hacer la agricultura en un futuro de escasez hídrica, trae efectos positivos para toda la población del país. Otro reto que desarrollaría es el hacer gestión de agua a nivel de cuencas, coordinando a los diversos actores, no sólo a los productores agrícolas. Básicamente el ahorro de agua que estamos generando no sólo de seguridad de riego, sino un excedente para otros usos.

5. CONCLUSIONES

Cerca de 20 años de trabajo del equipo UchileCrea, investigando, probando en terreno y validando en

conjunto con productores las nuevas tecnologías para el manejo del riego, ha permitido generar un PT que puede definir el tiempo y frecuencia de riego en forma óptima con la capacidad de apoyar a los agricultores a distancia. Las tecnologías implementadas han permitido mantener o mejorar los rendimientos, ahorrar entre 20 a 40% del recurso hídrico utilizado, aumentar la EUAr y en una similar proporción la energía eléctrica. Adicionalmente, este PT permite tener un programa probado para enfrentar la escasez hídrica que vive el país, enmarcado en el proceso de cambio climático, con impactos positivos a nivel de cuencas.

AGRADECIMIENTO

El éxito de este PT no hubiera sido posible sin la ayuda de múltiples colaboradores y alumnos que se registran en los artículos citados. También se agradece a las diversas Instituciones Estatales chilenas relacionadas con la agricultura, así como del financiamiento de proyectos de investigación y desarrollo en el país, en especial: INDAP, CORFO, FIA y FIC. Finalmente, un especial reconocimiento a los productores que han colaborado con sus campos y tiempo en la implementación de nuevas innovaciones en el mundo del agro.

REFERENCIAS

- Araya Osses, D., Casanueva A., Román Figueroa C., Uribe J. M. and Paneque M. 2020. Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics* 54:4309–4330.
- Balbontín, C., Campos I., Odi-Lara, M., Ibacache, A. & Calera, A. 2017. Irrigation Performance Assessment in Table Grape Using the Reflectance-Based Crop Coefficient. *Remote Sens.*, 9, 1276, 2-17.
- Banco Mundial. 2009. Chile: Fostering Technology Transfer and Commercialization, World Bank Open Knowledge Repository. Disponible online en <http://www.temoa.info/node/675019>.
- Bazán, R. 1977. Los paquetes tecnológicos, su preparación y utilización en la agricultura. Centro Agronómico Tropical de Investigaciones y enseñanza, Departamento de cultivos y suelos tropicales, Turrialba, Costa Rica. 10 p.
- Borra, S., Thanki R., & Dey N. 2019. Satellite image analysis: clustering and classification. Springer Briefs in Computational Intelligence. ISBN: 978-981-13-6424-2.
- Belmar, I., Fernández, A. & Leal, G. 2020. Efectos del otorgamiento de derechos de agua en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Ñuble, Chile Centro Sur. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(5), 225-273.
- Briones, V. 2015. Análisis retrospectivo del cambio tecnológico en la agricultura, el modelo productivo y la economía ecológica. *Revista Universidad y Sociedad [seriada en línea]*, 7 (3). pp. 126-132. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/>.

- Callejas R., Vera J., Rioseco M., Prohens F., Osorio H., Pino P., Navarrete J. y 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 - Vol. 6 - No 2*, pp. 71 – 83.
- Callejas, R., Vera J. y Kremer C. 2014b. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. *Serie Ciencias Agronómicas* n° 28, Universidad de Chile. 112 p.
- Carpio Santos, L. 2018. El uso de la tecnología en la agricultura. *Pro Sciences: Revista De Producción, Ciencias E Investigación*, 2(14), 25–32.
- Casanova, M. Salazar O., Seguel O. and Luzio W. 2013. *The soils of Chile*. Publisher: Springer Netherlands. 183 pag.
- Castañeda, C., M. Martínez, F. Pascual, H. Flores, D. Fernández, S. Esparza. 2015. Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego río Yaqui, Sonora, México. *Agrociencia*, 49(2), 221-232.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. 2015. Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. 26 p. 05/05/2018. <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. 2020. Actualización Balance Hídrico Nacional: Disponibilidad de agua en el norte y centro de Chile podría disminuir más de un 50 por ciento (El Desconcierto). <http://www.cr2.cl/actualizacion-balance-hidrico-nacional-disponibilidad-de-agua-en-el-norte-y-centro-de-chile-podria-disminuir-mas-de-un-50-por-ciento-el-desconcierto/>. (Consultado en abril 2021)
- Comisión nacional de Riego (CNR). 2009. Análisis comparado entre conducción entubada y conducción abierta en canales de riego – Proyectos Civiles e Hidráulicos Ltda. 233 p.
- Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdieu D., Pierre J. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Ann. Bot.*, 87, 477-483.
- De Janvry A., Dunstan A and Sadoulet E. 2011. Recent advances in impact analysis methods for ex-post impact assessments of agricultural technology. *Options for the CGIAR. Workshop: Increasing the rigor of ex-post impact assessment of agricultural research: A discussion on estimating treatment effects*. Consultative Group on International Agricultural Research. California, USA. 40 p.
- Dirección General de Aguas (DGA), División de Hidrología. 2017a. Pronóstico de caudales de deshielo temporada de riego. 2017-2018. División General de Aguas. Santiago. 19 p.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2017b. Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas. Actualización del balance hídrico nacional. Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 378 pág.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2020. Información Pluviométrica, Fluviométrica, Estado de Embalses y Aguas Subterráneas. Boletín DGA N° 512. Santiago, Chile. Disponible en https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin_dicie_mbre_2020.pdf (Consultado en marzo de 2021).
- FDI-CORFO-Universidad de Chile. 2004. Riego y fertirrigación: innovación y cambios tecnológicos en el uso racional del agua de riego y fertilización en la optimización del manejo de parronales en el Valle de Copiapó. FDI-CORFO 04 CR 10 PAD – 01. 2004-2007.
- Fernández I., S. Lecina, M. C. Ruiz-Sánchez, J. Vera, W. Conejero, M. R. Conesa, A. Domínguez, J. J. Pardo, B. C. Lélis and P. Montesinos. 2020. Review Trends and Challenges in Irrigation Scheduling in the Semi-Arid Area of Spain. *Water* 785, 2-26.
- Ferreira, R., Sellés G., Silva H., Ahumada R., Muñoz I. y Muñoz V. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41 (7):1109-1118.

- Ferreira, R. y Sellés G. 2014. Manual de riego para especies frutales. Uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez. Boletín INIA-N°278. 320 p.
- Fundación Chile. 2018. Resumen estratégico radiografía del agua. Brecha y riesgo hídrico en Chile Chile. Escenario Hídrico 2030 Chile, Resumen Estratégico. 38 p.
- Fundación para la innovación agraria (FIA)-Universidad de Chile. 2003. Desarrollo de un modelo del crecimiento y una metodología de evaluación de las raíces de la vid, a nivel de campo, como base para el incremento sustentable de la productividad de los parronales de uva de mesa. FIA-PI-C-2003-2006, 1-A-037.
- Fundación para la innovación agraria (FIA). 2008. Tecnologías Aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. 102 p. Fundación para la Innovación Agraria, Santiago, Chile, Primera edición, diciembre de 2008 Registro de Propiedad Intelectual N° 176.826 SBN N° 978-956-7874-90-3.
- Fundación para la innovación agraria (FIA). 2015. Eficiencia hídrica. Innovaciones para hacer frente al principal desafío que impone el cambio climático. FIA-Gobierno de Chile. 112 p.
- Fundación para la innovación agraria (FIA). 2019. Proyecto de innovación, convocatoria nacional 2019, bases técnicas y administrativas. FIA-Gobierno de Chile. 39 p.
- Gálvez R., Callejas R., Reginato G. and Peppi M.C. 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.
- Gordillo Salinas, V. M., Flores Magdaleno, H., Tijerina Chávez, L., & Arteaga Ramírez, R. 2014. Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(1), 143-155.
- Guerrero-Ibañez, J., Estrada-González F., Medina-Tejeda M., Rivera-Gutiérrez Ma., Alcaraz-Aguirre J., Maldonado-Mendoza C., Toledo-Zuñiga D., López-González V. 2017. SGreenH-IoT: Plataforma IoT para Agricultura de Precisión. *Sistemas, Cibernética e Informática* 14 (2): 53-58.
- Grimes, D. and Williams L. 1990. Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson Seedless grapevines. *Cropscience*. 30: 255-260.
- Gurovich L. 2001. Riego superficial tecnificado. 4ª edición. Ediciones Universidad Católica de Chile. 616 p.
- Martín de Santa Olalla, F. López P. y Calera A. 2005. Agua y Agronomía. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 606 p.
- Munizaga, S. 2019. Efecto del déficit hídrico mediante desecamiento parcial de raíces en vid variedad Red Globe sobre el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua. Memoria de Título, Universidad de Chile, Fac. Cs. Agr. Santiago, Chile, 38 p.
- Naor A. 1998. Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody. *J. Hortic. Sci. Biotech.*, 73, 431-436.
- Naranjo, M. 2004. Innovación y desarrollo tecnológico: Una alternativa para los agronegocios. *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. VIII, 14: 237-250.
- Navarrete, J. 2012. Efecto de distintos criterios de riego sobre variables fisiológicas y parámetros productivos de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) variedad Red Globe. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 73 p.
- Odi-Lara, M., Campos, I., Neale, C., Ortega-Farías, S., Poblete-Echeverría, C., Balbontín, C., Calera, A. 2016. Estimating Evapotranspiration of an Apple Orchard Using a Remote Sensing-Based Soil Water Balance. *Remote Sens.* 8, 253.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2019. Panorama de la agricultura chilena. https://www.odepa.gob.cl/panorama_2019/54/. 152 p. (consultado en abril 2021).
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2020. Catastro frutícola <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/catastros-fruticolas/catastro-fruticola-ciren-odepa>. (consultado en abril 2021).

- Olivo N., Girona J. and Marsal J. 2009. Seasonal sensitivity of stem water potential to vapour pressure deficit in grapevine. *Irrigation Sci.*, 27, 175-182.
- Orellana, D. 2017. Análisis de los efectos de una mega-sequía sobre la generación hidroeléctrica en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago: Universidad de Chile. 68 pag.
- Organización de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura, UNESCO. 2010. Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe. Proyecto “Elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y el Caribe”. Documentos técnicos del PHI-LAC, N°25. Montevideo, Uruguay. 48p.
- Pôças I., Paço, T. A., Paredes, P., Cunha, M., & Pereira, L. S. 2015. Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sensing*, 7(3), 2373-2400.
- Rosati A., Metcalf S., Buchner R., Fulton A. and Lampinen B. 2006. Tree water status and gas exchange in walnut under drought, high temperature and vapour pressure deficit. *J. Hortic. Sci. Biotech.*, 81, 415-420.
- Rose, D., Sutherland W. J., Parker C., Lobleyc M., Winter M., Morris C., Twining S., Ffoulkes Ch., Amano T. and Dicks L. V. 2016. Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems* 149; 165–174.
- Sandoval, J. 2003. El riego en Chile. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. 94 p.
- Santibáñez F. y J. Uribe. 1993. Atlas agroclimático de Chile, regiones VI, VII, VIII y IX. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, Chile. 99 pp.
- Santibáñez, F. 2017. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. p. 147 a 178. En: ODEPA, Reflexiones y desafíos al 2030: Perspectivas de especialistas externos. Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. 294 p.
- Sentek, 2021. Easy Installation, Accurate Soil Moisture, Salinity And Temperature Measurement. <https://sentektechnologies.com/product-range/soil-data-probes/drill-and-drop/>.
<https://sentektechnologies.com/product-range/soil-data-probes/enviroscan/>
- Sackel K., Ahmadi H., Biasi W., Buchner R., Goldhamer D., Gurusinghe S., Hasey J., Kester D., Krueger B., Lampinen B., McGourty G., Micke W., Mitcham E., Olson B., Pelletrau K., Philips H. Ramos D., Schwankl L., Sibbett S., Snyder R., Southwick S., Stevenson M., Thorpe M., Weinbaum S., Yeager J. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology*, 7, 23-29.
- Seguel, O., Beyá-Marshall, Baeza, B. 2021a. Uso de enmiendas para mejorar las condiciones físicas de suelo. pp: 26-40. En: Beyá-Marshall, V., Galleguillos, M. (eds.). Optimización del riego en paltos y cítricos. Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N° 34.
- Seguel, O., Hardy, Ch., Alfaro, F., Pastenes, C. (eds.). 2020. Estrategias de gestión del riego para aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas. Experiencias frente al proceso de aridización. Universidad de Chile- FIA. Santiago, Chile. 87 p.
- Shakel K., 2011. A Plant-based approach to deficit irrigation in trees and vines. *Hortscience*, 42, 173-177.
- Silva, A. 2011. Conocimiento, uso actual y futuro del paquete tecnológico, promovido por el P4P para frijol, postrera, 2009. Tegucigalpa: IICA, 54p.
- Torres, Y., Rivas J., De Pablos-Heredero C., Perea J., Toro-Mujica P., Angón E. y García A. 2014. Identificación e implementación de paquetes tecnológicos en ganadería vacuna de doble propósito. Caso Manabí-Ecuador. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 5(4):393-407.
- Villalobos, P., Manríquez R., Acevedo C. y Ortega S. 2009. Alcance de la agricultura de precisión en Chile: estado del arte, ámbito de aplicación y perspectivas. Estudio encargado por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) del Ministerio de Agricultura. 114 p.
- Vera, J., Mounzer O., Mendoza R. y Megna A. 2004. Riego Inteligente. *Rev. de Riegos y Drenajes*, 134: 64-69

- Veihmeyer, F.J. and Hendrickson, A. H. 1950. Soil moisture in relation to plant growth. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1:285-304.
- Williams, L. 2000. Grapevine water relations. p. 121–126. In: Christensen, L.P. (ed.). *Raisin production manual*. Publication n° 3393. Univ. California, Oakland, C.A.
- Williams, L. and Trout, T. 2005. Relationships among vine-and soil-based measures of water status in a Thompson Seedless vineyard in response high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56 (4): 357-366.

Como citar este artículo:

Callejas-Rodríguez R., y Seguel, O. (2021). Paquete tecnológico UchileCrea para el control sustentable del riego en sistemas frutícolas. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 128-142. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-09



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