



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN PARRONES DE UVA DE MESA MEDIANTE METODOLOGÍA K_c - ET_0 Y SONDAS DE CAPACITANCIA FDR

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias

RODRIGO IGNACIO REYES SÁNCHEZ

Director de Tesis
RODRIGO CALLEJAS RODRÍGUEZ

Profesor Colaborador
CRISTIÁN KREMER FARIÑA

Profesores Consejeros
GABINO REGINATO MEZA
REINALDO CAMPOS VARGAS

SANTIAGO - CHILE
2023

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO EN
UVA DE MESA MEDIANTE METODOLOGÍA K_c-ETO Y SONDAS
DE CAPACITANCIA FDR**

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de
Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias

RODRIGO IGNACIO REYES SÁNCHEZ

Calificaciones	Calificaciones
(Memoria de Título)	(Tesis de Grado)

DIRECTORES DE TESIS

Rodrigo Callejas Rodríguez	6,8
Ingeniero Agrónomo, Dr. sc. agr.	

PROFESORES CONSEJEROS

Gabino Reginato Meza	6,7
Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc.	

Reinaldo Campos Vargas	
Ingeniero Agrónomo, PhD.	7,0

Santiago, Chile
2023

EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO EN UVA DE MESA MEDIANTE METODOLOGÍA K_c-ETO Y SONDAS DE CAPACITANCIA FDR

EVALUATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION TABLE GRAPE USING THE K_c-ETO METHOD AND FDR CAPACITANCE PROBES

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

A mis padres, pareja, profesores y abuelita en el cielo ...

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVOS.....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
Ubicación y descripción de las áreas de estudio.....	6
Bases de datos.....	7
Base de datos climática.....	7
Base de datos sonda Frequency Domain Reflectometry (FDR).....	7
Base de datos satelitales.....	7
Métodos.....	8
Evaluación de la evapotranspiración de referencia (ET _o) obtenida desde estaciones meteorológicas.....	8
Evaluación de la cobertura vegetal mediante imágenes satelitales y mediciones de campo.....	8
Estimación de K _c en función de la cobertura vegetal.....	10
Análisis estadístico.....	13
RESULTADOS.....	14
Caracterización de las zonas de estudio.....	14
Caracterización climática.....	14
Caracterización de suelos.....	14
Evaluación de la evapotranspiración de referencia (ET _o) obtenida desde estaciones meteorológicas.....	15
Estimación del índice de área foliar (IAF) y fracción de radiación PAR interceptada (FI) por medio de técnicas satelitales y de terreno.....	17
Modelo predictivo de IAF y FI con evaluaciones de ceptómetro.....	17
Estimación de IAF por medio de relación de peso foliar.....	18
Estimación de fracción de cobertura (FC) por medio de fotografías de suelo.....	19
Evolución del índice de área foliar (IAF) y fracción de interceptación (FI).....	20
Estimación del coeficiente del cultivo y volúmenes de riego mediante relaciones empíricas.....	22

Estimación de Kc y componentes del balance hidrológico mediante modelación del coeficiente de cultivo dual y sondas de capacitancia FDR	24
Relación entre el área foliar y los aportes de riego	29
DISCUSIÓN	32
Predicción del índice de área foliar y fracción de interceptación.....	32
Estimación del riego en parrones españoles con datos climáticos y satelitales	32
Manejo del riego y componentes del balance hídrico	35
Estimación de la evapotranspiración en parrones de uva de mesa.....	36
Evapotranspiración en parrón de uva de mesa estimada con sensores de humedad FDR	37
CONCLUSIONES	40
LITERATURA CITADA.....	41
ANEXOS	50
APÉNDICES	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las zonas de estudio.....	6
Figura 2. Evapotranspiración de referencia (ET _o) de las áreas de estudio para la temporada 2019-2020.....	14
Figura 3. Curva de regresión exponencial entre índice de área foliar (IAF) y el índice de vegetación SAVI.....	17
Figura 4. Linealización logarítmica del modelo de predicción de índice de área foliar (IAF).....	18
Figura 5. Modelo de predicción del índice de área foliar (IAF)	19
Figura 6. Modelo de regresión lineal entre fracción de cobertura (Fc) estimadas mediante fotografías de suelo y ceptómetro.	20
Figura 7. Evolución del índice de área foliar (IAF) y la fracción de cobertura (Fc)	21
Figura 8. Coeficiente basal de cultivo (K _{cb}) y coeficientes de cultivo (K _c) obtenidos a partir de ecuaciones empíricas con datos de NDVI, IAF y Fc.....	23
Figura 9. Relación entre el riego efectivo, la evapotranspiración de referencia y el índice de área foliar (IAF).....	30
Figura 10. Patrón de consumo de agua estimado con sondas de capacitancia a escala diaria versus déficit de presión de vapor (DPV).	31
Figura 11. Cartografía del índice de área foliar (IAF) en el momento de máxima cobertura para cada cuartel de estudio.	52
Figura 12. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel M1 en la temporada 2019-2020.....	53
Figura 13. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel M1.	54
Figura 14. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel A1 en la temporada 2019-2020.....	55
Figura 15. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel A1	56
Figura 16. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel T1 en la temporada 2019-2020.....	57
Figura 17. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel T1.	58
Figura 18. dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel THH en la temporada 2019-2020.....	59

Figura 19. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel THH.	60
Figura 20. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel THS en la temporada 2019-2020.....	61
Figura 21. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel THS.	62
Figura 22. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel SL21 en la temporada 2019-2020.....	63
Figura 23. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel SL21.	64
Figura 24. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel FRU7 en la temporada 2019-2020.....	65
Figura 25. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel FRU7.	66
Figura 26. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C4 en la temporada 2019-2020.....	67
Figura 27. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C4 en la temporada 2020-2021.....	68
Figura 28. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C4 en la temporada 2020-2021.....	69
Figura 29. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo.	70
Figura 30. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C9 en la temporada 2019-2020.....	71
Figura 31. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C9 en la temporada 2020-2021.....	72
Figura 32. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C9 en la temporada 2021-2022.....	73
Figura 33. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo.	74
Figura 34. Componentes del balance hídrico para el cuartel C4 en temporada 2019-2020.	75
Figura 35. Componentes del balance hídrico para el cuartel C9 en temporada 2019-2020.	76
Figura 36. Componentes del balance hídrico para el cuartel C4 en temporada 2020-2021.	77
Figura 37. Componentes del balance hídrico para el cuartel C9 en temporada 2020-2021.	78

Figura 38. Componentes del balance hídrico para el cuartel C4 en temporada 2021-2022.	79
Figura 39. Componentes del balance hídrico para el cuartel C9 en temporada 2021-2022.	80
Figura 40. Modelo predictivo de kcs a partir del cuartel C4 en las temporadas 2019-2020 y 2020-2021 y evolución del coeficiente de cultivo sonda (Kcs) y el índice de vegetación SAVI en función de los días grado (DG°)	81
Figura 41. Caracterización de los grupos detectados por la metodología k-means. Gráfico boxplot y histograma de frecuencia del índice de vegetación SAVI para cada clase de vigor	82

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Obtención de índices de vegetación según sus ecuaciones.....	8
Cuadro 2. Relaciones empíricas utilizadas en estimación de k_c y k_{cb}	11
Cuadro 3. Distribución de tamaño de partículas, clase textural y contenido de humedad.....	15
Cuadro 4. Estadígrafos entre E_{To} obtenida por Penman-Montheith, Hargreaves-Samani y Priestley-Taylor.....	16
Cuadro 5. Evapotranspiración de referencia (E_{To}) estimada mediante Penman-Montheith, Hargreaves-Samani y Priestley-Taylor.....	16
Cuadro 6. Valor de estadígrafos entre datos de terreno e índices espectrales de vegetación.....	17
Cuadro 7. Valor de estadígrafos entre el índice de área foliar (IAF) estimado mediante ceptómetro y modelo de predicción basado en el peso de las hojas.....	18
Cuadro 8. Proyecciones de riego generados mediante coeficientes de cultivo de relaciones empíricas.	24
Cuadro 9. Proyecciones de riego para la temporada mediante los coeficientes de cultivo de relaciones empíricas.	24
Cuadro 10. Componentes del balance hídrico para los predios evaluados en la temporada 2019-2020.....	26
Cuadro 11. Resumen de componentes del balance hídrico para C4 y C9 obtenidos por modelación del coeficiente del cultivo dual y sensor FDR	27
Cuadro 12. Resumen de componentes del balance hídrico para C4 obtenidos mensualmente por modelación del coeficiente del cultivo dual.	27
Cuadro 13. Resumen de componentes del balance hídrico para C9 obtenidos mensualmente por modelación del coeficiente del cultivo dual	28
Cuadro 14. Evolución del potencial hídrico xilemático en vides de C9	29

RESUMEN

La producción de uva de mesa chilena está experimentando momentos críticos. En el frente externo existe fuerte competencia con otros países lo que dificulta su comercialización, mientras que internamente, la disminución en la disponibilidad hídrica ha generado retroceso en la superficie destinada para su producción. Esto obliga a los productores a buscar la máxima eficiencia productiva con el objetivo de mantener su competitividad. La correcta programación del riego puede permitir a los agricultores mantener la producción frente a volúmenes de agua cada vez más escasos y generar ahorros en energía eléctrica y fertilizantes. En la práctica, el riego se estima mediante la metodología Kc-ETO, sin embargo, se ha descrito que esta metodología sobreestima con facilidad los volúmenes de riego. En este trabajo se estudiaron 9 parrones durante la temporada 2019-2022 y se generó el balance hídrico para cada uno de ellos, estimando la ETc de acuerdo con 5 métodos. Se determinó que los métodos de estimación de ETc basados netamente en imágenes satelitales sobreestima el riego en hasta un 37% respecto del método Kc dual, sin embargo, cuando se utilizan las imágenes satelitales para ajustar el área foliar las estimaciones son similares. Durante las temporadas 2019-2020, 2020-2021 y 2021-2022 se analizaron dos parrones de alto rendimiento cuyo riego se programa de acuerdo con el uso de sensores de humedad de suelo FDR y sus Líneas de Gestión, encontrándose que consumen entre un 70 y 80% de la ETc a pesar de mantener un índice de área foliar igual a 5.

Palabras clave: EnviroScan®, FDR, Evapotranspiración, Índice de vegetación, IAF, Riego.

ABSTRACT

The production of Chilean table grapes is experiencing critical moments, on the external front it faces strong competition, which makes its commercialization difficult, while internally the decrease in water availability has generated a setback in the surface destined for its production. This forces table grape growers to seek maximum efficiency in order to stay competitive. The correct programming of irrigation can allow farmers to maintain production in the face of increasingly scarce volumes of water and generate savings in electricity and fertilizers. In practice, irrigation is estimated using the Kc-ETO methodology, however it has been described that this methodology easily overestimates irrigation volumes. In this work, 9 vines were studied during the 2019-2020 season and the water balance for each of them will be selected, estimating the ETc according to 5 methods. It will be stated that the ETc estimation methods that are purely based on satellite images overestimate irrigation by up to 37% compared to the dual Kc method, however, when satellite images are used to adjust the leaf area, the estimates are similar. During the 2019-2020, 2020-2021 and 2021-2022 seasons, two high-yielding vines were analyzed whose irrigation is scheduled according to the methodology of the management lines, finding that they consume between 70 and 80% of the ETc despite to maintain a volume of leaf area equal to 5.

KEYWORDS: EnviroScan®, FDR, Vegetation Index, LAI, Irrigation

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha cobrado gran relevancia a nivel nacional y mundial debido a su efecto en diversas variables climáticas, entre las que destacan la temperatura y las precipitaciones, las cuales han visto alterada su distribución a lo largo del planeta (Dore, 2015). Particularmente en Chile, el cambio climático se ha manifestado como un aumento en la temperatura media respecto a la serie histórica, lo que produjo el ascenso de la isoterma 0°C entre 300 y 500 m. Como consecuencia, la acumulación de nieve en la cordillera es menor y el tamaño de los glaciares andinos ha disminuido, afectando directamente el caudal de ríos de régimen nivo-pluvial, como los ríos Elqui, Aconcagua, Maipo y Cachapoal, los que actualmente presentan un caudal de acuerdo con el promedio histórico de 16; 55; 52 y 66% respectivamente (Santibáñez, 2014; DGA, 2021).

El escenario climático adverso es el telón de fondo para un momento difícil de la producción de uva de mesa chilena, por un lado, ha perdido mercado por la entrada de Perú como segundo exportador a nivel mundial, además de Marruecos y otros, como exportadores de uva tardía a mercados chinos, lo que ha disminuido la ventana comercial existente para la uva de guarda chilena (ASOEX, 2021; Trademap, 2021; Mincetur, 2022; ASOEX, 2022). Estos factores obligan a los productores a aumentar su competitividad, y para esto deben hacer uso eficiente de los recursos, entre ellos el agua.

La evapotranspiración real (ET_r) consta de dos procesos combinados: la pérdida de agua superficial por evaporación y, por otro lado, la pérdida de agua por transpiración desde las cubiertas vegetales. La cuantificación de la ET_r de forma directa resulta difícil de obtener, además de costosa debido a los instrumentos y la frecuencia de medición requeridos, es por eso, que la estimación de la ET_r ha sido objeto de estudio en numerosas investigaciones (Allen *et al.*, 2006; Ramos y Santos, 2009; Campos *et al.*, 2010; Frag *et al.*, 2012; Poblete y Ortega, 2013; Kool *et al.*, 2014; Pocas *et al.*, 2015). Ante esta dificultad, la FAO en el boletín 56 propone un método sencillo para la estimación de la evapotranspiración (ET) por medio de una metodología indirecta, y enmarca los resultados dentro de condiciones no limitantes de agua, nutrición o sanidad, refiriéndose por lo tanto a una evapotranspiración potencial (ET_c) (Allen *et al.*, 2006).

Dicho procedimiento (K_c-ET_o), considera que la evapotranspiración de una cubierta vegetal (ET_c) es el producto de dos factores. El primero de ellos es la demanda evaporativa de la atmósfera o evapotranspiración de referencia (ET_o). De esta forma, la información climática disponible y su confiabilidad condicionan en un 50% la estimación de la ET_c con fines de programación del riego. Mientras que el segundo factor, el coeficiente del cultivo (K_c), indica el estado de desarrollo y el tamaño de la cubierta vegetal, dependiendo fuertemente de la arquitectura de la planta y del sistema de conducción (Calera *et al.*, 2017). Para uva de mesa, el boletín 56 de FAO fija este valor en un máximo de 0,85 cuando se alcanza la cobertura vegetal máxima, que es caracterizada con un índice de área foliar (IAF) igual o superior a 3 (Allen *et al.*, 2006).

En la literatura abundan valores de K_c para la producción de uva de mesa conducida bajo diversos sistemas de conducción. Entre estos, bajo el sistema de conducción *Trellis System*, Williams *et al.* (2003) encontraron un K_c máximo de 1 cuando el IAF llegó a 3,3 y la fracción de cobertura del suelo (FC) a 60%. De forma similar, Williams y Ayars (2005) estimaron un K_c máximo de 1,3 con IAF de 4,4 y FC 60%. Por otro lado, Sellés

et al. (2012), Villagra *et al.* (2013) y Williams y Fidelibus (2016) concluyeron que, para parrones españoles, el valor propuesto en el boletín FAO 56 subestima la demanda debido a que en estos se alcanza una FC de hasta 90%, llegando a obtener valores de Kc máximos que van desde 1,1 a 1,3.

En las últimas dos décadas se ha masificado el uso de sensores de suelo para la programación del riego, permitiendo obtener una estimación indirecta de la evapotranspiración al monitorizar el agua que percola la zona de raíces y el agua aportada vía riego. Entre estos sensores destaca la sonda de capacitancia FDR Enviroscan, que consiste en varios sensores, tipo anillos móviles, montados verticalmente en un vástago a distintas profundidades que es instalado en el suelo (Adam, 2015). Los resultados de distintas experiencias utilizando monitorización continua de la humedad del suelo concuerdan en que el análisis de los registros ofrece una imagen más dinámica de los eventos relacionados con la gestión del riego y, por lo tanto, es adecuado para aumentar la precisión en la toma de decisiones (Arauzo *et al.*, 2005; Arregui y Quemada, 2006; Mounzer *et al.*, 2008a; Mounzer *et al.*, 2008b; Orozco y Valverde, 2012, Callejas *et al.*, 2014a y Callejas y Seguel, 2021). Los sensores de humedad de suelo se han empleado para relacionar el contenido de agua en el suelo y el estado hídrico de las plantas (Martí *et al.* 2013; Mossad *et al.* 2018; Adeyemi *et al.* 2018; Ohana-Levi *et al.* 2022) lo que ha permitido fortalecer el uso de las Líneas de Gestión en la programación del riego, generando ahorros de un 20% a un 50% del agua aplicada tradicionalmente utilizando la metodología Kc-ET_o, lo que significa que los volúmenes de agua aplicada en uva de mesa se encuentran entre 4.000 y 7.000 m³·ha⁻¹·año⁻¹, dependiendo de la región productiva (Navarrete, 2012; Callejas *et al.*, 2014a; Gálvez *et al.*, 2014; Callejas y Seguel 2021).

Algunos autores reportan que al restituir volúmenes de agua inferiores a la ET_c se han obtenido rendimientos iguales que cuando se repone el 100 % de la ET_c (Ferreya *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 2010; Zúñiga *et al.*, 2015; Conesa *et al.*, 2014; Conesa *et al.*, 2016; Centofanti *et al.*, 2018; Islam *et al.*, 2020). Los distintos reportes indican que en uva de mesa no se afecta la producción cuando el porcentaje de riego respecto de la ET_c es de 70 a 80%.

Otros enfoques han intentado aportar en el conocimiento de la ET desde la teledetección, siendo el método más utilizado las imágenes satelitales, a partir de las cuales es posible estimar la ET de manera indirecta, mediante la incorporación de índices espectrales de vegetación (Castañeda *et al.*, 2015; Pocas *et al.*, 2015; Balbontín *et al.*, 2016; Balbontín *et al.*, 2017). La principal ventaja del uso de esta herramienta radica en la dimensión espacial que está contenida en la información satelital, la que permite generar cartografías de las variables claves que definen la ET, como la estimación de la cobertura de suelo e Índice de Área Foliar. Su uso se encuentra documentado como herramienta complementaria en la toma de decisiones sobre el riego, a través del ajuste de la cobertura vegetal y por lo tanto de la demanda hídrica (Er-Raki *et al.*, 2007; Er-Raki *et al.*, 2013).

La idea que el Kc propuesto en FAO 56 subestima la demanda hídrica, tal como lo señalan algunos autores, se encuentra fundamentada por la relación lineal entre la ET_c y la fracción de cobertura del follaje (FC) (Williams y Ayars, 2005). Sin embargo, el uso de sensores de suelo ha permitido utilizar menos agua de riego que la estimada por los dos enfoques anteriores. Por esto, el presente trabajo intenta dilucidar si los volúmenes de

riego utilizando sensores de humedad de suelo en la programación del riego se deben a una menor expresión del follaje.

HIPÓTESIS

En parronales de uva de mesa comercialmente productivos, el volumen de agua de riego es sobreestimado por el método Kc-ETo respecto de los sensores de humedad de suelo FDR.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar, si la estimación del volumen de agua de riego mediante el método Kc-ETo es sobreestimado por efecto de la cobertura vegetal respecto del obtenido con sensores de humedad de suelo FDR.

Objetivos específicos

- 1) Evaluar la cobertura vegetal de parrones de uva de mesa mediante imágenes satelitales y mediciones de campo.
- 2) Estimar Kc en función de la cobertura vegetal.
- 3) Determinar la evapotranspiración del cultivo (ETc) basado en la metodología Kc-ETo y sondas FDR.
- 4) Estimar mediante balance hídrico el volumen de percolación profunda utilizando lecturas de sensores de humedad de suelo FDR de lectura continua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y descripción de las áreas de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo en cinco predios ubicados en cuatro regiones (Figura 1), con distintas variedades de *Vitis vinifera* L. En total se estudiaron 9 parrones, cada uno con sonda de humedad de suelo FDR de lectura continua. En Coquimbo, comuna de Vicuña (30° 2'10.09"S- 70°40'9.58"O) se evaluaron dos cuarteles de 'Perlón', desde ahora C4 y C9. El tipo climático de Vicuña según Köppen corresponde a estepa interior, con régimen de humedad árido (BS) con ETo de 1.231 mm entre septiembre y mayo. En Valparaíso, comuna de San Esteban (32°43'48.89"S-70°35'47.38"O) se evaluó un cuartel 'Red Globe', desde ahora M1 y en la comuna de Rinconada (32°53'50.13"S - 70°37'59.33"O) se evaluó un cuartel de 'Thompson Seedless' y 'Arra 15', desde ahora T1 y A1. El tipo climático de estas comunas corresponde a estepa interior con régimen de humedad árido (BSAr) con ETo de 860 mm entre septiembre y mayo. En la Región Metropolitana, comuna de Calera de Tango (33°38'6.36"S-70°48'20.55"O) se evaluaron dos cuarteles de 'Thompson Seedless', desde ahora THH y THS. El tipo climático de esta comuna es templado con régimen de humedad subhúmedo (Csb2) con ETo de 924 mm entre septiembre y mayo. En la Región de O'Higgins, comuna de San Vicente de Tagua Tagua (34°27'16.46"S- 71° 7'22.63"O) se evaluó un cuartel de 'Timco' e 'Inia Grape One', desde ahora FRU7 y SL21. El tipo climático de esta comuna corresponde a templado con régimen de humedad subhúmedo (Csb2) con ETo de 1.153 mm entre septiembre y mayo. El marco de plantación de los predios, precipitación del sistema e información referente a los cuarteles se presenta en el Apéndice 1.

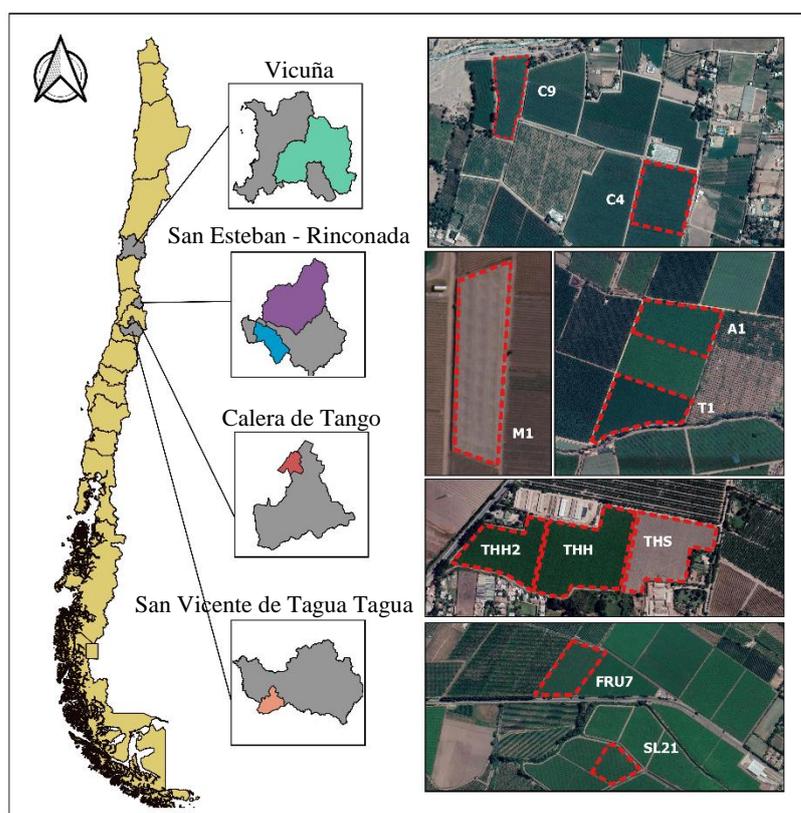


Figura 1. Localización de las zonas de estudio.

Bases de datos

Base de datos climática

Los datos meteorológicos requeridos como ETo, precipitación, temperatura mínima diaria y temperatura máxima diaria se obtuvieron desde las estaciones: Vicuña ubicada en Vicuña (cuarteles C4 y C9), Escuela Agrícola San Felipe, ubicada en San Felipe (cuarteles M1, A1 y T1), Talagante, ubicada en Talagante (cuarteles THH y THS) y El Tambo ubicada en San Vicente de Tagua Tagua (cuarteles SL21 y FRU7). Todas disponibles en la Red Agrometeorológica de INIA (<https://agrometeorologia.cl/>).

Base de datos sonda Frequency Domain Reflectometry (FDR)

Cada predio bajo estudio cuenta con una sonda Enviroscan (Sentek Australia), la que está instalada en el suelo a una distancia de 20 cm del tronco de una planta representativa del cuartel. Las sondas de capacitancia están compuestas por cuatro sensores dispuestos a una profundidad de 20; 40; 60 y 80 cm para los cuarteles C4, C9, A1, T1, M1, FRU7, SL21 y THH, mientras que para THS son 5 sensores y se ubican a los 10; 30; 50; 80 y 160 cm. Los sensores envían las lecturas registradas cada 15 minutos a un almacenador de datos que las procesa como contenido volumétrico de agua (θ_v) y posteriormente fueron descargados desde los servidores de Wiseconn con el software SDB Converter y transformados a planillas Excel con el software Data Exchange.

Base de datos satelitales

Las imágenes satelitales empleadas fueron las obtenidas a través del sensor MSI a bordo del satélite Sentinel 2A y Sentinel 2B que presentan una resolución espacial de 10m y temporal de 10 días. Las bandas utilizadas fueron B2, B3, B4, B8, B8a y B11. El rango de fechas estudiado va desde septiembre a marzo, con un intervalo de diez días, lo que generó una base de datos de 1.136 imágenes. La descarga se hace gratuitamente desde el repositorio de datos de Earth Explorer de USGS Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). El formato de descarga es L1-C TOA y por lo tanto requieren de una transformación a reflectancia de superficie BOA, para esto fue necesario aplicar el método de corrección atmosférica dos1 (Chávez, 1988).

Métodos

Evaluación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) obtenida desde estaciones meteorológicas

Dado que la evapotranspiración de referencia es uno de los términos empleados en la ecuación que estima los requerimientos de riego, se debe evaluar los valores entregados por las estaciones meteorológicas en busca de tendencias anómalas. Para esto, se estimó la evaporación desde una superficie de agua libre de acuerdo con Penman (1948), que se considera una estimación del límite superior de la demanda evaporativa de la atmósfera. Adicionalmente se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante los métodos de Hargreaves y Samani (1985) y Priestley y Taylor (1946) con el fin de evaluar su posible uso en caso de no disponer de estaciones cercanas. Las ecuaciones se muestran en Anexo1.

Evaluación de la cobertura vegetal mediante imágenes satelitales y mediciones de campo

Estimación de índices de vegetación por sensores remotos. Para generar el modelo predictivo con el índice de vegetación más idóneo se hizo un análisis de confiabilidad de los modelos utilizando variados índices de vegetación (IV), los principales se encuentran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Obtención de índices de vegetación según sus ecuaciones.

Índice de vegetación	Ecuación	Referencia
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Ec. 1)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Ec. 2)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} (1 + L)$	Huete (1988)
NDVIgreen (Ec. 3)	$\frac{Green - Red}{Green + Red}$	Gitelson <i>et al.</i> (2002)
SAVIgreen (Ec. 4)	$\frac{Green - Red}{Green + Red + L} (1 + L)$	Li <i>et al.</i> (2010)
Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) (Ec. 5)	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)

Estimación del índice de área foliar (IAF) y fracción de interceptación (FI) por medio de ceptómetro. El modelo utilizado para la estimación de IAF es el propuesto por Jackson y Palmer (1979) que debe ser complementado con estimaciones del índice de extinción foliar a través del modelo del elipsoide de Campbell (Campbell y Norman, 1989). Este procedimiento se muestra en el Anexo 2 junto a la ecuación utilizada para la estimación de la fracción de interceptación de radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Las mediciones en terreno de (PAR) fueron realizadas por medio de un ceptómetro lineal ACUPPAR LP-80 (Decagon Devices, Washington, EE. UU.) en tres horarios, dos horas antes del mediodía solar, al mediodía solar y dos horas después del mediodía solar. El transecto fue perpendicular a la hilera de plantación y cada postura de evaluación tiene una separación de 0,25 m. Se hicieron cuatro transectos evaluando desde la mitad de la entre hilera a la siguiente. La evaluación corresponde a la fracción de la radiación fotosintéticamente activa no interceptada por el parrón (PAR_{ni}). Antes y después de completado el transecto se realizó una medición en suelo descubierto (PAR₀), para corrección de los datos del ceptómetro (Zamorano, 2011).

Estimación del índice de área foliar (IAF) y fracción de interceptación (FI) durante la temporada. Para caracterizar la cubierta vegetal y su evolución, se usaron las variables cuantitativas IAF y FI que fueron generadas por un método predictivo construido con evaluaciones en terreno de PAR y los índices de vegetación (IV) utilizando imágenes satelitales. Se analizó la relación entre ocho IV con IAF y FI lo que permitió seleccionar el predictor de mayor confianza estadística. Estos resultados permiten extrapolar de forma espacial y temporal los valores de IAF y FI obtenidos.

Para la generación del modelo de IAF se realizó un modelo de regresión exponencial, relacionando los datos obtenidos de IAF por ceptómetro con los IV. Adicionalmente para la obtención de los parámetros estadísticos de confiabilidad, fue necesario una linealización exponencial al modelo (ecuación 6), debido a que disminuye la complejidad de la manipulación de los datos, para la obtención de los estadígrafos.

$$y = a * e^{bx} \cong \ln(y) = \ln(a) + bx \quad (\text{Ec. 6})$$

Ecuación 6. Donde y es la variable dependiente (IAF ceptómetro), x variable es la independiente (IV), a y b son parámetros de ajuste.

Para la estimación del modelo predictivo de FI se realizó una regresión lineal entre los datos obtenidos de FI por ceptómetro y los IV, además se obtuvieron los parámetros estadísticos de confiabilidad.

Estimación de IAF por medio de relación de peso foliar. Se evaluó una metodología de predicción de IAF, la que consistió en relacionar el peso de las hojas contenidas dentro de una superficie de 0,5 x 0,5 m de la cubierta vegetal, con la suma de la superficie de todas las hojas. La superficie foliar fue evaluada en laboratorio con el medidor de área foliar LI-COR®, modelo LI-300 (LI-COR Biosciences, Nebraska, EE. UU).

Estimación de FI por medio de fotografías de suelo. Se evaluó una metodología alternativa para la estimación de FI, empleando para esto fotografías del suelo que fueron posteriormente procesadas con el software estadístico R (R Core Team, 2022), para

posteriormente aplicar la técnica de estadística multivariante K-Means, Borra *et al.* (2019), a través de la librería (Raster) para generar una clasificación no supervisada de las imágenes que permitiera discriminar entre los píxeles sombreados y los píxeles iluminados. Las imágenes utilizadas se obtuvieron con una cámara fotográfica Nikon 5100 con resolución de 16,4 Megapíxeles.

Estimación de Kc en función de la cobertura vegetal

Se usaron dos enfoques en la estimación de los valores de Kc. En el primero se siguió la metodología propuesta para el cálculo del coeficiente dual de cultivo a partir de estimaciones de cobertura foliar y correcciones climáticas (Allen *et al.*, 2006; Allen y Pereira, 2009). El segundo enfoque está basado en el uso de relaciones empíricas encontradas por medio de teledetección (Er-Raki *et al.*, 2013; Pocas *et al.*, 2015), flujos turbulentos Sellés *et al.* (2012) y uso de lisímetros (Williams *et al.*, 2003; Netzer *et al.*, 2008). Las estimaciones de los distintos valores de Kc se llevaron a cabo posterior al primer riego de la temporada y fueron estimados a partir del IAF y FI estimado en el píxel donde se encuentra instalada la sonda de humedad de suelo.

Estimación del coeficiente dual del cultivo (Kcb + Ke). Para diferenciar entre el agua evaporada y la que potencialmente podría transpirar el parrón, se estimaron los componentes de la ecuación 7, luego, integrando el factor clima se obtuvo la ecuación 8.

$$Kc = Kcb + Ke \quad (\text{Ec. 7})$$

$$ETc = Kcb ETo + Ke ETo \quad (\text{Ec. 8})$$

Ecuaciones 7 y 8. Kcb, es el coeficiente basal de cultivo, Ke el coeficiente de evaporación y ETo la evapotranspiración de referencia.

Dado que la estimación de Ke depende de la humedad disponible en el suelo, y asumiéndose que la superficie expuesta del suelo en el riego por goteo es pequeña, se estimó los valores de Kr (coeficiente adimensional de reducción de la evaporación del suelo) en lugar de asumir su valor como 1 (agua constantemente disponible para evaporación) con los datos entregados por el sensor de los 10 ó 20 cm de la sonda. Por medio de la ecuación 9 se obtuvo el Ke (Allen *et al.*, 2006).

$$Ke = \min(Kr(Kcmax - Kcb), few * Kcmax) \quad (\text{Ec. 9})$$

Ecuación 9. Kcmax es el valor máximo de Kc después de un riego o lluvia y few es la fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido. Se estimó que el ancho de humedecimiento sobre la hilera es de 1 m.

Obtención de la curva de ajuste de Kcb basal. Para definir la duración de los periodos involucrados en la etapa inicial, media y final del ciclo productivo se evaluó la serie temporal de NDVI, IAF y FI. La brotación se asumió cuando los valores de NDVI aumentaron en una décima y la tendencia fue sostenida. El inicio del periodo medio se definió como el momento en que el IAF estimado fue mayor o igual a 3, hasta el día en que fue menor que 3. Se asumió como Kcb final el valor de 0,4 para el 30 de abril.

Corrección climática del coeficiente basal del cultivo (Kcb). Los valores de Kcb medio y final, que se encuentran tabulados en Allen *et al.* (2006), son para cultivos que se desarrollan bajo condiciones de clima estándar, no obstante, las zonas de estudio no cumplen con esta condición. Bajo las condiciones de estudio la humedad mínima diaria del periodo de máxima cobertura varía entre 20 y 35%, mientras que el estándar es 45%. La corrección se realizó desde el día en que se alcanzó el valor de Kcb medio. Para ajustar estos valores al clima local se usó la ecuación 10.

$$Kcbaj = Kcb + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{a}{3}\right)^{0,3} \quad (\text{Ec. 10})$$

Ecuación 10. Donde Kcaj corresponde al coeficiente de cultivo ajustado, Kcb al valor de Kcb tabulado, u_2 es el valor medio diario de la velocidad del viento a 2 m de altura ($m \cdot s^{-1}$), HR_{min} es el valor medio diario de humedad relativa mínima en % y a es la altura del parrón, que se estimó en dos metros.

Corrección por cobertura del coeficiente basal del cultivo (Kcb). Para representar correctamente la condición vegetacional de los parrones, se realizó una corrección al valor de Kcb ajustado por clima desde el momento en que el índice de área foliar fue inferior a 3, en la etapa final. Para lo anterior se utilizó la ecuación 11 y los valores de IAF estimados con el modelo predictivo en la ecuación 12.

$$Kcbaj = Kcmin + Kd(Kcbfull - Kcmin) \quad (\text{Ec. 11})$$

$$Kd = (1 - \exp(-0,7 \text{ IAF})) \quad (\text{Ec. 12})$$

Ecuaciones 11 y 12. Donde, Kcbaj es el valor del coeficiente de cultivo ajustado, Kcbfull es el valor de Kcb corregido para condiciones climáticas no estándar, Kcmin es el valor mínimo de Kc para suelo descubierto e IAF expresada en $m^2 m^{-2}$.

Estimación del coeficiente único y coeficiente basal del cultivo por medio de relaciones empíricas. Para esta estimación se seleccionaron las ecuaciones empíricas del Cuadro 2, que, de acuerdo con su origen, se pueden diferenciar como específicas para la producción de uva de mesa o de carácter general. Los detalles de las ecuaciones se pueden ver en: (Williams *et al.*, 2003; Allen *et al.*, 2006; Netzer *et al.*, 2008; Selles *et al.*, 2012; Er-Raki *et al.*, 2013 y Pocas *et al.*, 2015, Balbontín *et al.*, 2017).

Cuadro 2. Relaciones empíricas utilizadas en estimación de Kc y Kcb.

Coeficiente	Abreviatura	Predictor	Método estimación	Uso
Basal (Kcb)	Kcb1	IAF	Biofísico	General
Basal (Kcb)	Kcb2	NDVI	Teledetección	General
Único (Kc)	Kc1	IAF	Lisímetro	Uva de mesa
Único (Kc)	Kc2	FI	Lisímetro	Uva de mesa
Único (Kc)	Kc3	NDVI	Teledetección	General
Único (Kc)	Kc4	IAF	Lisímetro	General
Único (Kc)	Kc5	NDVI	Teledetección	General

Determinación de la evapotranspiración del parrón (ETc)

Para cada parrón bajo estudio se estimó el agua potencialmente evapotranspirada (ETc) a escala diaria, por medio de la Ecuación 8, durante el periodo comprendido entre el primer riego y abril del año siguiente. La evapotranspiración estimada con relaciones empíricas se calculó bajo la metodología de Kc multiplicado por ETO acumulada entre dos riegos. Fue hecho de esta forma para comparar los volúmenes de agua predichos con los realmente regados.

La evapotranspiración mediante el uso de sensores de humedad de suelo FDR fue estimada bajo los siguientes supuestos.

- a) La actividad de raíces se concentra en los 60 cm de profundidad, por lo tanto, el agua aportada como riego debe mantener un contenido de humedad adecuado a esta profundidad, además, el contenido de agua en el horizonte de 80 cm no debe exceder el valor de capacidad de campo registrado con los sensores de humedad FDR.
- b) Si durante el riego la condición (a) no se cumple, el volumen de agua que exceda de los 80 cm es descontado de la evapotranspiración.
- c) El volumen de agua aportado entre dos riegos bajo el supuesto (a), es evapotranspirada por la planta entre dos riegos consecutivos.

Estimación del balance hídrico y volumen de percolación

Para este cálculo se asumió como agua de drenaje el volumen que excede los 80 cm dentro del perfil. Para esta estimación se siguió el siguiente procedimiento:

- a) En invierno, y después de una lluvia o riego abundante, se detectó el contenido de humedad medido por el sensor en el horizonte de 80 cm que igualara el contenido de agua más alto registrado después de un riego abundante durante el verano. Transcurridas 24 horas de drenaje libre, este valor fue asumido como capacidad de campo.
- b) El volumen de humedecimiento del perfil se consideró como un prisma rectangular, donde el ancho de humedecimiento está dado por el área humedecida por las líneas de goteros, la profundidad del último sensor, y la longitud de una hilera, que para la estimación es de cien metros.
- c) El volumen de drenaje, estimado posterior a un riego a la profundidad del último sensor, se obtiene como la diferencia entre el valor máximo alcanzado a esta profundidad y el valor de capacidad de campo de la estrata.

Análisis estadístico

Los datos de índices de vegetación se relacionaron con IAF mediante regresión exponencial, mientras que con la FI se relacionó mediante una regresión lineal simple. El índice de vegetación más adecuado se seleccionó de acuerdo con el menor error, R^2 , RMSE, MAE y PBIAS.

Los datos de IAF estimado por ceptómetro se relacionaron con IAF real mediante una regresión lineal simple verificando los supuestos de la regresión. Este procedimiento también se realizó con la estimación de FI por ceptómetro y fotografías del suelo.

Para la clasificación de las imágenes en la estimación de FI por medio de fotografías y para la generación de cluster de diagnóstico se aplicó la técnica de estadística K-Means a través del método "Lloyd".

RESULTADOS

Caracterización de las zonas de estudio

Caracterización climática

La localidad de Vicuña (IV R) presentó, durante la temporada 2019-2020, una demanda atmosférica de 1.231 mm entre los meses de septiembre y mayo. San Felipe (V R) y Calera de Tango (RM) muestran una demanda menor equivalente a 860 y 920 mm, respectivamente, mientras que en San Vicente de Tagua Tagua (VI R) se registraron 1.153 mm. La Figura 2 muestra la evolución anual de la ETo, indicando que los valores registrados en San Vicente de Taguatagua (VI R) son similares a los registrados en Vicuña. Los datos obtenidos de las estaciones El Arenal y Jean Buchanan, también ubicadas en San Vicente de Tagua Tagua ratifican la magnitud del valor de ETo registrando 1.124 y 970 mm para el mismo periodo.



Figura 2. Evapotranspiración de referencia (ETo) de las áreas de estudio para la temporada 2019-2020.

Caracterización de suelos

Los cuarteles C4 y C9 se ubican sobre la serie de suelo Vicuña, la que según CIREN (1996), es miembro de la familia limosa fina, sobre arenosa esquetal, mixta, de los Typic Haplocambidibs (Aridisol). Posee texturas dominantes francas finas, pero descansa sobre un sustrato pedregoso de matriz gruesa. En tanto las parcelas M1, A1 y T1 se encuentran sobre la Serie Curimón, de familia limosa fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxeroll. Las parcelas THH y THS se encuentran en la Serie Maipo de familia franca fina, mixta de los Fluventic haploxeroll. Finalmente, las parcelas SL21 y FRU7 pertenecen a la Serie Laguna de San Vicente, que de acuerdo con CIREN (2002) es miembro de la familia limosa fina, mixta, térmica de los oxaquic Calcixerolls (Mollisol). Suelos de origen lacustre, moderadamente profundos, de alta fertilidad.

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de la distribución del tamaño de partículas y la clasificación en base a USDA. Se acompaña del valor del contenido volumétrico (%) en capacidad de campo y saturación obtenidos con la herramienta SPAW Hidrology (USDA).

Cuadro 3. Distribución de tamaño de partículas, clase textural y contenido de humedad.

Parcela	Textura			Clase Textural	Contenido volumétrico	
	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)		CC (%)	SAT (%)
C4	29,9	27,2	42,8	FA	31,9	45,5
C9	19,6	26,1	54,3	Fa-FAa	25,3	44,5
M1	25,8	32,2	42,0	F	29,6	45,7
A1	27,3	27,5	48,2	FAa	31,2	45,2
T1	25,3	26,5	48,2	FAa-FA	28,7	44,9
THH	37,4	32,6	30,0	FA	36,6	47,8
THS	34,1	37,6	28,4	FA	35,6	48,3
SL21	36,4	43,0	20,6	FA-FAL	37,3	49,5
FRU7	31,5	38,1	30,4	FA	34,2	47,5

A partir de lo observado en el Cuadro 3, se destaca que los ocho predios se encuentran en el límite de la clase textural F y FA, sin embargo, se evidencia la existencia de dos grupos con alta homogeneidad interna. El primero conformado por C4, C9, M1, A1 y T1 con mayor predominancia de arena y el segundo por THH, THS, SL21 y FRU7 con mayor predominancia de arcilla.

Evaluación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) obtenida desde estaciones meteorológicas

Los métodos de estimación de la evapotranspiración mostraron un alto ajuste respecto a la evapotranspiración de referencia calculada por el método estándar Penman-Monteith Allen *et al.* (2006) (cuadro 4). El método Priestley-Taylor mostró menor error en la estimación de la ET_o en todas las localidades estudiadas con valores de RMSE entre 0,41 y 0,93 mm, y PBIAS entre -0,96 y 13,03 %. Los resultados del Cuadro 4, indican que el método de Hargreaves-Samani sobreestima la ET_o en las tres comunas, mientras que Priestley-Taylor lo subestima ligeramente. El método de Penman, que estima la evaporación desde una superficie de agua libre, entrega valores 50% superiores a la ET_o estimada por Penman-Monteith, lo que resulta esperable ya que en esta ecuación no se incorporan factores de ajuste que representen la resistencia estomática de las hojas.

Cuadro 4. Estadígrafos entre ETo obtenida por Penman-Montheith, Hargreaves-Samani Priestley-Taylor y evaporación por Penman.

Comuna	Método	RMSE	PBIAS	MAE	R ²
Vicuña	Penman	2,31	52,73	2,27	0,95
	Hargreaves	0,93	18,85	0,83	0,89
	Prestley	0,5	-2,32	0,39	0,81
Calera de Tango	Penman	2,16	56,5	2,11	0,97
	Hargreaves	0,96	12,37	0,75	0,93
	Prestley	0,41	-0,96	0,33	0,96
San Vicente de Tagua Tagua	Penman	2,05	46,94	1,98	0,97
	Hargreaves	1,23	23,30	1,00	0,84
	Prestley	0,93	-13,03	0,71	0,90

Para el periodo de una temporada de riego, el método de estimación de Priestley-Taylor subestimó la ETo en 44 mm en Vicuña, 25 mm en Calera de Tango y 157 mm en San Vicente de Taguatagua respecto al método estándar de Penman-Montheith, mientras que el método de Hargreaves-Samani sobreestimó en 178, 305 y 225 mm respectivamente. Los valores de ETO (Penman-Montheith), registrados por las estaciones meteorológicas de Vicuña y Calera de Tango se encuentran dentro del rango esperado de acuerdo con las zonas geográficas donde se ubican. Sin Embargo, la estación El Tambo (San Vicente de Taguatagua) entrega valores incluso más altos que en Vicuña, de forma similar a las dos estaciones más cercanas (Jean Buchanan y El Arenal). El análisis de las variables climáticas involucradas en el cálculo de la ETo indicó que el comportamiento de la radiación incidente sigue el patrón esperable para cada localidad, mientras que el DPV en la estación El Tambo mostró valores más altos durante el periodo de máxima demanda (diciembre a febrero). La velocidad del viento registrada también fue superior en la estación El Tambo, registrando velocidades del viento superior a 2 m·s⁻¹.

Cuadro 5. Evapotranspiración de referencia (ETo) estimada mediante Penman-Montheith, Hargreaves-Samani y Priestley-Taylor. Evaporación desde una superficie de agua estimada mediante Penman.

Comuna	Método	Volumen de agua (mm)
Vicuña	Penman-Montheith	1.104
	Penman	1.658
	Hargreaves	1.168
	Prestley	1.061
Calera de Tango	Penman-Montheith	964
	Penman	1.480
	Hargreaves	830
	Prestley	939
San Vicente de Taguatagua	Penman-Montheith	1.102
	Penman	1.595
	Hargreaves	838
	Prestley	945

Estimación del índice de área foliar (IAF) y fracción de radiación PAR interceptada (FI) por medio de técnicas satelitales y de terreno

Modelo predictivo de IAF y FI con evaluaciones de ceptómetro

De los índices de vegetación estudiados como predictores de IAF y FI, el que mostró mejores ajustes fue SAVI (Cuadro 6).

Cuadro 6. Valor de estadígrafos entre datos de terreno FI-IAF e índices espectrales de vegetación.

Índice	Estadígrafo	NDVI	SAVI	NDVIGreen	SAVIGreen	GNDVI
IAF	R ²	0,51	0,81	0,44	0,42	0,17
	RMSE	1,10	0,65	1,10	1,13	1,25
	MAE	0,81	0,44	0,8	0,79	0,95
	PBIAS	-9,26	-1,47	-3,19	-3,03	-5,63
FI	R ²	0,58	0,82	0,52	0,47	0,17
	RMSE	0,06	0,04	0,06	0,06	0,08
	MAE	0,05	0,03	0,05	0,05	0,06
	PBIAS	-0,06	-0,09	-0,03	-0,08	-0,14

Esto se debe a que las curvas de SAVI-IAF y SAVI-FI tuvieron un comportamiento similar, algo característico en coberturas vegetales uniformes. SAVI se mostró como un índice adecuado al permitir observar el comportamiento teórico exponencial de IAF que aumenta levemente al exceder un umbral del IV. En cuanto a la FI, mostró que cuantifica adecuadamente la cantidad de vegetación eliminando el ruido causado por el suelo (figura 3). Esto permitió obtener una regresión entre SAVI-IAF y SAVI-FI de forma exitosa puesto que el ajuste entre los datos fue satisfactorio, presentándose un coeficiente de determinación de 0,81 para el IAF y un 0,82 en FI, además con un error de predicción (RMSE) de 0,65 en IAF y 0,04 en FI.

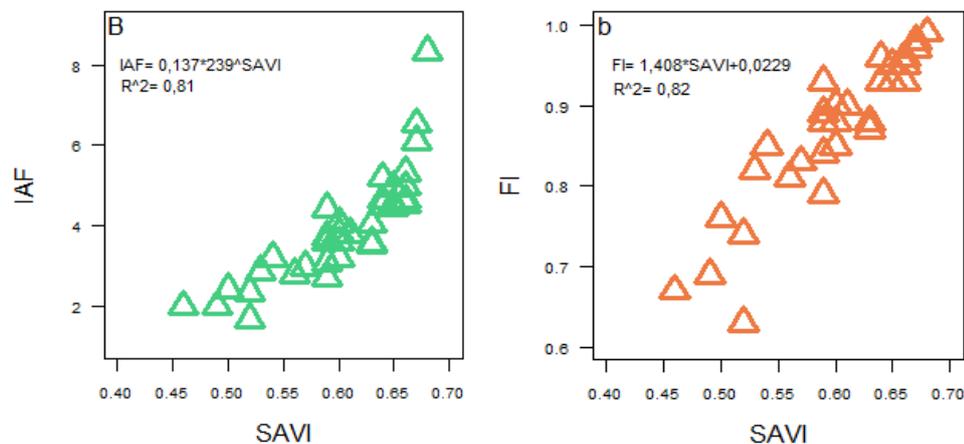


Figura 3. Curva de regresión exponencial entre SAVI-IAF (izquierda) y curva de regresión lineal entre SAVI-FI (derecha).

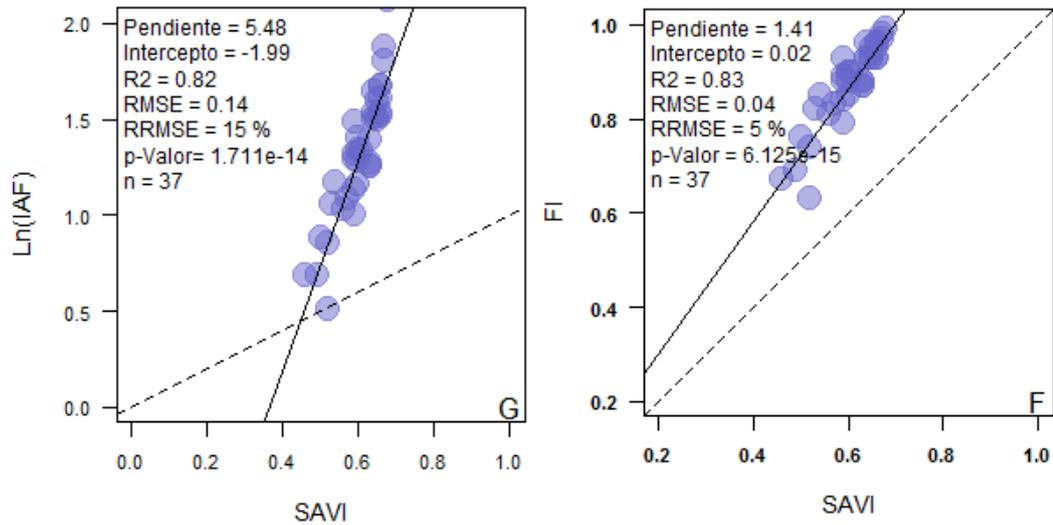


Figura 4. Linealización logarítmica del modelo de predicción de IAF (izquierda) y modelo de predicción lineal de FI (derecha).

Estimación de IAF por medio de relación de peso foliar

Las hojas colectadas en los puntos de muestreo de los huertos C4, C9, A1, THH, THS, SL21 y FRU7 se usaron para generar modelos de regresión entre peso y área foliar individualmente, resultando todos estadísticamente significativos y con valores de R^2 cercanos a 1. Por esta razón, se tomó la decisión de evaluar un único modelo de regresión lineal que considerara los datos provenientes de todas las hojas. Se consideró un escalamiento de los datos originales dada la relación prácticamente 1:1 entre el peso y la superficie de las hojas. La Figura 5a, muestra el modelo predictivo de área foliar obtenido.

Los valores del peso foliar registrados en los puntos de muestreo fueron convertidos a IAF al dividir el área foliar resultante por el área de la superficie de muestreo. Estos resultados fueron comparados con el IAF estimado mediante ceptómetro en el mismo punto (figuras 5b, 5c y 5d). La validación fue satisfactoria para los puntos evaluados en los cuarteles C4, C9, A1 y T1, donde el error estimado es cercano al 13 y 14 % con R^2 de 0,81 y 0,67.

Cuadro 7. Valor de estadígrafos entre el área foliar estimada mediante ceptómetro y modelo de predicción basado en el peso de las hojas.

Estadígrafo	C4 y C9	A1 y T1
R^2	0,81	0,67
RMSE	0,56	0,24
MAE	0,42	0,19
RRMSE %	13,12	14,78

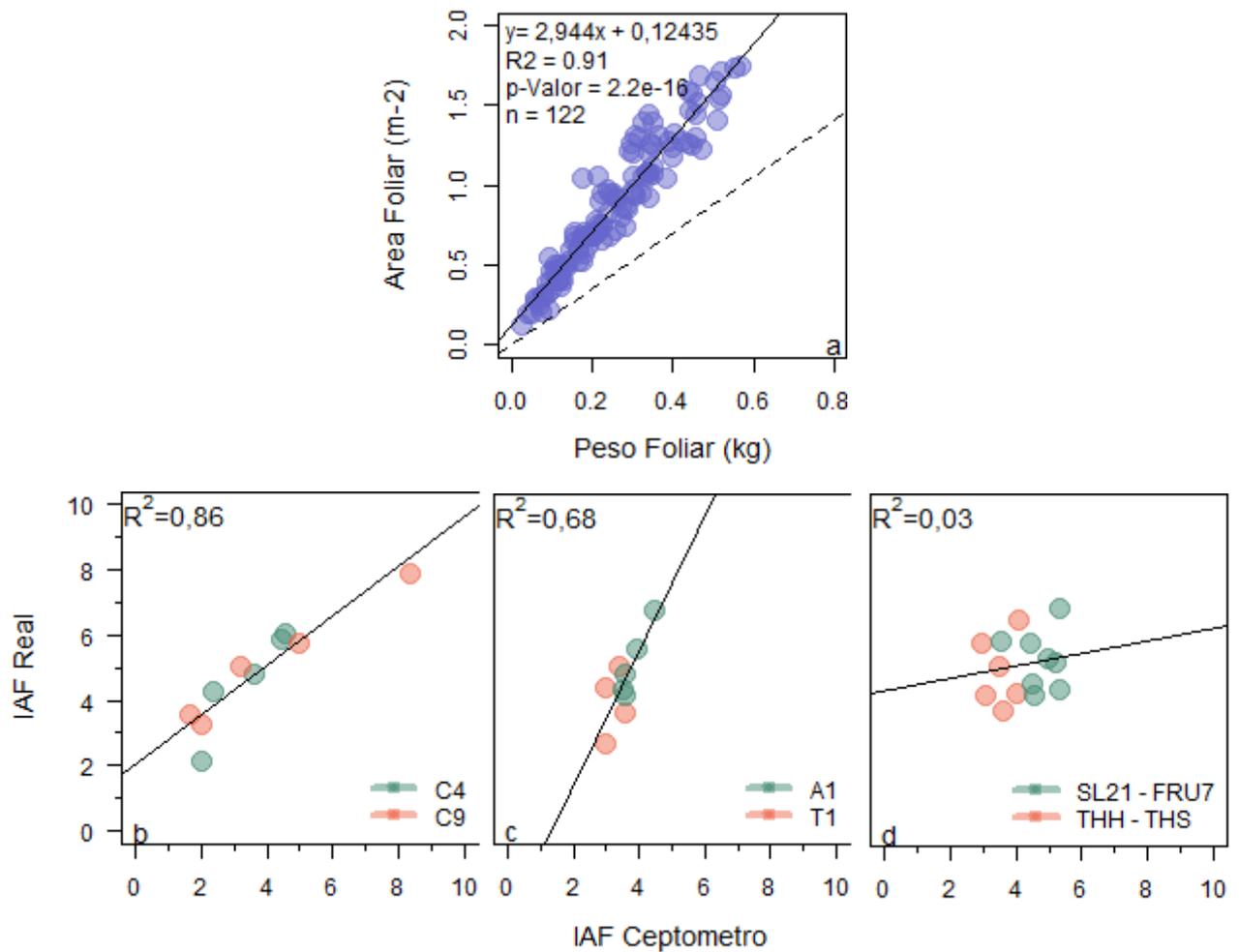


Figura 5. Modelo de predicción de área foliar (a), resultado de validación en cuartel C4 y C9 (b), resultado de validación en cuartel A1 y T1.

Estimación de fracción de cobertura (FC) por medio de fotografías de suelo

Se obtuvo una regresión estadísticamente significativa entre la FI estimada mediante ceptómetro y estimada por fotografías con un R^2 de 0,79. La Figura 6 muestra el procesamiento fotográfico y el modelo de predicción.

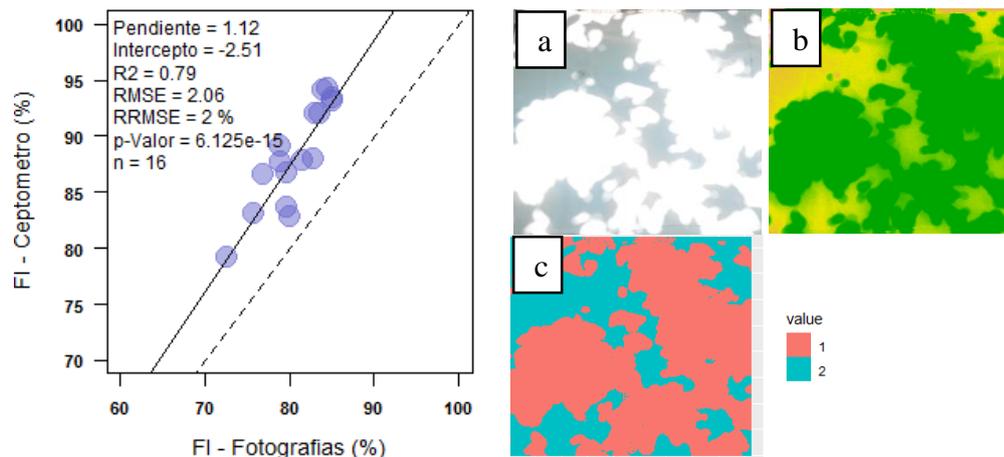


Figura 6. Modelo de regresión lineal entre FI estimada mediante fotografías del suelo y FI estimada mediante ceptómetro. Fotografía tomada al suelo bajo el parrón (a). Fotografía procesada con el software estadístico R studio en formato raster (b). Procesamiento de clasificación de la fotografía en dos clases, 1 luz, 2 sombra (c).

Los valores encontrados indican que la estimación del porcentaje de suelo sombreado hecha con el ceptómetro lineal ACUPPAR LP-80 entrega valores superiores respecto de la estimación a través de fotografías. Es decir, la evaluaciones realizadas con ceptómetro tienen mayor probabilidad de sobrestimar la cantidad de sombra de una cubierta vegetal respecto a las fotografías, esto se debe a que los sensores del ceptómetro se ubican a 10 cm uno de otro, lo que generó un área de estimación igual a 250 cm² para este trabajo, mientras que en las fotografías del suelo el área de estimación fue menor a 1 cm².

Evolución del índice de área foliar (IAF) y fracción de interceptación (FI)

Los modelos predictivos permitieron obtener la evolución temporal de IAF y FI de los parrones para la temporada de 2019-2020. La escala temporal, en el eje x, está representada en días grado (DG°) en base 10°C, iniciando el conteo desde la brotación, que fue estimada como la fecha en que la tendencia del índice de vegetación NDVI cambió positivamente al inicio de la temporada. En la Figura 7, se aprecia que solo los parrones M1 y THS presentan valores de IAF inferiores a 3 a lo largo de la temporada. El parrón THH alcanza un IAF máximo de 4, que no es constante y decae rápidamente. Los parrones SL21 y FRU7 son los más jóvenes y alcanzan los valores de IAF más altos, cercanos a 7. Los valores altos y bajos de IAF mostrados en la Figura 7, se correlacionaron directamente con los valores de FI. Todos los parrones a excepción de M1 y THH mostraron un comportamiento similar, superando el umbral de cobertura completa de suelo descrito en FAO 56. El máximo valor de IAF y FI alcanzado para prácticamente todos los casos se logra cuando se acumulan 600 DG°, lo que equivale aproximadamente a la primera semana de diciembre en Vicuña, San Felipe y Rinconada (C4, C9, M1, A1, T1) y a la última semana de diciembre en Calera de Tango y San Vicente de Tagua Tagua (THH, THS, SL21 y FRU7). El periodo de tiempo que la cobertura vegetal se mantiene

sobre 75% de FI varía entre 600 y 900 DG° mostrándose una diferencia entre variedades rojas como Perlón (C4 y C9) y Red Globe (M1) con variedades verdes como Thompson Seedless (T1, THH y THS) y Arra 15 (A1). SL21 y FRU7 no siguen la misma tendencia de las variedades rojas. En la Figura 8 Apéndice 4 se muestran los predios en el momento de máxima cobertura vegetal medido como IAF, donde se puede apreciar que todos presentan valores superiores a 3, pero difieren en la cantidad de superficie con valores de IAF superiores a 5. A1, SL21 y FRU7 son los predios con IAF más alto y uniforme.

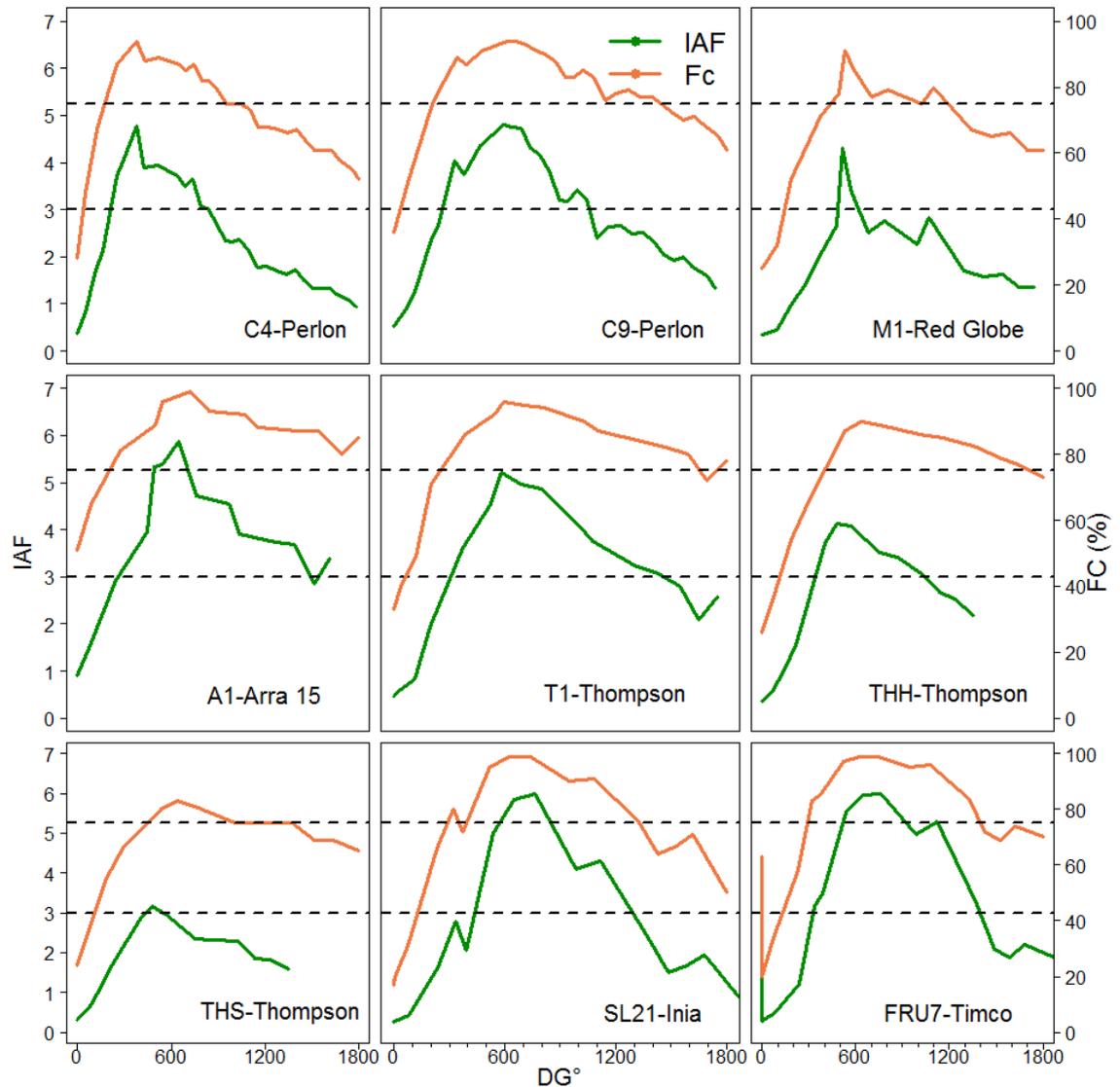
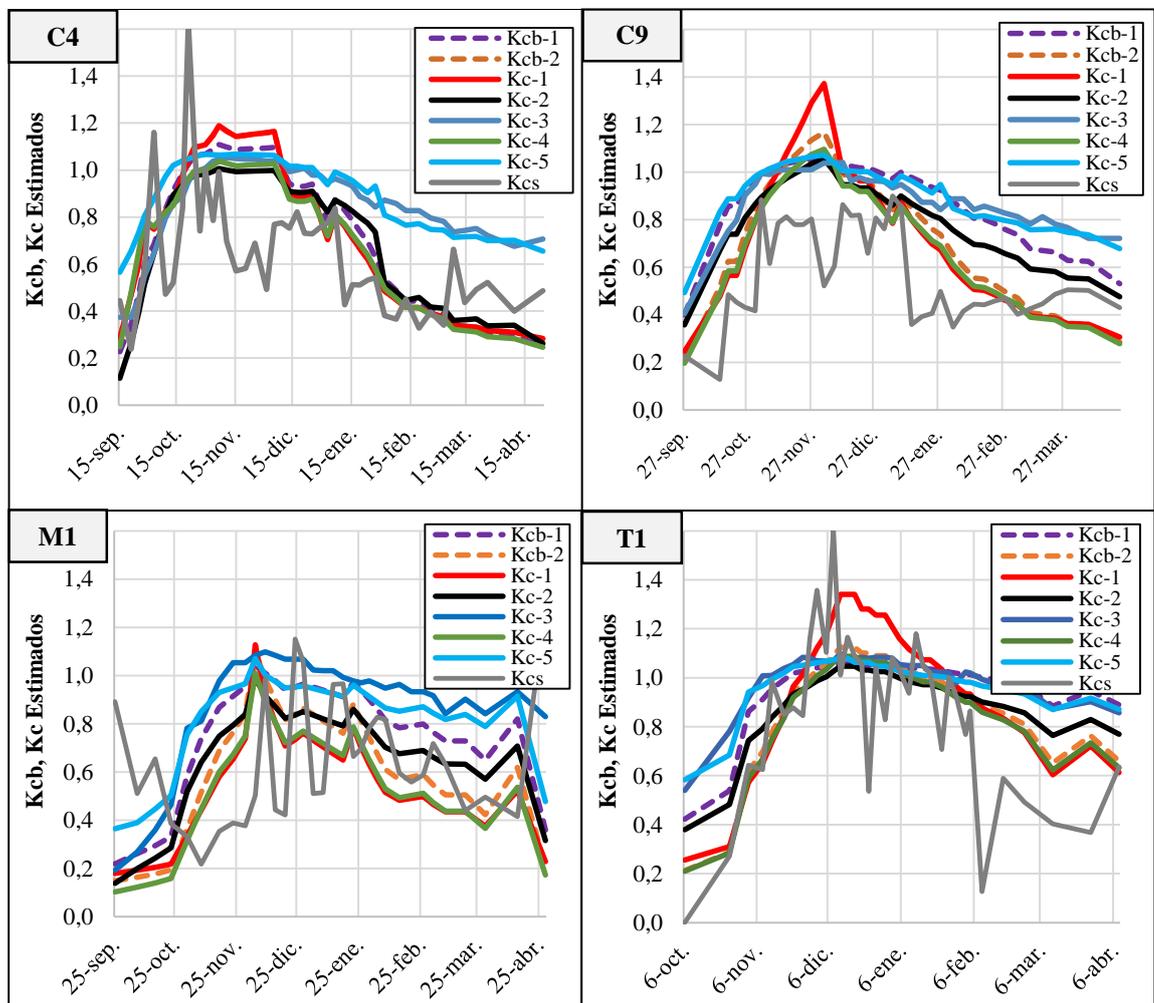


Figura 7. Evolución del Índice de Área Foliar (IAF) y la Fracción de Cobertura del follaje (FC) en función de los días grado (DG°) acumulados desde la brotación.

Estimación del coeficiente del cultivo y volúmenes de riego mediante relaciones empíricas

Las ecuaciones empíricas basadas en IAF (Kcb-1, Cuadro 2) y en índices de vegetación (Kc-3 y Kc-5; Cuadro 2) entregaron los valores de Kcb y Kc más altos al inicio y final de la temporada, oscilando entre 0,6 y 0,8 dependiendo del follaje del parrón (figuras 9 y 10). Este comportamiento no lo presenta Kcb-2 (Cuadro 2) a pesar de ser estimado mediante índices espectrales de vegetación (IV) ya que a diferencia de los anteriores incorpora un coeficiente de densidad basado en IAF en su cálculo. La ecuación de Kc-1, basada en IAF arroja los valores más altos durante el periodo de máxima cobertura en los parrones de mayor vigor (C4, C9, T1, A1, FRU7 y SL21), esto coincide cuando el IAF excede de 4, alcanzándose valores de Kc superiores a 1,4. Estos resultados difieren con los de Kc-4, obtenido también por IAF. Esta diferencia probablemente es debida a que Kc-4 se obtuvo en un parrón con mayor volumen foliar que Kc-1 (Netzer *et al.*, 2008).

El método basado en FI (Kc-2; cuadro 2) mostró valores superiores a los basados en IAF, y una menor sensibilidad a la disminución del follaje hacia el final de la temporada. Lo anterior se relaciona con el ordenamiento de las hojas del parrón y concuerda con lo expuesto por Williams y Ayars (2005) donde un determinado IAF puede ordenarse de distintas formas y modificar la fracción de interceptación de luz. En tanto, los valores de Kc a partir del riego real (Kcs) muestran que existen criterios de riego diversos que se reflejan en la distribución del agua. Los Parrones C4, C9, M1, T1, A1 y SL21 siguen un patrón de riego similar al estimado por las ecuaciones. Mientras que THH, THS y FRU7 muestran valores más altos de Kc y más tarde en la temporada.



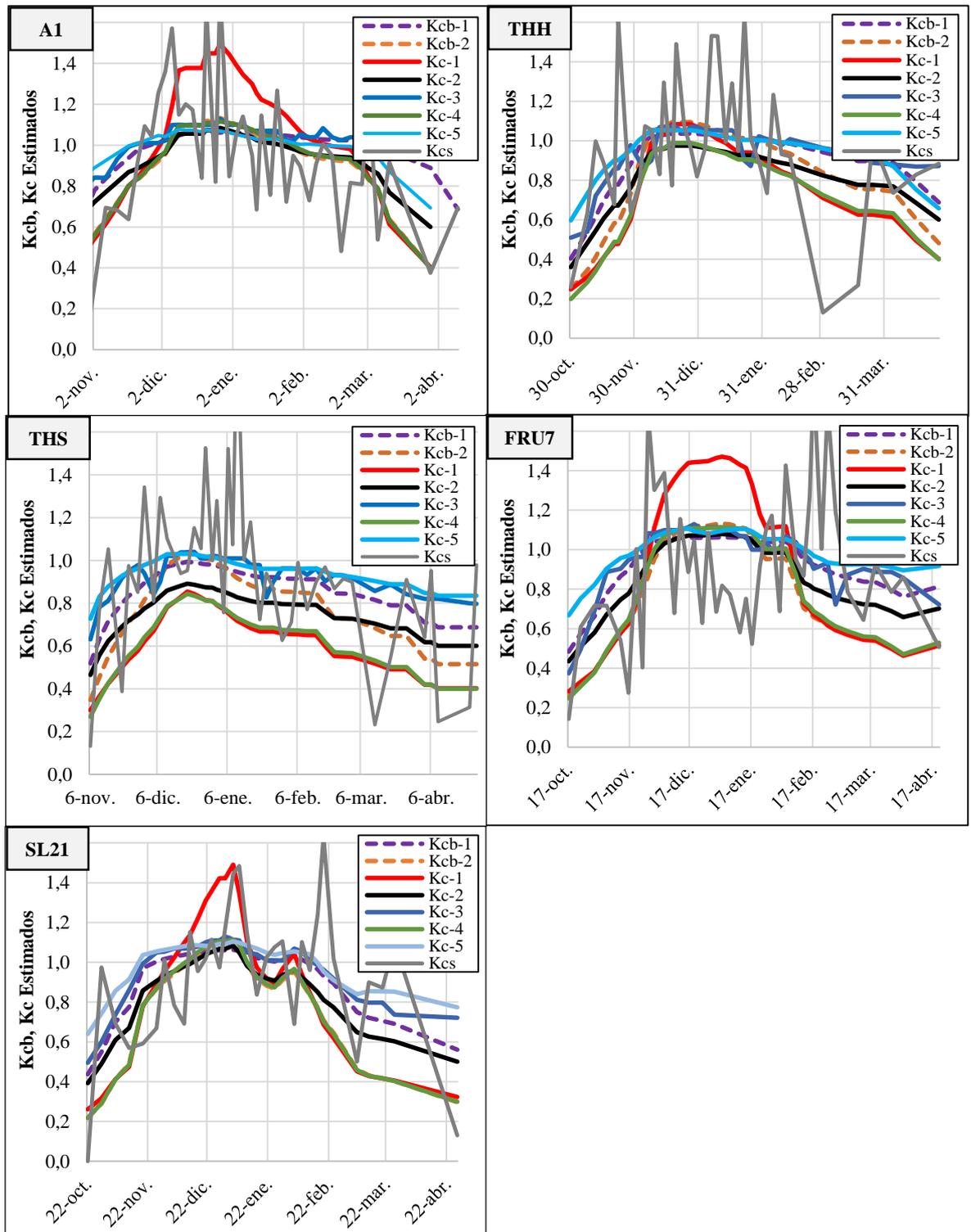


Figura 8. Kcb y Kc obtenidos a partir de ecuaciones empíricas con datos de NDVI, IAF y FI de acuerdo con los autores mostrados en el Cuadro 2.

A partir de los Kc obtenidos por medio de las ecuaciones empíricas y el Kc dual estimado de acuerdo con FAO 56, se estimaron los volúmenes de riego necesarios para satisfacer el 100% de la ETC en la temporada 2019-2020 (Cuadro 8). Los resultados indican que los Kc provenientes de imágenes satelitales Kcb-1, Kc-3 y Kc-5 sobreestiman en un 14,42%, 20,1% y 21,1% respectivamente las estimaciones de riego si se compara con la ETC.

Cuadro 8. Proyecciones de riego generados mediante Kc de relaciones empíricas detallados en Cuadro 2. ETo (mm) es la suma de evapotranspiración de referencia entre brotación y 30 de abril del año siguiente y Riego es el agua total aportada durante el mismo periodo (mm).

Cuartel	Proyecciones de riego (mm)								Riego	ETo
	Kcb-1	Kcb-2	Kc-1	Kc-2	Kc-3	Kc-4	Kc-5	Kc-dual		
C4	995	762	765	741	926	727	958	817	646	1.070
C9	898	743	737	808	901	703	922	748	589	1.032
M1	621	502	445	541	711	440	669	560	487	798
T1	658	602	631	607	667	585	657	625	577	662
A1	646	585	660	605	669	587	645	607	592	652
THH	754	684	620	677	780	599	795	638	665	869
THS	656	585	458	574	707	462	731	534	595	796
SL21	807	672	737	742	852	675	878	697	781	897
FRU7	903	751	868	839	908	763	976	764	790	1.009

Dejando a un lado los métodos anteriores, se observa que al expresar las estimaciones de riego respecto de la ETO surgen cuatro grupos de parrones (Cuadro 9). En el primero, T1 y A1 obtienen las proyecciones más altas con Kc-1, Kc-2, Kc-4 y Kc dual, seguidos de los parrones SL21 y FRU7. En el tercer grupo se encuentran C4, C9 y THH, y en un cuarto grupo con las menores proyecciones los parrones M1 y THS.

Cuadro 9. Proyecciones de riego para la temporada estimadas mediante Kc de relaciones empíricas, expresadas en porcentaje respecto a ETo.

Cuartel	Riego proyectado respecto ETo (%)								Riego	ETo
	Kcb-1	Kcb-2	Kc-1	Kc-2	Kc-3	Kc-4	Kc-5	Kc-dual		
C4	93	71	71	69	87	68	90	76	60	1.070
C9	87	72	71	78	87	68	89	72	57	1.032
M1	78	63	56	68	89	55	84	70	62	798
T1	99	91	95	92	101	88	99	94	87	662
A1	99	90	101	93	103	90	99	93	91	653
THH	87	79	71	78	90	69	91	73	77	869
THS	82	73	58	72	89	58	92	67	75	796
SL21	90	75	82	83	95	75	98	78	87	897
FRU7	89	74	86	83	90	76	97	76	78	1.009

Estimación de Kcs y componentes del balance hidrológico mediante modelación del coeficiente de cultivo dual y sondas de capacitancia FDR

El análisis de las bases de datos provenientes de los sensores de humedad de suelo mostró la existencia de dos grupos claramente diferenciados en base al criterio de riego. El primero de ellos está conformado por los parrones M1, A1, T1, THH, THS, SL21 y FRU7, mientras que el grupo 2 está formado por los parrones C4 y C9. Entre los parrones del grupo 1 existe gran variabilidad en la programación del riego y el uso de los sensores de humedad en la generación de Líneas de Gestión. El grupo 2 se caracterizó por un criterio de riego constante en el tiempo, y por esta razón se analizaron tres temporadas de riego

consecutivas 2019-2020, 2020-2021 y 2021-2022. Las estimaciones para ambos grupos comenzaron el día siguiente al primer riego después de la brotación (estimada como un incremento en el índice de vegetación NDVI) y se extendieron hasta el último riego de abril.

Grupo 1

Para estos parrones solo se analizó la temporada 2019-2020. Los resultados de ETC máxima por el método del Kc dual concuerdan con las figuras 9 y 10, ya que valores más altos están relacionados a una mayor masa foliar que transpira. La evaporación máxima, por lo tanto, siguió un comportamiento opuesto, alcanzando valores mayores en parronales con menor masa foliar. A inicio de la temporada el coeficiente de evaporación (Ke) osciló entre 0,27 y 0,35 lo que generó un valor de Kc entre 0,31 y 0,46. Los valores máximos de Kcb posterior a realizar el ajuste por clima oscilaron entre 0,86 y 0,91 mientras que el Ke mostraba valores cercanos a cero.

El manejo del riego varió entre los distintos parrones, tanto en tiempo como en frecuencia lo que generó dos condiciones opuestas de humedad en el perfil de suelo durante todo el ciclo de riego. Los parrones M1, A1, T1 y FRU7 muestran un patrón regular en los aportes de riego, permitiendo el agotamiento de una fracción de la humedad del perfil (figuras 13; 15; 17 y 25, Apéndice 3). En M1 se requieren 15 mm de riego (7 hr) para elevar el contenido de humedad de 50% a 52% a los 60 cm de profundidad, volviendo a contenidos similares en todo el perfil después de un ciclo de extracción de 4 días (Figura 13, Apéndice 3). En A1, T1 y FRU7 se observa un mayor incremento de humedad a los 80 cm después del riego, esto indica que existe mayor actividad de raíces en todas las profundidades pues estas extraen el agua que posteriormente se repone en un riego (figuras 15; 17 y 25, Apéndice 5).

Por el contrario, los parronales THH, THS y SL21 en las figuras 19; 21 y 23 del Apéndice 3 reflejan un manejo menos regular. En THH el contenido de humedad incrementa desde la brotación hasta el final de la temporada debido a riegos de alta frecuencia y duración variable (Figura 19, Apéndice 3). Similarmente, en SL21 el contenido de agua en el perfil aumenta gradualmente, mientras que la disminución de agua en el ciclo entre riegos disminuye leve y mayoritariamente en la profundidad de 70 y 80 cm. Cuando los ciclos de riego se comienzan a distanciar al final de la temporada, la disminución del contenido de agua asociado al consumo de la vid se trasladó a los 40 cm de profundidad (figuras 22 y 21, Apéndice 3). En THS se registraron riegos de igual frecuencia pero de mayor duración, lo que generó un aumento sostenido de la humedad del suelo hasta febrero, manteniendo el suelo hasta los 80 cm con un contenido de humedad cercano a capacidad de campo durante todo el periodo estudiado. Durante un riego regular de 16 mm el agua demoró 2 horas en alcanzar los 1,6 m y transcurridas las 10 horas se registró un incremento de 60%. A una profundidad de 80 cm el contenido de agua alcanza su valor máximo a las 2 horas después de haber comenzado el riego y 1 día posterior al riego el contenido de agua en todo el perfil disminuye levemente (Figura 21, Apéndice 3).

Respecto al balance hídrico (Cuadro 10), M1 percoló el 2,6% del riego, esto se consiguió manteniendo una frecuencia y tiempo de riego adecuada (figuras 12 y 13 Apéndice 3). A1 y T1 percolaron 5 y 6% del riego, mientras que THS y FRU7 mostraron la eficiencia más baja puesto que la percolación corresponde a un 27 y 17% del riego total respectivamente.

Cuadro10. Componentes del balance hídrico para los predios evaluados en la temporada 2019-2020.

Cuartel	Entrada		Salida		
	Riego	Transpiración	Evaporación	Percolación Estimada	Percolación Teórica
M1	573,3	461,4	101,2	15,4	10,7
A1	605,1	623,1	54,0	34,3	-72,0
T1	557,4	634,2	62,6	35,0	-139,4
THH	709,6	568,0	69,0	47,1	72,6
THS	614,2	435,5	89,2	166,7	89,5
SL21	718,7	646,0	75,2	31,4	-2,5
FRU7	789,3	648,3	56,0	132,8	85,0

Grupo 2

Tanto en C4 como en C9 el manejo del riego se rige por las líneas de gestión validadas para cada caso de acuerdo con la metodología detallada en Callejas *et al.*, (2014b). Al inicio de la temporada se busca elevar el contenido volumétrico del agua del suelo a capacidad de campo del perfil del suelo hasta los 60 cm, permitiendo favorecer la disponibilidad de agua fácilmente extraíble por la planta, así como una adecuada oxigenación del suelo (figuras 26 y 30, Apéndice 3).

Al analizar el balance hídrico de la temporada 2019-2020 (Cuadro 11), los resultados reflejan una diferencia en la percolación de agua de cada cuartel, estimándose en 7,3% respecto al agua de riego en C4 y 2,2% en C9. Se encontraron diferencias en la evapotranspiración potencial con valores de 819 y 740 mm en C4 y C9 respectivamente, mientras que el agua de riego fue 646 y 589 mm. La temporada 2020-2021 (Cuadro 11) se registraron volúmenes similares de percolación y riego en ambos cuarteles. En C4, la transpiración potencial se estimó con un valor más similar a la estimada para la temporada anterior respecto del riego real, mientras que en C9 se mantuvo similar.

Para C4, el contenido de agua en el suelo durante las dos temporadas se mantuvo dentro de rangos similares definidos por las líneas de gestión que demarcan el contenido máximo y mínimo de agua en los 80 cm del perfil (figuras 27 y 28, Apéndice 3). Bajo este criterio de riego, el contenido de agua a los 20; 40; 60 y 80 cm de profundidad tarda aproximadamente cuatro días en disminuir a valores similares a los registrados previamente al riego (Figura 29, Apéndice 3), esto estaría indicando sincronía entre el tiempo y frecuencia de riego. De forma similar a C4, en C9 se mantiene un rango de humedad relativamente constante antes de iniciar los riegos, y estos no superan el contenido máximo de humedad permitido como criterio por las Líneas de Gestión (figuras 30 y 31, Apéndice 3). La distribución de los riegos durante la temporada 2019-2020, en ambos cuarteles, fue similar a la transpiración potencial estimada a través del Kcb ajustado a la condición del follaje (figuras 34 y 35, Apéndice 4). Durante 2020-2021 la

disminución de los volúmenes de riego en el cuartel C4 se produjeron posterior a la disminución del follaje, pero esto no significó aumento de los valores de percolación (Figura 36, Apéndice 4).

Cuadro 11. Resumen de componentes del balance hídrico para C4 y C9 obtenidos por modelación del Kc dual y sensor de humedad de suelo.

Variable	Cuartel C4			Cuartel C9		
	Temporada			Temporada		
	2019-2020	2020-2021	2021-2022	2019-2020	2020-2021	2021-2022
Pp anual (mm)	9,1	57,8	8,5	9,1	57,8	8,5
ETO (mm)	1070,4	1044,3	1025,3	1032,3	1031,2	1062,3
ETc (mm)	814,2	728,5	715,1	739,7	756,8	759,8
Riego (mm)	646,4	626,9	587,2	589,5	580,5	640,1
Riego respecto ETc (%)	79,4	80,1	82,1	80,2	70,5	84,2
Transpiración (mm)	698,9	623,8	663,3	659,9	665,3	655,2
Evaporación (mm)	115,3	104,7	121,8	80,0	91,4	104,6
Percolación (mm)	47,7	56,3	52,3	13,2	30,5	23,0
Balance	-215,5	-157,9	-180,2	-163,4	-206,8	-142,7

Los resultados del balance hídrico de la temporada 2021-2022 muestran que los volúmenes de riego aplicados fueron 579 y 640 mm en C4 y C9, mientras que la percolación registrada fue 9 y 3 % del volumen de riego aplicado. Esta disminución en la eficiencia del riego se debe a la mayor frecuencia y volumen de riego de riegos aplicados durante noviembre, pasando de 13 mm cada 4 días a riegos de 16 mm cada 3 días.

Cuadro 12. Resumen de componentes del balance hídrico para C4 obtenidos mensualmente por modelación del Kc dual y sensor de humedad de suelo. T (mm) es la transpiración estimada y E (mm) la evaporación estimada.

Mes	2019-2020				2020-2021				2021-2022			
	Riego	T (mm·mes ⁻¹)	E	%ETo	Riego	T (mm·mes ⁻¹)	E	%ETo	Riego	T (mm·mes ⁻¹)	E	%ETo
Septiembre	27,0	21,6	18,0	39,9	22,1	18,9	11,9	34,9	13,5	14,0	13,3	23
Octubre	118,0	99,9	8,6	89,1	94,5	104,9	11,6	66,2	94,5	89,0	15,5	68
Noviembre	94,0	136,3	4,6	58,0	116,1	130,8	5,8	76,6	129,6	126,8	7,7	85
Diciembre	144,0	149,5	8,1	78,8	124,2	125,9	11,9	72,4	97,2	139,1	9,3	57
Enero	96,0	139,8	13,2	54,9	103,9	103,8	17,5	59,8	78,3	99,5	15,7	47
Febrero	58,5	81,3	25,6	38,6	67,5	70,1	16,6	47,9	67,5	66,0	17,2	49
Marzo	63,0	50,9	24,7	48,8	67,5	46,6	17,3	56,4	59,4	47,9	19,1	47
Abril	36,0	23,5	15,6	46,6	31,0	25,2	13,8	38,5	41,5	22,9	12,1	57
Total (mm)	646	699	115	79	627	624	105	86	587	663	122	82

La distribución mensual de los volúmenes de riego y la estimación de la transpiración (T) muestran valores similares para cada mes en los cuarteles C4 y C9 durante las temporadas 2019-2020 y 2020-2021, además de una sincronía en la evolución de los volúmenes de riego lo que estaría indicando que mediante dos técnicas diferentes se detecta el cambio en la cantidad de follaje y por lo tanto de agua transpirada. Durante la temporada 2021-

2022 la relación es distinta debido a un cambio en el manejo del riego que busca mantener agua fácilmente disponible para la planta.

Este ajuste en el criterio de riego generó que el riego aplicado durante noviembre 2021 igualara a la transpiración máxima estimada por primera vez en todo el ciclo. Un ajuste similar durante el mismo periodo fue observado en C9, lo que generó un aumento en la percolación durante este periodo (Figura 36, Apéndice 6). Los resultados indican que el ajuste al follaje realizado mediante el modelo predictivo de IAF y FC permite estimar con mayor certeza la tendencia de decrecimiento del follaje y con esto del Kcb (Apéndice 6), obteniéndose el Kcb ajustado de las gráficas. Este procedimiento redujo en promedio un 15% la estimación de la transpiración (T) respecto a la estimación empleando los valores de tabla propuestos en el boletín FAO 56.

Cuadro 13. Resumen de componentes del balance hídrico para C9 obtenidos mensualmente por modelación del Kc dual y sensor de humedad de suelo. T (mm) es la transpiración estimada y E (mm) la evaporación estimada.

Mes	2019-2020				2020-2021				2021-2022			
	Riego	T (mm·mes ⁻¹)	E	%ETo	Riego	T (mm·mes ⁻¹)	E	%ETo	Riego	T (mm·mes ⁻¹)	E	%ETo
Septiembre	7,5	6,8	9,1	18,7	16,2	16,8	10,8	27,5	8,1	24,0	24,9	8,7
Octubre	46,5	81,4	14,8	35,2	70,2	100,6	11,2	49,4	66,1	84,7	17,2	47,6
Noviembre	120,0	136,3	3,5	74,1	129,6	130,8	3,6	85,8	153,7	126,8	5,8	101,1
Diciembre	138,0	149,5	3,7	75,8	126,9	146,5	8,0	74,2	116,1	141,9	4,2	67,9
Enero	105,0	132,1	7,9	60,3	85,0	119,7	14,3	49,2	72,9	120,2	11,3	44,2
Febrero	72,0	83,0	14,2	47,7	54,0	77,5	15,2	38,6	84,1	76,8	13,9	61,4
Marzo	60,0	52,2	17,1	46,5	67,5	49,9	16,5	56,7	78,3	55,1	16,1	62,6
Abril	36,0	18,6	9,5	60,0	31,0	23,5	11,7	43,7	33,7	25,8	11,2	45,6
Total (mm)	589	660	80	80	580	665	90	77	640	655	111	84

En el cuartel C9, al alcanzar el estado fenológico de envero se modificó la estrategia de riego permitiendo el agotamiento de un mayor volumen de agua antes de realizar un riego. Esto con el objetivo de controlar el vigor del parrón y generar el color rojo deseado en los racimos para el momento de la cosecha (Conesa *et al.*, 2014; Conesa *et al.*, 2018; Centofanti *et al.*, 2019). Se generaron 2 ciclos de estrés controlado que comenzaron el 8 de enero de 2022 y se extendieron cada uno por 8 días, llegándose a agotar hasta el 18,1% de la humedad respecto del umbral de reposición previo (Figura 29, Apéndice 5). Los potenciales xilemático entregados por la administración del predio muestran una respuesta al agotamiento del agua en el suelo, disminuyendo a valores deseados entre -0,85 y -0,90 MPa. A los cuatro días después de haber efectuado el riego (primer ciclo) las plantas se encontraban en una condición hídrica óptima de acuerdo con Patakas *et al.*, 2005; Ferreyra *et al.*, 2006 y Gálvez *et al.*, 2014, mientras que a partir del día cinco hasta el día siete mostraron un estrés leve de acuerdo con los mismos autores (Cuadro 14). Ocho días después del inicio de la restricción hídrica (DDR) se realizó un riego de 13 mm (inicio del segundo ciclo) que permitió recuperar el potencial hídrico xilemático a valores que no reflejaron estrés por hasta seis días después del riego.

Cuadro 14. Evolución del potencial hídrico xilemático en vides de C9 después de la modificación del punto de recarga del riego iniciando 8 enero 2022. Información entregada por la administración del predio.

DDR	0	2	4	5	6	7	0	3	5	7
Ciclo de estrés controlado				1					2	
Potencial Xilemático (MPa)	-	-0,43	-0,48	-0,73	-0,83	-0,85	-	-0,57	-0,68	-0,79
Humedad perfil (mm)	-	185,6	178,2	172,8	169,0	163,4	-	164,7	153,3	146,0
Variación (%)	-	-2,1	-4,0	-6,9	-8,9	-12,0	-	-11,3	-17,4	-21,4
DPV (KpaC ⁻¹)	-	2,4	2,1	2,1	1,4	1,5	-	2,2	2,6	2,7

*DDR: Días después del riego.

Durante el periodo previo a los ciclos de restricción hídrica, los riegos fueron aplicados con frecuencia de 4 días reponiendo en promedio el 70% de la ETo. Se observó que el contenido de agua disminuyó en todas las profundidades de forma constante, evidenciando la presencia de raíces activas en todo el perfil de suelo. El ciclo 1 inició con un riego de 16 mm (50% de la ETo) que humedeció solo hasta los 60 cm de profundidad, lo que favoreció una rápida disminución del contenido de humedad a los 80 cm durante el ciclo de riego. El inicio del ciclo 2 fue con un riego de 13 mm (30% de la ETo) que incremento el contenido de agua hasta los 40 cm del perfil. Durante los ocho días de duración de este ciclo, el contenido de humedad disminuyó drásticamente en los 60 y 80 cm, sin embargo las raíces ubicadas a los 60 cm continuaron extrayendo agua hasta el día 25 desde el inicio del ciclo 1.

Relación entre el área foliar y los aportes de riego

El área foliar está directamente relacionada con la transpiración de las cubiertas vegetales y a su vez, el área foliar en un parrón productivo está relacionado con los días grado (Williams *et al.*, 2010; Fandiño *et al.*, 2012). Al tiempo que se alcanzan los 600 DG°, todos los parrones bajo estudio alcanzaron su máxima área foliar, sin embargo, hasta este punto no se ve una relación clara entre el volumen de riego, el área foliar o la tasa de reposición (Riego/ETo). Una tasa de reposición exponencial en función del IAF indicaría una relación entre la demanda atmosférica y el follaje del parrón, de forma similar a lo señalado por Williams *et al.*, (2003) y por Williams y Fidelibus, (2019).

Con excepción de los cuarteles C4 y C9 (Figura 9). En los restantes parrones se constata que a pesar de disponer de sensores de humedad de lectura continua, los riegos son programados de acuerdo con calendario, aportando volúmenes fijos de agua alterando la frecuencia de aplicación. En el caso de M1, A1 y T1 la frecuencia de riego se mantiene relativamente constante durante la temporada (figuras 12; 14 y 16 Apéndice 3) sin embargo, el aumento de la ETo propicia que no se acumule agua en el perfil, por este motivo la relación riego/ETo tiene una mayor relación con el IAF estimado. De acuerdo con la información recopilada este manejo estuvo relacionado con la disponibilidad de agua para riego de acuerdo con los turnos de riego.

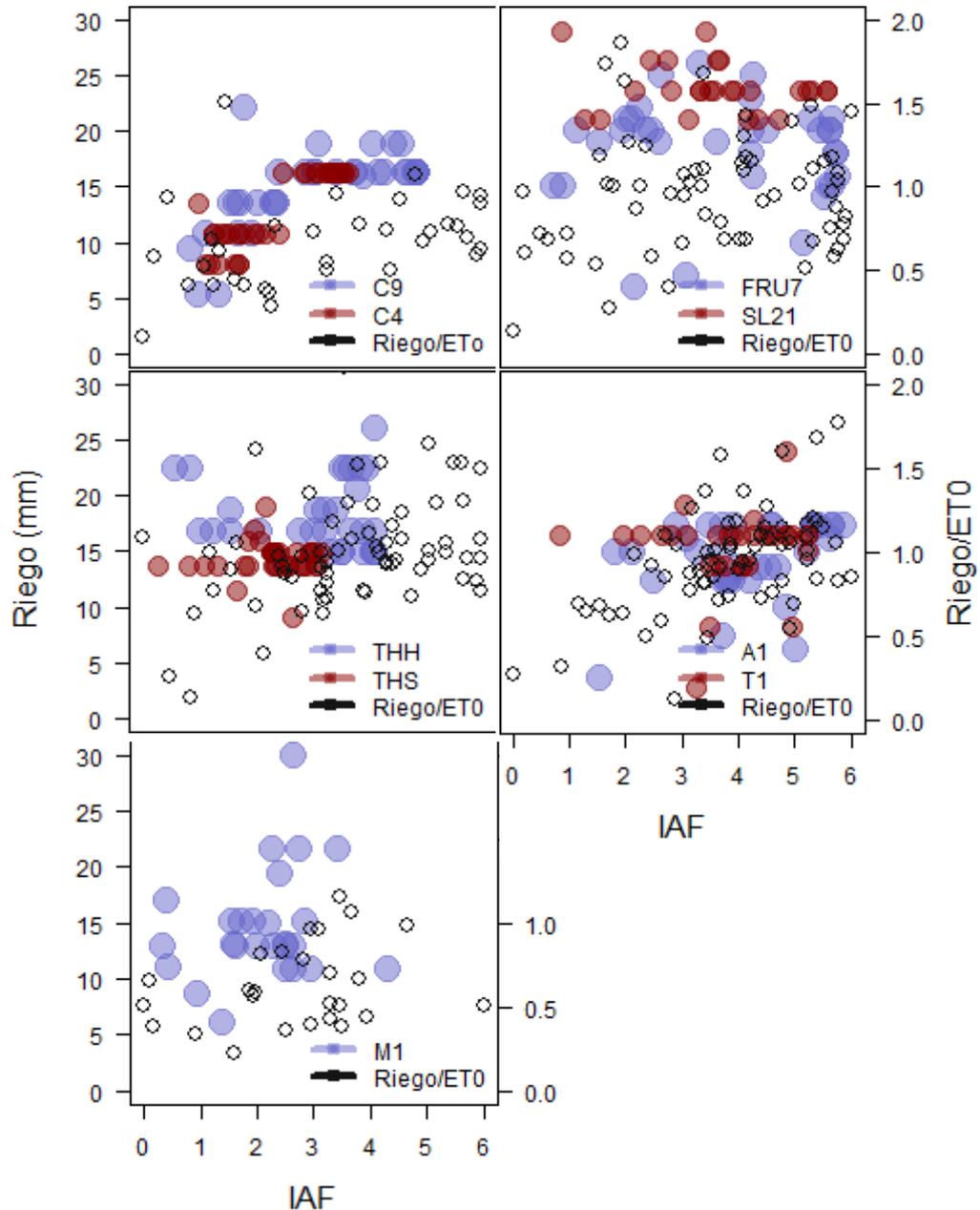


Figura 9. Relación entre el riego real y la relación Riego/ET0 con el área foliar estimada mediante modelo predictivo de interceptación de *PAR*.

En THH, THS, FRU7 y SL21 no se observa concordancia entre los volúmenes de riego y el área foliar cuando se analiza contra los registros de la dinámica del agua en el perfil (figuras 18; 20; 22 y 24 Apéndice 3). Esto estaría indicando que no existe un criterio de riego que relacione el contenido de agua almacenado dentro del perfil con el consumo de agua por parte de las plantas.

Mejorar el punto anterior es relevante para aumentar la eficiencia del uso del agua y evaluar estrategias de riego que posibiliten mantener el óptimo estado hídrico de las vides. Al respecto, la correcta fijación de las Líneas de Gestión para el manejo del riego usando las sondas de capacitancia, complementado con el uso de la Bomba de Scholander (Callejas y Seguel, 2021) posibilita modificar la distribución del agua de riego en el perfil.

Durante la temporada 2021-2022 en el cuartel C9 se dispuso la línea de gestión del punto de recarga a un mayor contenido de agua respecto de la temporada 2020-2021. Esto generó un cambio en el patrón de consumo horario entre una temporada y otra, a un área foliar y déficit de presión de vapor (DPV) similares (Figura 9).

Durante los ciclos de riego en la temporada 2020-2021 el cuartel C9 (Figura 10a) extrajo un menor volumen de agua respecto de la temporada 2021-2022 (Figura 10b) frente a una demanda atmosférica similar debido a que en 2021-2022 presumiblemente la planta extrajo agua principalmente desde los macro y mesoporos, mientras tanto que en 2020-2021 lo hizo desde los meso y microporos (Sellés *et al.*, 2003; Lamn *et al.*, 2006). Esta modificación no generó grandes modificaciones en los volúmenes de riego entre una temporada y otra debido a que se disminuyó el volumen de riego al regar con mayor frecuencia. Lo que se observa en el cuartel FRU7 (Figura 10c) que corresponde al parrón con mayor vigor nos estaría indicando que el área foliar y la demanda atmosférica no alcanzan por si solos para explicar el transporte de agua dentro de las vides.

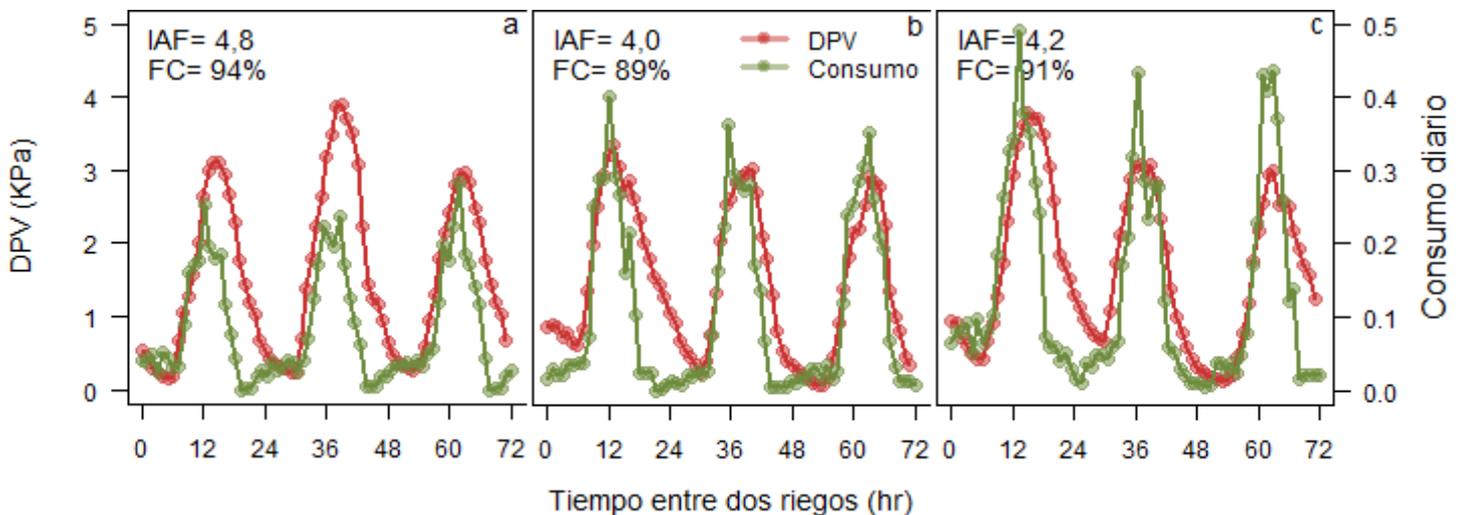


Figura 10. Patrón de consumo de agua estimado con sondas de capacitancia a escala diaria versus déficit de presión de vapor (DPV). Las gráficas a, b y c corresponden a un periodo entre dos riegos consecutivos iniciando cada uno a las 00:00 h. El gráfico a corresponde al cuartel C9 en 2020-2021, el gráfico b corresponde al cuartel C9 en 2021-2022 y el gráfico c corresponde al cuartel FRU7 en 2019-2020.

Los manejos agronómicos llevados a cabo en un parrón de uva de mesa son característicos de la variedad y del lugar de producción, y están relacionados estrechamente con la necesidad de riego, por este motivo se generó un modelo que pudiera extrapolar el criterio de riego generado en un parrón manejado con sondas de capacitancia FDR a un parrón con similares características de suelo. La metodología se presenta en el Apéndice 5.

DISCUSIÓN

Predicción del índice de área foliar y fracción de interceptación

Los resultados del ajuste de la predicción del IAF y FI con imágenes de resolución de 10 x 10 m fueron de un R^2 de 0,82 y 0,83, respectivamente, usando como predictor el índice SAVI. Estos resultados presentan un ajuste similar a los reportados en literatura usando el índice NDVI para FI (Pizarro et al. 2022; Er-Raki, *et al.* 2013), sin embargo, el mejor ajuste encontrado para IAF en este trabajo posiblemente se debe a la consideración de la ley de Beer-Lambert durante la modelación y la consideración de puntos de evaluación con alto follaje que se tradujeron en valores de PAR_{ni} cercanos a cero. Esto implica que el modelo estima un valor de IAF más cercano al real al considerar el efecto de superposición de las hojas o *Clumping* (Zamorano *et al.*, 2011).

El modelo predictivo de FI con fotografías de suelo mostró un alto coeficiente de determinación con las evaluaciones realizadas con ceptómetro, lo que significa que podría emplearse esta metodología para estimar la FI en terreno a través de un método accesible. Cuando las estimaciones de IAF real y el estimado por ceptómetro fueron validadas en C4 y C9 el R^2 de 0,81 que se obtuvo fue similar al encontrado por Suckel (2001), mientras que en A1 y T1 el R^2 fue de 0,68 ya que los valores encontrados fueron más uniformes, esto se asocia al mayor follaje de las variedades blancas. De hecho, la pendiente de la curva de validación indica que a un valor dado de IAF estimado por ceptómetro, los cuarteles A1 y T1 presentan un mayor valor de IAF real respecto a C4 y C9 (Figura 5c), lo que se traduce en una mayor cantidad de hojas por unidad de superficie. Al validar las evaluaciones en SL21 y FRU7 se observa un R^2 de 0,09 lo que se pudo deber a una incorrecta selección de los puntos de muestreo ya que todos estos presentaron una FC cercana al 90%. En general, los valores de IAF evaluados con ceptómetro fueron más cercanos al IAF real cuando la FC fue mayor a 75%, lo que permitió la distribución del follaje sobre el área asignada al árbol. Esto indica que la superficie donde se evaluó el IAF real no fue suficientemente representativa y que la estimación es válida para el periodo de máxima cobertura y cuando las hojas están distribuidas de forma uniforme en toda el área asignada al árbol.

Las curvas de IAF y FC estimadas muestran una evolución temporal que concuerda con la fenología de los parrones, observándose un incremento que coincide con el crecimiento de los brotes, alcanzándose el máximo cuando se llega a envero Contreras *et al.*, (2008), momento que en la mayoría de las localidades se alcanza a los 600 DG°.

Estimación del riego en parrones españoles con datos climáticos y satelitales

Las razones que tuvieron los autores del boletín FAO 56, para proponer la metodología Kc-ETO para la estimación de la evapotranspiración de las cubiertas vegetales, está basada en el hecho que la física es la física en todo el mundo. La dificultad de esta metodología está en emular la superficie de referencia. Al respecto, algunos autores (Allen 2006; 2008) señalan que en una estación climática instalada a 200 m del borde de

una pradera de 12 cm de alto y bien irrigada, el 75% de los registros son representativos, mientras que el 25% restante depende de las características de la superficie circundante. Bajo las condiciones climáticas de las zonas de estudio se descartaron aportes advectivos del entorno en la estimación de ETO de acuerdo con el índice de aridez (Ia) propuesto por Berenjena y Gavilán (2005), lo que significa que el principal factor afectando los resultados de ETO es el tamaño de la superficie de pasto donde está instalada la estación meteorológica, más aún cuando la velocidad del viento es superior a los $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La dificultad de emular las condiciones de referencia es conocida hace décadas por Allen (1996), quien consciente de la sobreestimación de un 20% propone una mETodología para su ajuste basándose en una relación entre la temperatura mínima diaria y el punto de rocío, sin embargo dicho ajuste requiere de una estación debidamente instalada como referencia. Otros autores han evaluado el impacto del índice de aridez (Ia) y la velocidad del viento en los resultados obtenidos, encontrando que en lugares donde estos aportes son menores, el uso de la mETodología Penman-Montheith es confiable y se debe hacer el esfuerzo de reproducir las condiciones de referencia (Cruz *et al.*, 2015).

Al evaluar los datos disponibles de ETO para Vicuña se contó con las estaciones Vicuña y Los Pimientos, ubicadas a una distancia de 0,7 km una de otra. Al comparar los resultados de ETO, se obtiene que la estación Los Pimientos sobreestima en 142; 215 y 243 mm (13; 16 y 18%) respecto a la estación Vicuña durante las temporadas 2019; 2020 y 2021, respectivamente, razón que fue explicada por la velocidad del viento, que fue 40% superior en Los Pimientos. En el caso de San Vicente de Taguatagua, las estaciones disponibles fueron: El Tambo, Jean Buchanan y El Arenal. Sorprendentemente, todas arrojaron valores de ETO similares a los registrados por la estación Vicuña. Esto coincide con valores más altos de radiación solar en el caso de Jean Buchanan, mientras que en las dos restantes se observaron valores superiores en la velocidad del viento y el déficit de presión de vapor.

Como consecuencia de lo anterior, la estimación de las necesidades de riego para SL21 y FRU7 son similares a lo estimado para C4 y C9 (Cuadro 8), a pesar de la diferencia de tipo climático entre ambas localidades. Los resultados obtenidos no permiten identificar si el volumen de riego aportado en SL21 y FRU7 se debe a una sobreestimación en la ETO de las estaciones cercanas, o a la falta de un criterio de riego bien definido (Figura 8). Sin embargo, a partir del Cuadro 9 se puede advertir que el volumen de riego aportado a SL21 y FRU7 podría disminuir entre un 18 y 25% respecto a la ETO de acuerdo con lo observado en los parrones C4 y C9 de similar área foliar.

Despejado el cálculo de la ETO, un segundo requisito para la estimación del riego es la selección de valores de K_c para la etapa inicial, media y final del ciclo productivo. Al respecto, Rallo *et al.* (2021) señalan que el K_c usado debe contar con la información necesaria para su uso bajo restricciones o su acondicionamiento. Al analizar los resultados estimados con distintos K_c en función de los parámetros del follaje de cada parrón se encontró que K_c -3 obtenido desde la plataforma PLAS y K_c -5 obtenido a partir de NDVI sobreestiman las recomendaciones de riego entre un 3 y 37% cuando se toma como referencia el método K_c dual. Estos resultados son similares a los reportados por Balbontín *et al.* (2017) quienes utilizando otras ecuaciones empíricas basadas en NDVI sobrestimaron la necesidad de riego en un 25% para un parrón ubicado en Vicuña durante el mismo periodo evaluado en este trabajo. Poblete *et al.* (2011) realizaron trabajos en

manzanos y también concluyeron que las ecuaciones empíricas basadas en índices de vegetación sobreestimaban las necesidades de riego respecto a los resultados obtenidos con FAO 56, esta vez en alrededor de 15%.

Cuando se emplean los modelos de predicción de FI y IAF en Kc-1, Kc-2 y Kc-4 se obtienen mejores estimaciones de la ET_c, de forma similar a lo reportado por Er-Raki *et al.*, (2007) quien calibrando por FI ajustó de mejor manera los resultados al estimar la superficie que efectivamente transpira. En este trabajo, lo anterior se refleja en una disminución de los volúmenes de agua entre 10 y 30 % respecto de las estimaciones basadas puramente en índices de vegetación (Cuadro 9). Los resultados que se observan en el Cuadro 9 indican que los parrones T1 y A1 corresponden a los más vigorosos al generar los volúmenes de riego más altos considerando Kc1, Kc2 y Kc4. Los parrones SL21 y FRU7 según estos resultados son 13% menos vigorosos, mientras que los parrones C4 y C9 son 26% menos vigorosos. Que A1 y T1 sean los de mayor vigor tiene sentido al tratarse de una variedad blanca, donde se busca proteger los racimos de la exposición directa al sol para disminuir el “golpe de sol” y la generación de fruta amarilla o ambar (Torres, 2017). En cambio, para las variedades de color (rojas o negras) se busca maximizar la relación cm² de hojas por gramo de fruta, sin generar un exceso de follaje que impida alcanzar el color deseado por falta de luminosidad (Muñoz *et al.*, 2002; Peppi, 2017; Aliquó *et al.*, 2020). Los productores denominan como “atigrado” a la cantidad ideal de follaje que permite un adecuado ingreso de luz al parrón, condición que fue evaluada en terreno con un 75% de cobertura. Respecto de este valor, los ensayos realizados por Sellés *et al.*, (2012) muestran cobertura foliar de 88% para las variedades Flame Seedless y Red Globe durante el periodo de envero a cosecha. Observando la Figura 7 se aprecia que los parrones C4, C9, SL21 y FRU7 mantuvieron valores de fracción de cobertura superiores a 75% por un periodo de tiempo similar (100 días), sin embargo, solo C4 y C9 disminuyeron a mayor tasa desde el valor máximo (92 y 94%), mientras que SL21 y FRU7 lo hicieron siempre manteniendo valores más altos. Lo anterior, en conjunto con la dinámica de riego (Figura 8) permiten hipotetizar que el vigor demostrado por SL21 y FRU7 pudiera ser excesivo para la producción de uvas de color, y que la mayor eficiencia del recurso hídrico se consigue en C4 y C9 donde el volumen de agua aplicada acompaña el desarrollo de una superficie foliar activa y efectivamente iluminada (Gil y Pszczólkowski 2007). Esto evitaría el contrasentido de gastar recursos en energía eléctrica con exceso de riego para posteriormente controlar la luminosidad del parrón por medio de mano de obra (Williams *et al.*, 2003; Lovisolo *et al.*, 2010; Peppi, 2017).

Manejo del riego y componentes del balance hídrico

El manejo del riego en M1 ('Red Globe', San Esteban, V Región) muestra una alta eficiencia, con una percolación de solo 2,6% distribuyendo el agua de riego en la zona de las raíces absorbentes (bulbo), lo que combinado a una frecuencia de riego de 7 días, permite utilizar el agua almacenada en los poros de agua útil paulatinamente, generando ciclos de oxigenación y humedecimiento (Sellés *et al.*, 2003; Ferreyra *et al.*, 2011). La distribución del riego coincidió parcialmente con el crecimiento foliar (Figura 9) debido a que en este predio el riego estuvo sometido a riegos por turno. En cuanto a A1 ('Arra 15', Rinconada, V Región) y T1 ('Thompson Seedless', Rinconada, V Región), el balance hídrico indica que la entrada por riego fue menor a la evapotranspiración potencial estimada. Para A1 la evaporación estimada fue de 8,2% respecto del riego y en T1 fue 11,1%, similares a los reportados en variedades blancas como Superior Seedless (Netzer *et al.*, 2008). Ambos parrones mostraron valores de IAF superiores a 3 durante la mayor parte del ciclo, por lo tanto, la superficie humedecida y expuesta al sol fue pequeña. Particularmente en A1, la mETodología propuesta en la estimación del drenaje puede estar sobreestimando estos valores al cuantificar como drenaje agua que la planta este transpirando. Esto es más evidente al observar la disminución en el contenido de agua a los 80 cm al día siguiente de haberse realizado un riego (Figura 16, Apéndice 5). En T1 se puede observar que la eficiencia del riego podría aumentar al disminuir el tiempo de riego, evitando que el agua alcance los 80 cm de profundidad donde no se aprecia actividad de raíces absorbentes durante el periodo de mayor demanda (Terrence *et al.*, 2002; Rojas, 2008; Reinwartz *et al.*, 2021).

En un extremo opuesto de eficiencia se encuentra el parrón THS ('Thompson Seedless', Calera de Tango, RM), donde el agua de riego aplicada durante la temporada excedió la necesidad hídrica diaria de las plantas, lo que generó una acumulación de agua en el perfil. Desde diciembre, y con riegos de alta frecuencia, una mayor proporción de los poros se pudo mantener con un elevado contenido de agua de acuerdo con Ferreyra y Sellés (2013), lo que generó que durante un riego de 12 h (14,6 mm) se alcanzaran los 70 cm en 1 h y los 1,6 m en 2 h (Figura 20, Apéndice 3). Esta práctica de riego buscaba, según el productor, incrementar el tamaño de las bayas. Bajo estas condiciones de crecimiento es altamente probable que las raíces hayan estado expuestas a condiciones de crecimiento de bajo oxígeno, lo que es apoyado por los altos valores de humedad de suelo evaluada con los sensores de suelo, más aún, si este manejo del riego se ha llevado a cabo por varias temporadas.

Ante la disminución de oxígeno en el suelo (hipoxia) se activa la ruta fermentativa para la obtención de energía, produciendo tan solo 2 moléculas de ATP, mientras que por la vía aeróbica se producen 36 moléculas de ATP (Taiz y Zeiger, 2015). Como residuo de la fermentación anaeróbica se acidifica el citoplasma provocando daños irreversibles como permeabilidad de las membranas, degradación de proteínas y clorofilas (Taiz y Zeiger, 2015). A su vez, se ha reportado que bajo condiciones de anoxia prolongada se produce un incremento de ABA en las hojas lo que conlleva a cierre estomático (Blanke y Cooke 2004; Rodríguez *et al.* 2011) generando disminución de la fotosíntesis y esto a su vez, la generación de especies reactivas de oxígeno (Mittler, 2002; Li *et al.*, 2017). La producción de sustancias tóxicas generadas durante la respiración anaeróbica se ha

asociado a la muerte de raíces (Geigenberger, 2003; Felle, 2005), mientras que el contenido de O₂ por debajo de 15-20 % está asociado a la disminución en la producción de raíces absorbentes (Richards, 1982; Bhattarai, 2005; Ferreyra *et al.*, 2011). La ausencia de cambios en el contenido de agua del perfil (Figura 21, Apéndice 5) asociados a absorción por el sistema radical confirma la ausencia de raíces finas absorbentes. Todas estas podrían ser las causas de la desvigorización de los parrones THH y THS que se observa en la Figura 7.

Estimación de la evapotranspiración en parrones de uva de mesa

El estudio de las relaciones hídricas en vides ha sido objeto de estudio para numerosos autores dado que el rendimiento está fuertemente relacionado con la cantidad de agua suministrada (Ferreyra *et al.*, 2006; Netzer *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2010; Selles *et al.*, 2012; Conesa *et al.*, 2018; Weiler *et al.*, 2018; Centofanti *et al.*, 2019). La mayor parte de estudios realizados en vides de mesa han sido realizados en lisímetro, bajo un sistema de conducción distinto al usado en Chile (Allen *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 2003; Williams y Ayars 2005; Netzer *et al.*, 2009) y en dos variedades de uva blanca como son Thompson Seedless y Superior Seedless. En estos trabajos se estimó la ET_c, y en promedio se repuso con el riego el 97% de la demanda atmosférica durante la temporada, asegurando que la planta no sufriera limitaciones hídricas. La superficie foliar, expresada como IAF alcanzó valores de 4,8 y 83% de fracción de interceptación (FI), mientras que el K_c máximo fue en promedio 1,25.

Si bien estos parrones tienen valores de IAF similares a los encontrados en este trabajo, la distribución de las hojas en el sistema de conducción de parrón español incrementa, al menos en teoría la evapotranspiración al aumentar la resistencia aerodinámica al viento y la interceptación de radiación solar (Williams y Ayars, 2005). Bajo estas consideraciones Villagra *et al.* (2013) investigaron la demanda hídrica específica para parrones españoles, encontrando un consumo de 810 mm durante la temporada (no se informó ETO), monto similar a la ETO del lugar de estudio (Calle Larga, Los Andes), lo que permite intuir que la reposición durante la temporada fue cercana al 100%. Reportaron además, que el K_c máximo fue 1,2 y la FC máxima fue cercana al 100%.

Los resultados previos muestran gran similitud cuando se busca satisfacer el 100% de la demanda atmosférica, aunque se ha estudiado bastante la práctica del eustrés, reportándose beneficios en suministrar volúmenes menores al 100% de la ET_c. Al respecto, Williams *et al.*, (2010) estudiaron la respuesta de vides ‘Thompson Seedless’ a criterios de riego reponiendo entre 20 y 140% de la ET_c. Sus resultados indicaron que el rendimiento fue máximo reponiendo el 80% de la ET_c durante todo el ciclo. En Chile, Ferreyra *et al.*, (2006) estudiaron el efecto de la reducción del riego en ‘Crimson Seedless’ encontrando que con el riego de 75% de la ET_c durante todo el ciclo se alcanzó igual rendimiento que con el 100%.

Otros autores han ensayado restringir el riego postenvero resultando en ahorros entre 20 y 30 % respecto al testigo sin afectar el rendimiento (Conesa *et al.*, 2014; Conesa *et al.*, 2018; Centofanti *et al.*, 2019). Sin embargo, no todas las experiencias restringiendo los

volúmenes de riego (RDC) como porcentaje de la ETc tienen resultados similares. Al restringir el riego en 20% de la ETc desde envero, Al-Fadheel *et al.*, (2018) encontraron una reducción en el tamaño de las bayas en la variedad ‘Victoria’, algo similar se reporta en ‘Red Globe’ con restricción del 50% del riego desde envero a cosecha, donde los resultados indican que no existió diferencia con el tratamiento control regado al 100% de la ETc cuyos rendimientos y calibre no fueron destacables (Munizaga, 2019). En ambos casos los potenciales xilemáticos reportados indican que tanto el control como el tratamiento, previo a implementar el RDC, estaban en una condición de estrés hídrico fuerte (-1,1 y -0,95 MPa) antes de comenzar el ensayo (Patakas *et al.*, 2005; Conesa *et al.*, 2014; Centofanti *et al.*, 2019). Es altamente probable que los parrones estudiados presentaran baja cantidad de raíces finas absorbentes, ya que los valores de potencial hídrico reportados son similares a los reportados en vides viníferas regadas con el 50% de la ETc (Netzer *et al.*, 2019).

Evapotranspiración en parrón de uva de mesa estimada con sensores de humedad FDR

La monitorización de la humedad del suelo en los cuarteles C4 y C9 permitió definir el tiempo de riego de acuerdo con la mETodología de las Líneas de Gestión propuesta por Callejas *et al.*, (2014b) y Callejas y Seguel (2021) minimizando con esto la pérdida de agua por percolación. Durante las tres temporadas estudiadas, la percolación fue en promedio el 7 y 5% del volumen de riego para los parrones C4 y C9 respectivamente, esto indica que prácticamente toda el agua que se aportó como riego fue evapotranspirada. Adicionalmente, de la dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo (figuras 26, 27; 28; 30; 31 y 32, Apéndice 3) se puede inferir que el agua evapotranspirada durante todo el periodo evaluado fue principalmente la aportada por el riego, ya que el contenido de humedad inicial en el perfil es similar al del periodo final de evaluación.

El riego del parrón C4 fue en promedio un 80,5% de la ETc estimada por el Kc dual para las tres temporadas en estudio. De forma similar, en el parrón C9 el riego correspondió al 78% de la ETc en promedio para las tres temporadas. Estos resultados podrían estar confirmando que la estimación de ETo en Vicuña está sobreestimada en los rangos descritos por Allen (1996). Este autor describe que en estaciones que no cumplen con la superficie de referencia las estimaciones de ETo pueden ser 20% superiores, mientras que el riego de C4 y C9 fueron 19,5 y 22% menores que la ETc. Sin embargo, esta diferencia también podría ser explicada por una sobreestimación en los valores de la evaporación de agua desde el suelo en este tipo de parrones. Montoro *et al.*, (2016) señalan que la ineficiencia del riego aumenta cuando se reponen pequeñas láminas de agua en alta frecuencia, pues incrementa la fracción de evaporación respecto del riego. Este manejo del riego es frecuente en los estudios que dan origen a los Kc reportados en literatura, y la mETodología del Kc dual no es la excepción. Sin embargo, Netzer *et al.*, (2008) encontraron que en parrones con un IAF tan alto como C4 y C9 la evaporación alcanzó un 8% de la ETc, valor similar al 14% y 12% estimado en este trabajo, por lo tanto, la diferencia encontrada no se lograría explicar completamente.

Si bien la evidencia recopilada puede indicar que los volúmenes de agua de riego calculados para satisfacer la demanda atmosférica son sobreestimados a causa de la

estimación de la ETo, bajo las condiciones de este trabajo no es posible determinar con certeza la magnitud de este error, por lo que no se puede descartar la existencia de otros factores, quizás fisiológicos que expliquen parte de esta diferencia.

Las vides fueron domesticadas desde su ancestro *Vitis vinifera* L. *Sylvestris* que crecía como una liana o un arbusto bajo en zonas climáticas tan diversas como la ribera de un río en el mediterráneo o en medio este de Turkmenistán (Cattonaro *et al.*, 2014). Negroul (1946), identificó tres grupos de cultivares con base a su región de origen: 1) *Occidentalis*, que alberga la mayoría de cultivares del occidente de Europa, 2) *Pontica*, donde pertenecen los cultivares del este y centro de Europa y 3) *Orientalis*, donde están incluidas la mayoría de las vides de mesa. Distintos reportes (Bacilieri *et al.*, 2013; Hochberg *et al.*, 2016; Netzer *et al.*, 2019; Pouzoulet *et al.*, 2020) han indicado que los cultivares pertenecientes al grupo *orientalis* presentan mayor conductividad hidráulica del xilema, mayor número de vasos xilemáticos por área y mayor frecuencia de vasos superiores a 600 μm . Estas adaptaciones permitieron a los ancestros que se desarrollaron en climas áridos maximizar el uso del agua durante pequeños periodos de disponibilidad, transportando rápidamente el agua a los brotes en crecimiento (Pouzoulet *et al.*, 2020).

Bajo las condiciones de los sistemas productivos de uva de mesa no existen las condiciones de escasez hídrica que llevó a las vides a desarrollar tales modificaciones y se ha descrito que, para las condiciones de producción de la vid, esta cuenta con más área conductiva que la necesaria para afrontar la pérdida de agua de los estomas (Hochberg *et al.*, 2016). Adicionalmente se ha descrito que la mayor tasa de actividad dentro del cambium del tronco se produce seis semanas desde la brotación, y que mayor disponibilidad de agua durante este periodo produce un incremento en el diámetro de los vasos xilemáticos y por lo tanto de la conductividad hidráulica de la planta (Netzer *et al.*, 2019).

De acuerdo con lo planteado anteriormente, las vides son capaces de transportar grandes cantidades de agua, más aún cuando su aporte no es limitado como sucede en los estudios de obtención de Kc bajo el concepto de que no exista limitación hídrica. Sin embargo, en el contexto hídrico que se encuentra nuestro país pareciera más importante comprender como lidian las plantas con la reducción del agua disponible. Los resultados de Williams *et al.* (2010) y Ferreyra *et al.* (2006), al obtener máximos rendimientos reponiendo el 80 y 75% de la ETc, confirman el hecho de que las vides poseen una mayor capacidad conductiva de la necesaria y que existen parámetros fisiológicos que permiten incrementar la eficiencia del uso de agua, aun cuando parte de esta reducción esté asociado a una sobreestimación en el cálculo de ETo.

Un punto interesante de destacar sobre el manejo del riego en C9, es el hecho que en el periodo previo al inicio del déficit hídrico controlado, los riegos no alcanzaron los 80 cm de profundidad, por lo tanto, no existió percolación, y el agua almacenada en el perfil fue evapotranspirada en días posteriores. En este periodo de 16 días se aportaron como riego 49 mm mientras que la ETo fue de 88 mm (Kcs o reposición de 0,56). Los valores de potencial hídrico xilemático evaluados el día 2 después del riego (DDR) en el ciclo 1 de déficit hídrico controlado señalan que estos riegos no afectaron negativamente a las plantas lo que indica que el suelo disponía de suficiente agua (Patakas *et al.*, 2005; Ferreyra *et al.*, 2006; Gálvez *et al.*, 2014) (Cuadro 14). Durante los dos ciclos de déficit hídrico el DPV tuvo valores cercanos a 3 kPa, por lo tanto, la fuerte caída del potencial

xilemático entre el 4° y 5° día después del riego dentro del primer ciclo de estrés controlado puede estar asociada a otros factores, más aún cuando se ve que el contenido de agua a los 60 cm aún no llega al mínimo registrado (Figura 32, Apéndice 3). Distintos suministros de agua durante la etapa de desarrollo de los brotes pueden modificar el diámetro de los vasos xilemáticos, aumentando con esto la conductividad hidráulica (Lovisolo *et al.*, 2010; Netzer *et al.*, 2019). Cuando el agua se restringe, los vasos de mayor diámetro transportan menos agua y el potencial xilemático cae con mayor intensidad (Netzer *et al.*, 2019).

Los valores de potencial xilemático alcanzados a los 5; 6 y 7 días después del riego del ciclo 1 indican que las plantas manifestaron un estrés hídrico moderado o medio (Conesa *et al.*, 2014; Faci *et al.*, 2014; Conesa *et al.*, 2016; Pinillos *et al.*, 2016; Conesa *et al.*, 2018) que se relaciona con la disminución del contenido de agua hasta los 60 cm. Durante el ciclo 1 la ETo fue de 43 mm y el riego fue de 13 mm (Kcs 0,31). El riego que inicia el ciclo 2 de estrés hídrico controlado permite que el estado hídrico de las vides vuelva al rango óptimo hasta el día 4 DDR a pesar de que la reposición vía riego fuera solo del 31% de la ETc. Esto indica la presencia de una gran cantidad de raíces absorbentes dentro del bulbo de humedecimiento dentro de los 60 cm del suelo y reafirma lo reportado por algunos autores sobre la gran capacidad que tienen las vides para absorber agua (Figura 41) y transportarla a través del xilema (Bacilieri *et al.*, 2013; Hochberg *et al.*, 2014; Pouzoulet *et al.*, 2020).

Los resultados expuestos hasta ahora muestran que la metodología del coeficiente del cultivo (Kc-ETo) propuesta en FAO 56 sobreestima los volúmenes de riego en parrones de uva de mesa respecto a lo obtenido con sensores de suelo FDR. Además, dicha sobreestimación no se explica por un menor vigor, lo que queda de manifiesto en los cuarteles C4 y C9, donde los volúmenes de transpiración potencial estimados por el método del Kc dual son similares al riego real, al menos durante el periodo de máxima cobertura (cuadros 10 y 11). Estos resultados muestran que la sobreestimación del método Kc-ETo es de aproximadamente 20%, sin embargo, no es posible atribuir estos valores a un único factor.

CONCLUSIONES

De acuerdo con las condiciones en que se realizó este estudio, se concluye que:

En parrones de uva de mesa comercialmente productivos, el volumen de agua de riego es sobreestimado por el método Kc-ET_o respecto del agua aportada siguiendo el criterio de las líneas de gestión de sensores de humedad de suelo de lectura continua. Dicha sobreestimación no es producto de una menor condición del follaje de los parrones manejados con sensores de suelo, sino que se debe en un porcentaje que no se logró determinar, a la estimación de la ET_o y a la pérdida de eficiencia al no monitorizar la dinámica del agua en el suelo.

La información de demanda atmosférica obtenida desde estaciones climáticas debe ser utilizada con precaución en la programación del riego, esto es debido a que se desconoce si se cumple la condición estándar de instalación, si existe un error asociado a la falla instrumental, o porque se utilizan datos provenientes de estaciones climáticas lejanas donde alguna variable no es representativa del lugar de uso.

En la práctica, el uso de las sondas de capacitancia de lectura continua se muestra como mejor alternativa en la programación del riego al detectar la profundidad y dinámica de consumo de agua de la planta, además de disminuir la dependencia a la información climática.

Es posible obtener la modelación de las variables IAF, FI y la dinámica temporal del follaje de parrones de uva de mesa, complementando la información de terreno con imágenes satelitales de mediana resolución. Los resultados generan la expectativa de profundizar en el modelamiento de parámetros de interés agronómico a través de sensores remotos con mayor resolución espacial lo que permitiría mayor nivel de detalle y la alimentación de algoritmos de predicción a nivel de planta o grupo de plantas.

LITERATURA CITADA

- Adam, V., P. Ferrer, L. Bonet, J. Vera, J. Senchermés, y E. Sanz. 2015. El uso de sondas capacitivas multisensor en comunidades de regantes y el ahorro de agua en la comunidad valenciana. Abstract 51-52. In: Comité Español de Riegos y Drenajes (CERYD). XXVI Congreso Nacional de Riegos, Huesca, Huesca, España.
- Adeyemi, O., I. Grove, S. Peets, Y. Domun, and T. Norton. 2018. Dynamic modelling of lettuce transpiration for water status monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture* 155:50-57.
- Al-Fadheel, S., V. Verrastro, G. Gentile, D. Di-Gennaro, A. Amendolagine and L. Tarricone. 2016. August. Sustainable irrigation strategy in organic 'Victoria' table grape in Apulia region. In XI International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems 1228:413-420.
- Aliquó, G., A. Catania y G. Aguado. 2010. La poda de la vid. Luján de Cuyo, Mendoza: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 34p.
- Allen, R. G. 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of irrigation and drainage engineering* 122:97-106.
- Allen, R. G. 2006. Footprint analysis to assess the conditioning of temperature and humidity measurements in a weather station vicinity. In World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns 1-12.
- Allen, R. 2008. Quality assessment of weather data and micrometeorological flux-impacts on evapotranspiration calculation 64:191-204.
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Documento 56 de la FAO irrigación y Drenaje. Roma. 298p.
- Allen, R. G., y L.S. Pereira. 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science* 28:17-34.
- Arauzo, M., J.A. Díez y P.J. Hernáiz. 2005. Observaciones a escala horaria del contenido de agua en la zona no saturada mediante el uso de sensores de capacitancia. *Estudio de la Zona No Saturada del Suelo* 7:33-38.
- Arregui, L.M. and M. Quemada. 2006. Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. *Plant and Soil* 288:57-69.
- Asoex. 2021. Anuario Uva de Mesa 2020 – 2021. 46 p. In: Estadísticas de Exportación Frutícola de Chile. iQonsulting. Julio 2021. Peralillo, Región de O'Higgins, Chile.

Asoex. 2022. Perú superaría los 70 millones de cajas de uva de mesa al cierre de la campaña. Disponible en: <https://www.simfruit.cl/peru-superara-las-70-millones-de-cajas-de-uva-de-mesa-al-cierre-de-la-campana/>.

Bacilieri, R., T. Lacombe, L. Le Cunff, M. Di Vecchi-Staraz, V. Laucou, B. Genna, J.P. Peros, P. This and J.M. Boursiquot. 2013. Genetic structure in cultivated grapevines is linked to geography and human selection. *BMC Plant Biology* 13:25-35.

Balbontín, C., M. Odi, R. Poblete, J. Garrido, I. Campos y A. Calera. 2016. Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. La Serena, Chile. Boletín INIA N°335. 50p.

Balbontín, C., I. Campos, M. Odi-Lara, A. Ibacache y A. Calera. 2017. Irrigation performance assessment in table grape using the reflectance-based crop coefficient. *Remote Sensing* 9:1276-1289.

Berengena, J. and P. Gavilán. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 147-163.

Bhattarai, S. 2005. The physiology of water use efficiency of crops subjected to subsurface drip irrigation, oxygenation and salinity in a heavy clay soil. 326 p. PhD thesis. Central Queensland University, Faculty of Arts, Health and Sciences, Rockhampton, Australia.

Calera, A., I. Campos, A. Osann, G. D'Urso and M. Menenti. 2017. Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users. *Sensors* 17:5-1104.

Callejas, R. H., J. Vera, M. Rioseco, F. Prohens, H. Osorio, P. Pino, y R. Gálvez. 2014a. Generación e integración de tecnologías destinada al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras de fruta en Chile. *Aqua-LAC* 2:71-83.

Callejas, R., J. Vera y C. Kremer. 2014b. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. *Serie Ciencias Agronómicas* N° 23, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago. 112p.

Callejas, R. y O. Seguel. 2021. Paquete tecnológico UchileCrea para el control inteligente del riego en sistemas frutícolas. *Aqua-LAC* 13:128-142.

Campbell, G. and J. Norman. 1989. The description and measurement of plant canopy structure. p. 15-17. In: Russel, M.; B. Marshall and P. Jarvis. *Plant canopies: their growth, form and function*. Cambridge University Press.

Campos, I., C.M. Neale, A. Calera, C. Balbontín and J. González-Piqueras. 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management* 98(1):45-54.

Castañeda-Ibáñez, C. R., M. Martínez-Menes, F. Pascual-Ramírez, H. Flores-Magdaleno, D.S. Fernández-Reynoso y S. Esparza-Govea. 2015. Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego río Yaqui, Sonora, México. *Agrociencia* 49(2):221-232.

Cattonaro, F., R. Testolin, S. Scalabrin, M. Morgante and G. Di Gaspero. 2014: Genetic diversity in the grapevine germplasm. p 683-704. In: R. Tuberosa, A. Graner, E. Frison (Eds): *Genomics of plant genetic resources*, vol. 1: Managing, sequencing and mining genetic resources. Springer, New York, USA.

Chavez, P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment* 24(3):459-479.

Centofanti, T., G.S. Bañuelos and J.E. Ayars. 2019. Fruit nutritional quality under deficit irrigation: the case of table grapes in California. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99(5):2215-2225.

(CIREN) Centro de Información de Recursos Naturales. 2005. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio agrológico IV región [en línea]. Santiago: Publicación CIREN - Centro de Información de Recursos Naturales. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/36773>.

CIREN. (Centro de Información de Recursos Naturales). 1996. Estudio agrológico VI región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos [en línea]. Santiago: Publicación CIREN - Centro de Información de Recursos Naturales. no. 114. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/36259>.

Conesa, M.R., I.C. Dodd, A. Temnani, J.M. De la Rosa and A. Pérez-Pastor. 2018. Physiological response of post-veraison deficit irrigation strategies and growth patterns of table grapes. *Agricultural Water Management* 208:363–372.

Conesa, M.R., J.M. de la Rosa, F. Artés-Hernández, I. Dodd, R. Domingo and A. Pérez-Pastor. 2014. Long-term impact of deficit irrigation on the physical quality of berries in ‘Crimson Seedless’ table grapes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95: 2410-2520.

Conesa, M.R., N. Falagán, J. M. de la Rosa, E. Aguayo, R. Domingo and A. Pérez-Pastor. 2016. Post-veraison deficit irrigation regimes enhance berry coloration and health-promoting bioactive compounds in ‘Crimson Seedless’ tablegrapes. *Agricultural Water Management* 163:9-18.

Conesa, M.R., J.M. de la Rosa, R. Domingo, S. Bañon and A. Pérez-Pastor. 2016. Changes induced by 43áter stress on 43áter relations, stomatal behaviour and morphology of table grapes grown in pots. *Scientia Horticulturae* 202:9-16.

Cruz-Blanco, M., C. Santos, P. Gavilán, and Lorite, I. J. 2015. Uncertainty in estimating reference evapotranspiration using remotely sensed and forecasted weather data under the climatic conditions of Southern Spain. *International Journal of Climatology* 35(11): 3371-338

DGA. (Dirección General de Aguas) 2021. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín N° 520. Mes agosto. 54 p. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin_Agosto_2021.pdf.

Dore, M. H. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? *Environment international* 31(8):1167-1181.

Er-Raki, S., A. Chehbouni, N. Guemouria, B. Duchemin, J. Ezzahar and R. Hadria. 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural water management* 87(1):41-54.

Er-Raki, S., J.C. Rodriguez, J. Garatuza-Payan, C.J. Watts and A. Chehbouni. 2013. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agricultural water management* 122:2-19.

Faci, J.M., O. Blanco, E.T. Medina and A. Martínez-Cobb. 2014. Effect of post veraison regulated deficit irrigation in production and berry quality of Autumn Royal and Crimson table grape cultivars. *Agricultural Water Management* 134:73-83.

Fandiño, M., J.J. Cancela, B.J. Rey, E.M. Martínez, R.G. Rosa and L.S. Pereira. 2012. Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of Albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albariño) with consideration of active ground cover. *Agricultural Water Management* 112:75-87.

Felle, H. H. 2005. pH regulation in anoxic plants. *Annals of botany* 96(4):519-532.

Ferreira, R., G., M. Sellés, M. Pinto, O. Morales and O. Seguel. 2011. Effect of soil air capacity on water relations and vegetative growth of 'Thompson Seedless' grafted on different rootstocks: preliminary results. *Acta Horticulturae* 889:145-150.

Ferreira, R. y G. Sellés. 2013. Manual de riego para frutales: uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centros Regionales de Investigación La Platina y La Cruz. Santiago, Chile

Ferreira, R., G. Selles, H. Silva, R. Ahumada, I. Muñoz, y V. Muñoz. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa agropecuaria brasileira* 41(7):1109-1118.

Frag, E.; S.M. Arafat, M.S. Abd El-Wahed and A.M. EL-Gindy. 2012. Estimation of Evapotranspiration E_{Tc} , and Crop Coefficient K_c of Wheat, in South Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 156:83-89.

Gálvez, R., R. Callejas, G. Reginato and M.C. Peppi. 2014. Irrigation Schedule on table grapes by stem water potential and vapor pressure deficit allows to optimize water use. *Ciencia Técnica Viticultura* 29(2):60-70.

Geigenberger, P. 2003. Response of plant metabolism to too little oxygen. *Current opinion in plant biology* 6(3):247-256.

Gil, G y P. Pszczółkowski. 2007. *Viticultura, fundamentos para optimizar producción y calidad*. Santiago: Ediciones Pontificia Universidad Católica de Chile. 535 p.

Gitelson, A., J. Kaufman, R. Stark y D. Rundquist. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing Environ* 80:76-87.

Gitelson, A., Y. Kaufman y M. Merzlyak. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58(3):289–298.

Hargreaves, G. H. y Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric* 1(2):96-99.

Hassan, I., G. Maybelle and A. Gomaa. 2020. Effect of short-term deficit irrigation on fruit quality and yield of "crimson seedless" grown under semi-arid conditions. *Plant Archives* 20:9170-9174.

Hochberg, U., C. Albuquerque, S. Rachmilevitch, H. Cochard, R. David-Schwartz, C.R. Brodersen and C.W. Windt. 2016. Grapevine petioles are more sensitive to drought induced embolism than stems: evidence from in vivo MRI and microcomputed tomography observations of hydraulic vulnerability segmentation. *Plant, Cell and Environment* 39(9):1886-1894.

Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25:295–309.

Jackson, J. y J. Palmer. 1979. A simple model of light transmission and interception by discontinues canopies. *Annals of Botany* 4:381-383.

Kool, D., N. Agam, N. Lazarovitch, J.L. Heitman, T.J. Sauer and A. Ben-Gal. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology* 184:56-70.

Lamm, F. R., J.E. Ayars and F.S. Nakayama. 2006. *Microirrigation for crop production: design, operation, and management*. Elsevier.

Li, Y., D. Chen, C.N. Walker and J.F. Angus. 2010. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Research* 118:221-227.

- Li., H., Q. Wang; L. Su, B. Shi and G.Zhou. 2017. Light response characteristics of photosynthesis rate and stomatal conductance in red globe grape. *Agricultural Research in the Arid Areas* 35(4):230-236.
- Lovisoló, C., I. Perrone, A. Carra, A. Ferrandino, J. Flexas, H. Medrano and A. Schubert. 2010. Drought-induced changes in development and function of grapevine (*Vitis* spp.) organs and in their hydraulic and non-hydraulic interactions at the whole-plant level: a physiological and molecular update. *Functional plant biology* 37(2):98-116.
- Martí, P., M. Gasque and P. González-Altozano. 2013. An artificial neural network approach to the estimation of stem water potential from frequency domain reflectometry soil moisture measurements and meteorological data. *Computers and Electronics in Agriculture* 91:75-86.
- Mincetur. 2022. Exportaciones de uva podrían alcanzar los US\$ 1.400 millones en 2022. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/mincetur/noticias/612047-exportaciones-de-uva-podrian-alcanzar-los-us-1-400-millones-en-2022>.
- Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in plant science* 7(9):405-410.
- Montoro, A., F. Mañas and R. López-Urrea. 2016. Transpiration and evaporation of grapevine, two components related to irrigation strategy. *Agricultural Water Management* 177:193-200.
- Mounzer, O. H., J. Vera, L.M. Tapia, Y. García-Orellana, W. Conejero, I. Abrisqueta and J.M. Abrisqueta-García. 2008a. Irrigation scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by continuous measurement of soil water status. *Agrociencia* 42(8):857-868.
- Mounzer, O. H., J. Mendoza-Hernández, I. Abrisqueta, L. Vargas, J. Abrisqueta, J. Vera and M. Ruiz. 2008b. Soil water content measured by FDR probes and thresholds for drip irrigation management in peach trees. *Agricultura Técnica en México* 34(3):313-322.
- Mossad, A., A. Scalisi and R. Lo Bianco. 2018. Growth and water relations of field-grown 'Valencia' orange trees under long-term partial rootzone drying. *Irrigation science* 36:9-24.
- Munizaga S. 2019.
- Muñoz, R., J. Pérez, E. Pszczolkowski and E. Bordeu. 2002. Influencia del nivel de carga y microclima sobre la composición y calidad de bayas, mosto y vino de Cabernet Sauvignon. *Ciencia e Investigación Agraria* 29(2):115-125.
- 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. 73 p. Tesis Magister. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.
- Negrout, A. 1946: Origin and classification of cultured grape. *Ampelogr. USSR* 1:159.

Netzer, Y., C. Yao, M. Shenker, B-A, Bravdo and A. Schwartz. 2008. Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system. *Irrigation Science* 27:109-120.

Netzer, Y., S. Munitz, I. Shtein and A. Schwartz. 2019. Structural memory in grapevines: Early season water availability affects late season drought stress severity. *European Journal of Agronomy* 105:96-103.

Ohana-Levi, N., I. Zachs, N. Hagag, L. Shemesh y Y. Netzer. 2022. Grapevine stem water potential estimation based on sensor fusion. *Computers and Electronics in Agriculture* 198:107-116.

Orozco, C., y M. Valverde. 2012. Impacto ambiental del manejo del agua de riego con sondas de capacitancia sobre la contaminación de acuíferos por nitratos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 4(3):23-45.

Patakas, A., B. Noitsakis and A. Chouzouri. 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106(3):253-259.

Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 193(1032):120-145.

Peppi, M.C. 2017. La fisiología del manejo del color en uva de mesa. Tercera Conferencia Redagícola Piura 2020. Piura, Perú.

Pinillos, V., F.M. Chiamolera, J.F. Ortiz, J.J. Hueso and J. Cuevas. 2016. Post-veraison regulated deficit irrigation in ‘Crimson Seedless’ tablegrape saves water and improves berry skin color. *Agricultural Water Management* 165:181-189

Pizarro, E., M. Galleguillos, P. Barría and R. Callejas. 2022. Irrigation management or climate change? Which is more important to cope with water shortage in the production of table grape in a Mediterranean context. *Agricultural Water Management* 263:107-117.

Poblete-Echeverría, C. A. and S.O. Ortega-Farias. 2013. Evaluation of single and dual crop coefficients over a drip-irrigated Merlot vineyard (*Vitis vinifera* L.) using combined measurements of sap flow sensors and an eddy covariance system. *Australian journal of grape and wine research* 19(2):249-260.

Pôças, I., T. Paço, P. Paredes, M. Cunha and L. Pereira. 2015. Estimation of Actual Crop Coefficients Using Remotely Sensor Vegetation Indices and Soil Water Balance Modelled Data. *Remote Sensing* 2072-4292.

Poblete-Echeverría, C., S. Ortega-Farias and M. Zuñiga. 2011, May. Estimation of dual crop coefficients over a drip-irrigated merlot vineyard using sap flow sensors and eddy covariance system. In VIII International Symposium on Sap Flow 951 (p. 269-275).

- Pouzoulet, J., A.L. Pivovarov, M.E. De Guzman, P.E. Rolshausen and L.S. Santiago. 2020. Contrasting adaptation of xylem to dehydration in two *Vitis vinifera* L. sub-species. *vitis* 59(2):53-61.
- Priestley, C and R. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2):81-92.
- Rallo, G., T.A. Paço, P. Paredes, A. Puig-Sirera, R. Massai, G. Provenzano and L.S. Pereira. 2021. Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. *Agricultural Water Management* 250:106645.
- Ramos, A. and F. Santos. 2009. Water use, transpiration, and crop coefficients for olives (cv. Gordovil), grown in orchards in Southern Portugal. *Biosystems engineering* 102: 321-333.
- Reingwartz, I., Uretsky, J., Cuneo, I. F., Knipfer, T., Reyes, C., Walker, M. A., and McElrone, A. J. 2021. Inherent and stress-induced responses of fine root morphology and anatomy in commercial grapevine rootstocks with contrasting drought resistance. *Plants* 10(6):1121.
- Richards, D. 1983. The grape root system. *Horticultural reviews* 5:127-168.
- Rouse, J., R. Haas, J. Schell and D. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Remote Sensing Center* 20:309-317.
- R Core Team 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rojas, R. 2008. Poda de Raíces y tratamiento complementario sobre la distribución y crecimiento de las raíces en vid ‘Sultanina’. 26p. Tesis título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile.
- Santibáñez, F. 2014. Los recursos hídricos de las américas en los nuevos escenarios climáticos, la visión desde el proyecto VACEA. Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 12 p.
- Sellés, G., R. Ferreyra, G. Contreras, R. Ahumada, J. Valenzuela y R. Bravo. 2003. Manejo de riego por goteo en uva de mesa cv. Thompson Seedless cultivada en suelos de textura fina. *Agricultura técnica* 63(2):180-192.
- Sellés, G., R. Ferreyra, N. Aspillaga, y E. Zúñiga. 2012. Requerimientos de riego en uva de mesa: experiencias en el Valle de Aconcagua. Boletín INIA N° 242. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación La Platina, Santiago, Chile. 80p.
- Silva-Contreras, C., H. Silva-Robledo, S.V. Schouwen y R. Ferreyra-Espada. 2008. Relaciones de crecimiento entre el tronco y la baya en *Vitis vinifera* con uso de sensores de desplazamiento variable. *Agrociencia* 42(8):903-912.

- Suckel, F. 2001. Calibración de métodos no destructivos de estimación de área foliar en vid variedad Thompson Seedless. 53p. Memoria de título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.
- Taiz, L., E. Zeiger, I.M. Møller and A. Murphy. 2015. Plant physiology and development. ed. 6. Sinauer Associates Incorporated.
- Terence, R., R. Dunst, and P. Joy. 2002. Seasonal dry matter, starch, and nutrient distribution in “Concord” grapevine roots. *HortScience* 37:313-316.
- Torres, Andrea. 2017. Manual del cultivo de Uva de Mesa. Santiago, Chile: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 383. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6714> (Consultado: 2 abril 2023).
- TRADEMAP. 2021. Estadísticas del comercio para el desarrollo internacional de las empresas. Disponible en: <https://www.trademap.org>.
- Villagra, P., V. García de Cortázar, R. Ferreyra, C. Aspillaga, C. Zúñiga, S Ortega-Farias and G. Sellés. 2014. Estimation of water requirements and Kc values of Thompson Seedless’ table grapes grown in the overhead trellis system, using the Eddy covariance method. *Chilean journal of agricultural research* 74(2): 213-218.
- Weiler, C. S., N. Merkt and S. Graeff-Hönniger. 2018. Impact of water deficit during fruit development on quality and yield of young table grape cultivars. *Horticulturae* 4(4): 45-55.
- Williams, L., C.J. Phene, D. W. Grimes and T.J. Trout. 2003. Water use of mature Thompson Seedless grapevines in California. *Irrigation Science* 22(1):11-18.
- Williams, L., D. Grimes and Phene. 2010. The effect of applied water at various fractions of measured evapotranspiration on reproductive growth and water productivity of Thompson Seedless grapevines. *Irrigation Science* 28:233-243.
- Williams, L. and M. Fidelibus. 2016. Measured and estimated water use and crop coefficients of grapevines trained to overhead trellis systems in California’s San Joaquin Valley. *Irrigation scienc* 34(6):431-441.
- Williams, L. E and J.E. Ayars. 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132:201-211.
- Zamorano, N. 2011. Estimación del índice de área foliar por medio de la interceptación de radiación solar en vid y olivo. Memoria Ingeniero Agrónomo, mención Fruticultura. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 28h.
- Zúñiga-Espinoza, C., C. Aspillaga, R. Ferreyra and G. Sellés. 2015. Response of table grape to irrigation water in the Aconcagua Valley, Chile. *Agronomy* 5405-417.

ANEXOS

Anexo 1. Ecuaciones de estimación de evaporación y evapotranspiración de referencia por métodos alternativos

$$ET0 = 0,0023(Tmedia + 17,8)(Tmax - Tmin)^{0,5} \cdot Ra \quad (ec. 1)$$

Ecuación 1. Donde ETO es la evapotranspiración de referencia ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$), $Tmedia$ es la temperatura media diaria, $Tmax$ la temperatura máxima, $Tmin$ la temperatura mínima, Ra la radiación extraterrestre ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$).

$$ET0 = \frac{\alpha \Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)} Rn \quad (ec. 2)$$

Ecuación 2. Donde ETO es la evapotranspiración de referencia ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$), α es la constante de Prestley, Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ($\text{KPa} \cdot \text{K}^{-1}$), λ es el calor latente de vaporización igual a 2,45 MJ, γ es la constante psicométrica ($\text{KPa} \cdot \text{K}^{-1}$) y Rn es la radiación neta diaria.

$$E = \frac{\Delta Rn}{(\lambda + \gamma Ea)(\Delta + \gamma)} \quad (ec. 3)$$

$$Ea = f(u2) \cdot DPV \quad (ec. 4)$$

$$f(u2) = 2,61(1 + 0,54 \cdot u2) \quad (ec. 5)$$

Ecuaciones 3; 4 y 5. Donde E es la evaporación de agua libre ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$), Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ($\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$), Rn es la radiación neta ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), γ es la constante psicométrica ($\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$), y Ea es el poder evaporante del aire ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$), $f(u2)$ es la función del viento de Penman, $u2$ es la velocidad del viento a 2 metros ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), DPV es el déficit de presión de vapor (kPa).

Anexo 2. Estimación del índice de área foliar y fracción de interceptación por medio de ceptómetro

$$FI = \frac{PARi_t}{PARO_t} = \frac{PARO_2 - PARni_e}{PARO_{media}} \quad (ec. 6)$$

Ecuación 6. Siendo FI la fracción interceptada por la vegetación, $PARO$ es la radiación fotosintéticamente activa en suelo descubierto ($\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{seg}^{-1}$), $PARni$ es el PAR no interceptado ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{seg}^{-1}$), $PARi$ corresponde a PAR interceptado ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{seg}^{-1}$).

Para la estimación del índice de área foliar (IAF) se implementó el modelo propuesto por Jackson y Palmer (1979) (ecuación 7).

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{PARni}{PARO}\right)}{-k} \quad (\text{Ec. 7})$$

Ecuación 5. Donde $PARni$ es la luz PAR medida por el ceptómetro, $PARo$ es la luz PAR evaluada a suelo descubierto, k el coeficiente de extinción e IAF es el Índice de Área Foliar ($\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$).

El modelo del elipsoide de Campbell (Campbell y Norman, 1989), permite describir la variabilidad de la radiación incidente transmitida en el dosel. Se efectuó para cada planta en estudio la estimación del coeficiente de extinción foliar (k) (Ecuación 8), además del modelo de Lang (1987) que permite describir la variabilidad de la distribución angular solar en el dosel.

$$k = \frac{(x^2 + \tan^2\theta)^{\frac{1}{2}}}{x + 1.744(x + 1.182)^{-0.733}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Ecuación 8. Donde k es el valor del coeficiente de extinción, θ es el ángulo cenital ($^\circ$), x es la relación del largo de la horizontal e y vertical del elipsoide (Ecuación 10).

El Modelo de Lang (1987) permite la estimación del IAF de una forma simple (Ecuación 9), utilizando la transmitancia del haz solar directo. El IAF se estima mediante una regresión lineal en función del ángulo cenital solar, debido a esto, el modelo representa un valor de IAF para una escala temporal acotada por la posición del sol, pero permite entender la variabilidad de la excentricidad del elipsoide de la dosel (Ecuación 10).

$$L = 2(A + B) \quad (\text{Ec. 9})$$

$$x = \exp\left(-\frac{B}{0.4L}\right) \quad (\text{Ec. 10})$$

APÉNDICES

Apéndice 1. Característica de los parrones

Cuadro 15. Marco de plantación y características del sistema de riego de los campos en estudio.

Ubicación	Cuartel	Portainjerto	Marco plantación (m)	Nº Líneas	Descarga emisores (Lh ⁻¹)	Distancia emisores (m)
Vicuña	C4	Franco	3x2	2	2	0,8
Vicuña	C9	Harmony	3x2	2	2	0,8
San Esteban	M1	Harmony	3x2	2	4	1
Rinconada	A1	Harmony	3,5x2,5	1	4	0,8
Rinconada	T1	Harmony	3,5x2,5	1	4	0,8
Calera de Tango	THH	Harmony	3x2	2	4	1
Calera de Tango	THS	Franco	3x2	2	4	1
San Vte. TaguaTagua	SL21	Paulsen	3,5x2,5	2	2,1	0,6
San Vte. TaguaTagua	FRU7	Paulsen	3,5x2,5	2	2,1	0,6

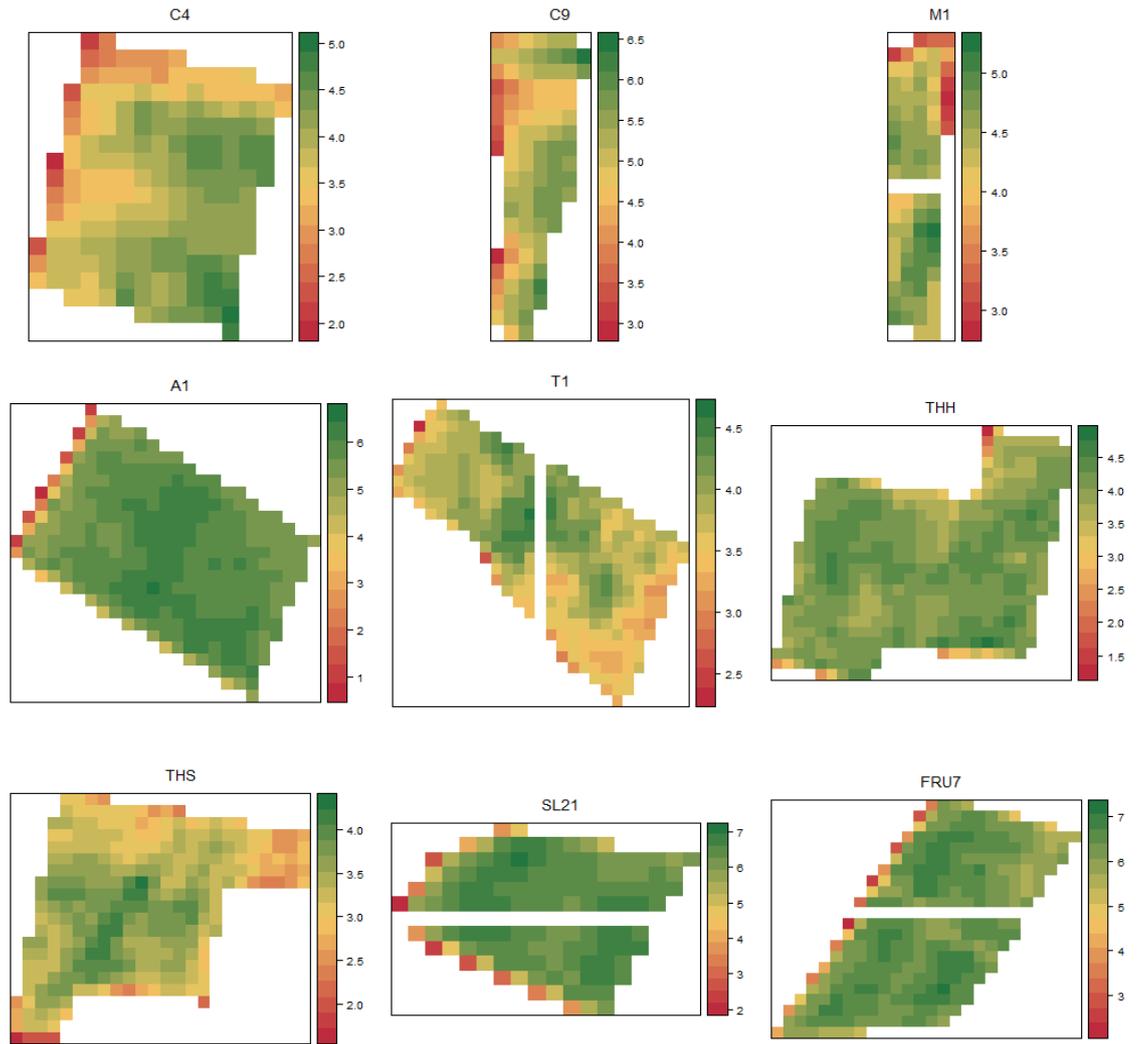
Apéndice 2. Evolución espacio temporal del IAF para la temporada 2019-2020

Figura 11. Cartografía de IAF en el momento de máxima cobertura foliar de cada predio.

Apéndice 3. Gráficos de dinámica de humedad del perfil de suelo.

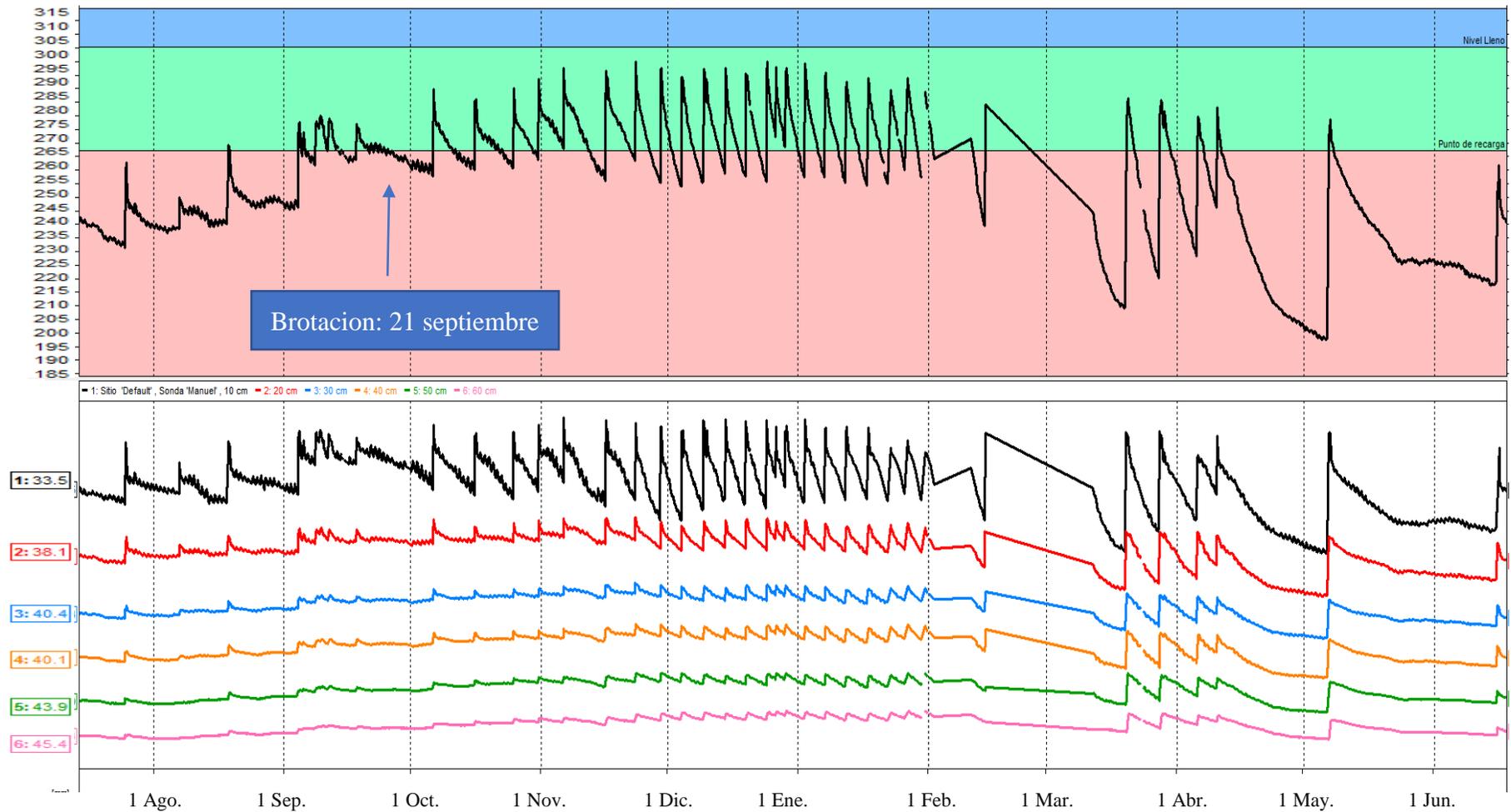


Figura 12. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel M1 en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 10 cm a 60 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 10 cm (Abajo).

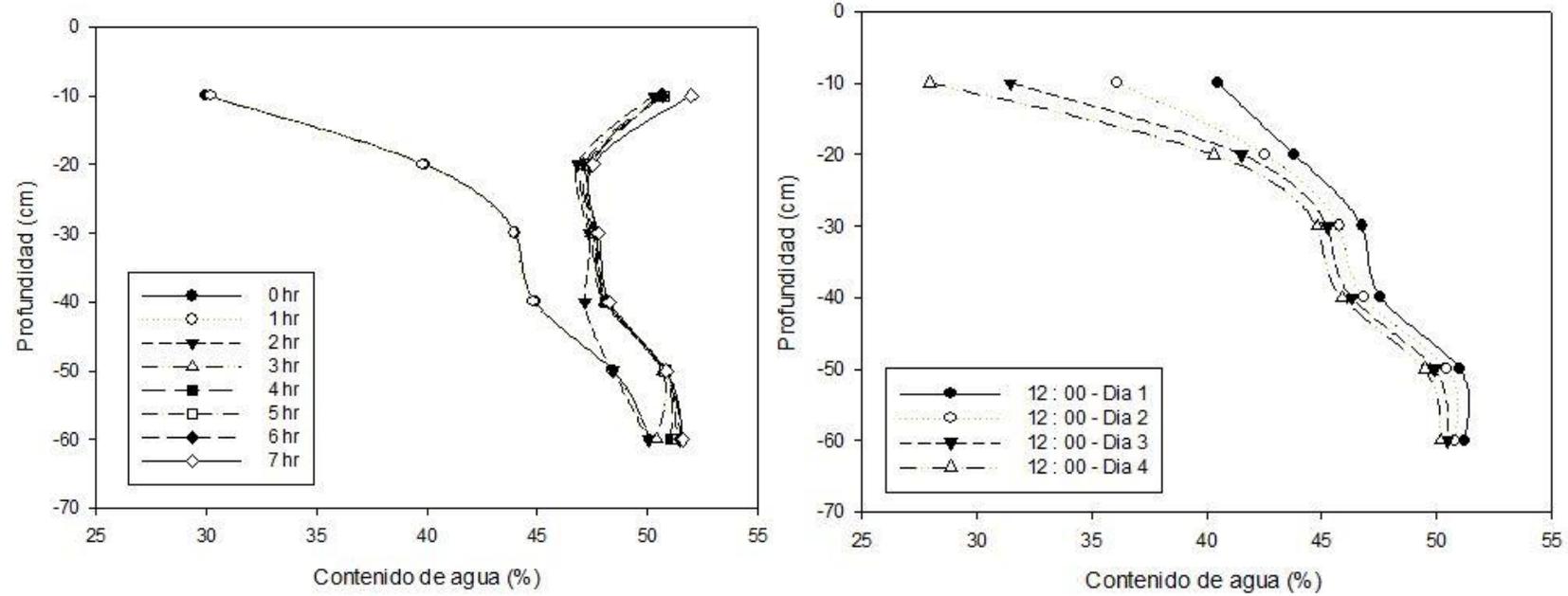


Figura 13. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel M1. Riego común durante diciembre (izquierda). Ciclo típico de 4 días entre riegos durante diciembre (derecha).

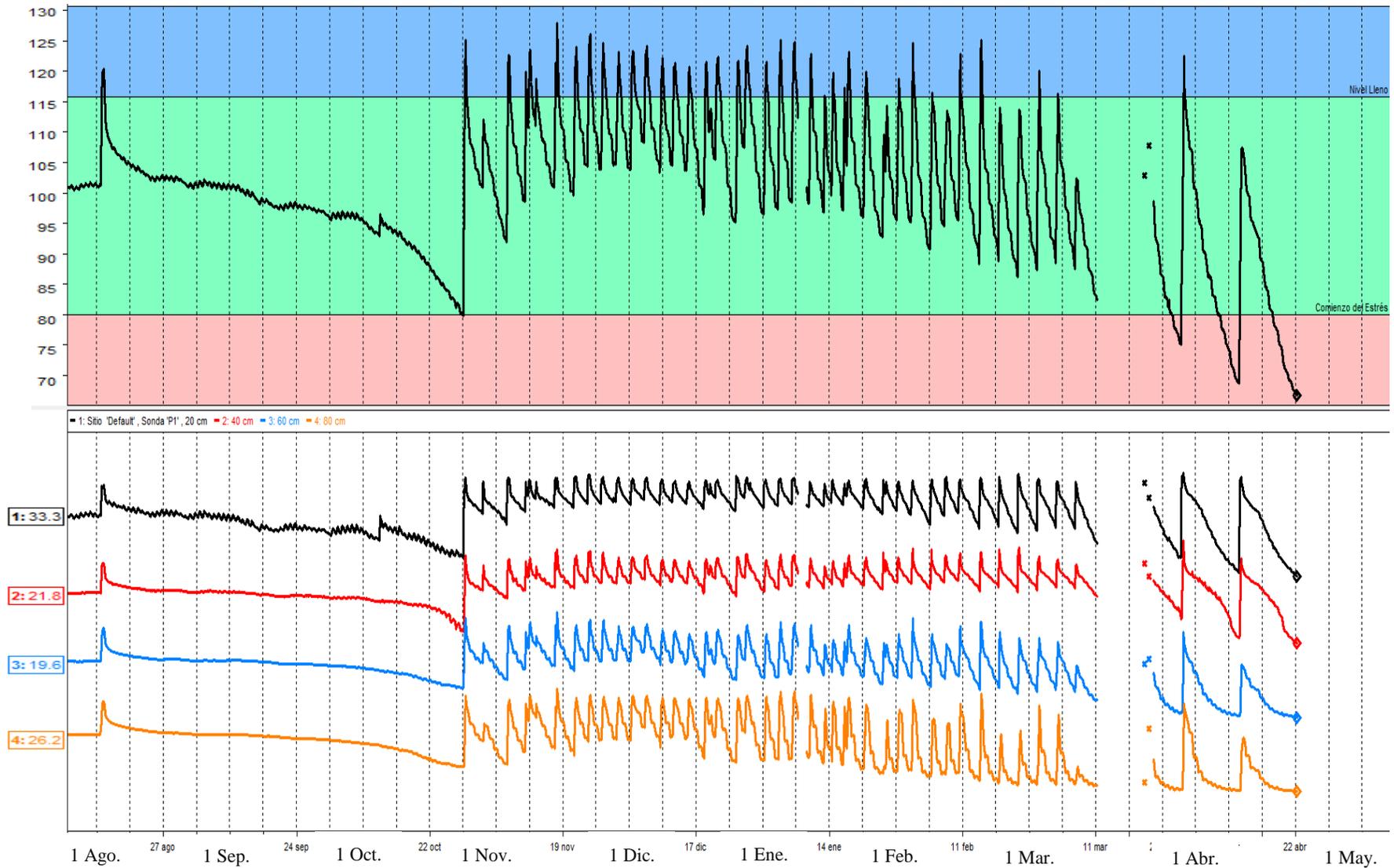


Figura 14. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel A1 en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 10 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

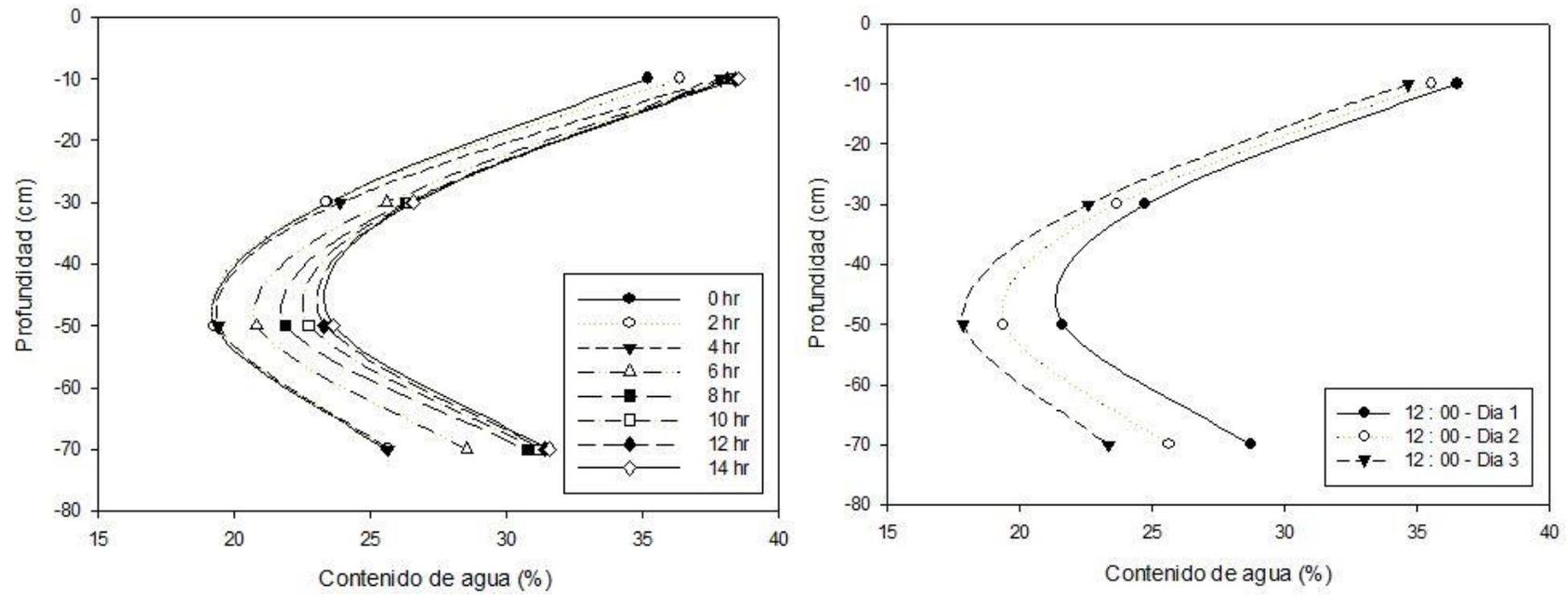


Figura 15. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel A1. Riego común durante diciembre (izquierda). Ciclo típico de 3 días entre riegos durante diciembre (derecha).

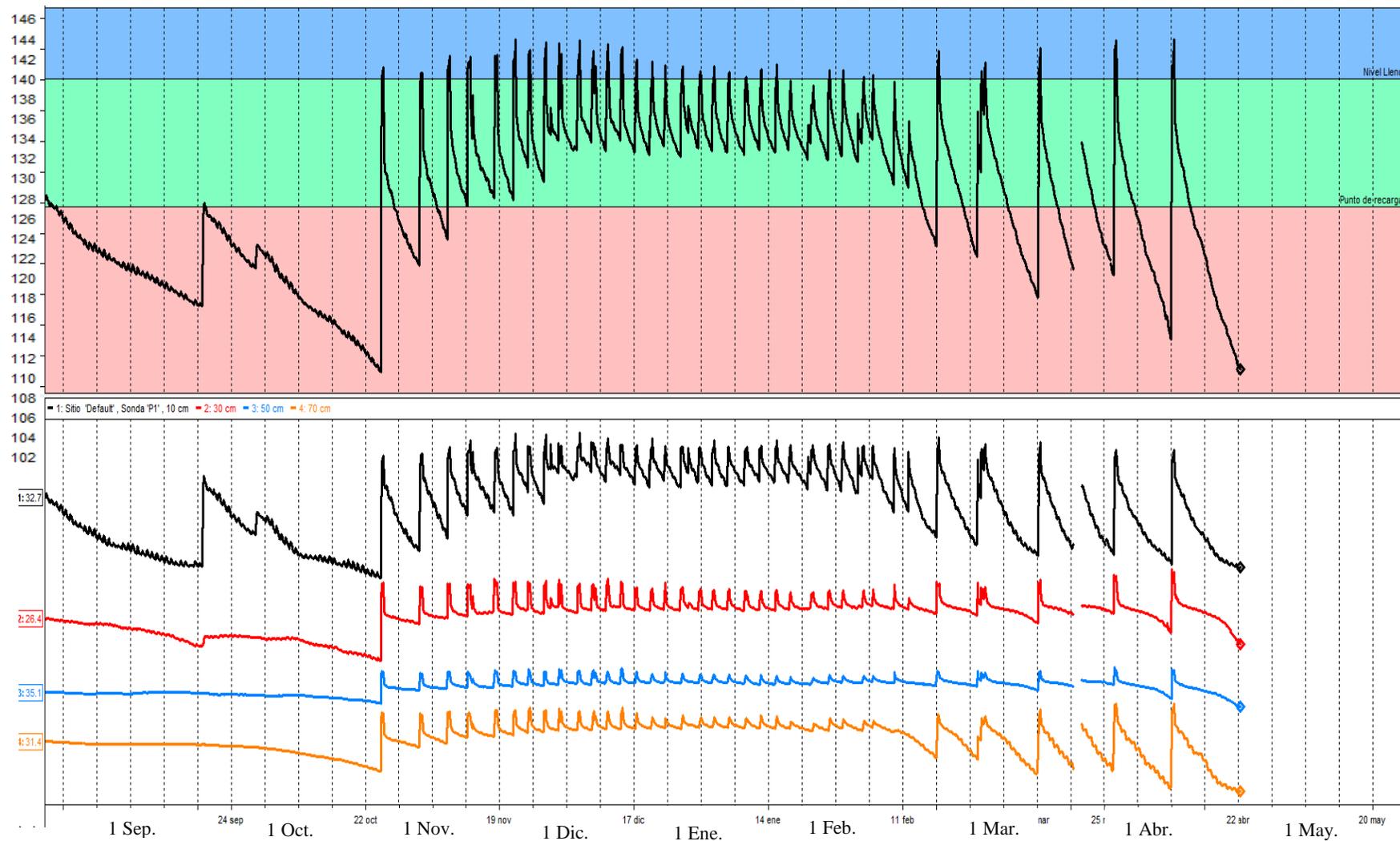


Figura 16. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel T1 en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 10 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

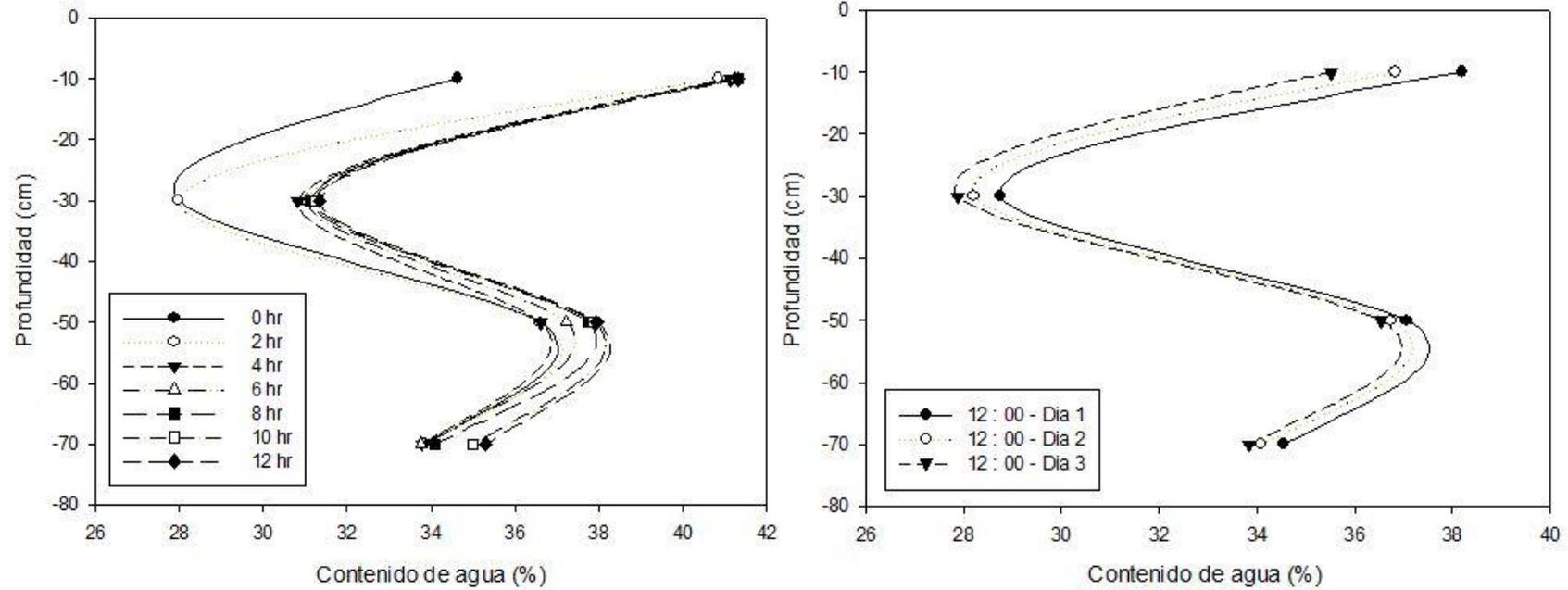


Figura 17. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel T1. Riego común durante diciembre (izquierda). Ciclo típico de 3 días entre riegos durante diciembre (derecha).

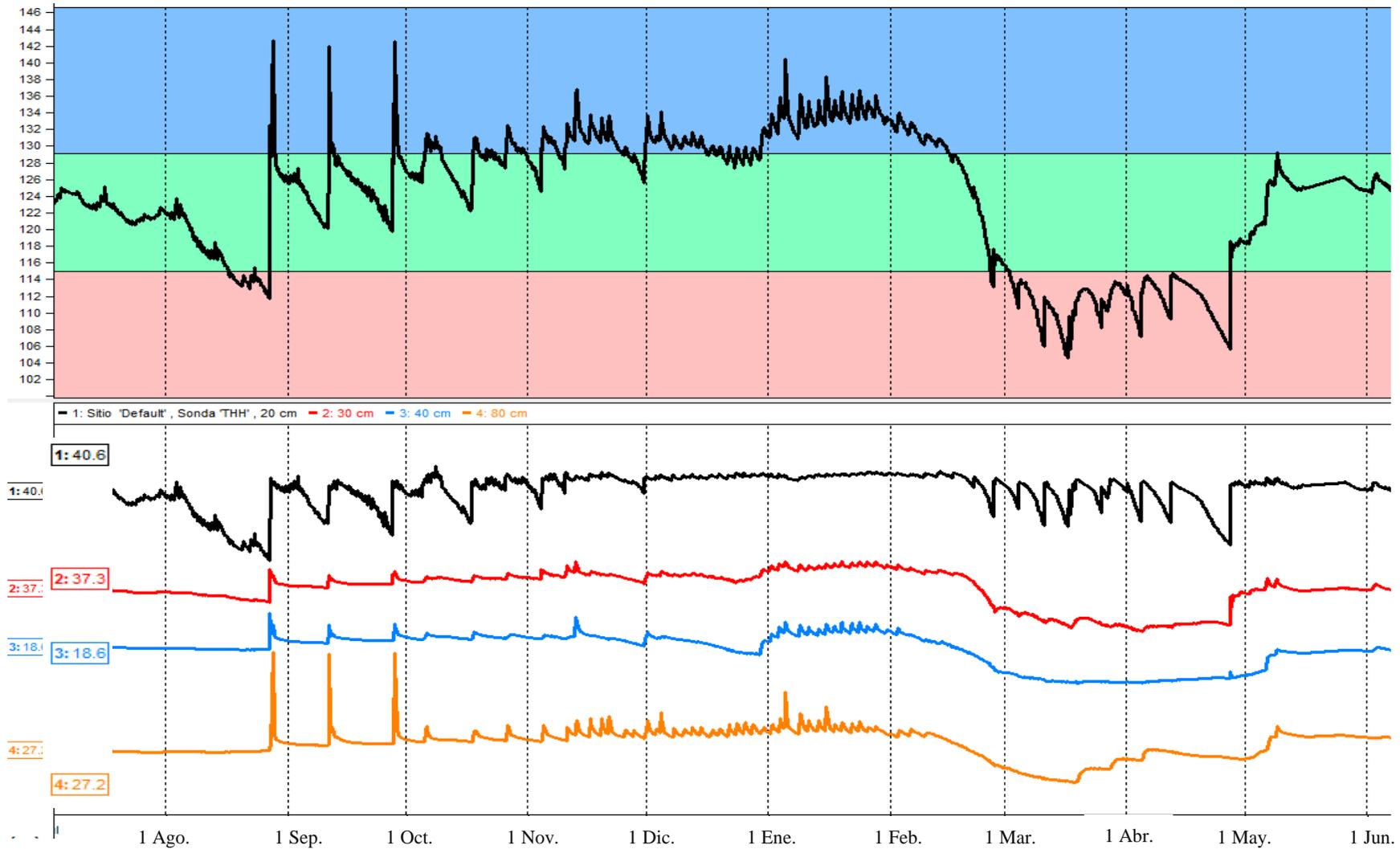


Figura 18. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel THH en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 20 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores a 20, 30, 40 y 80 cm (Abajo).

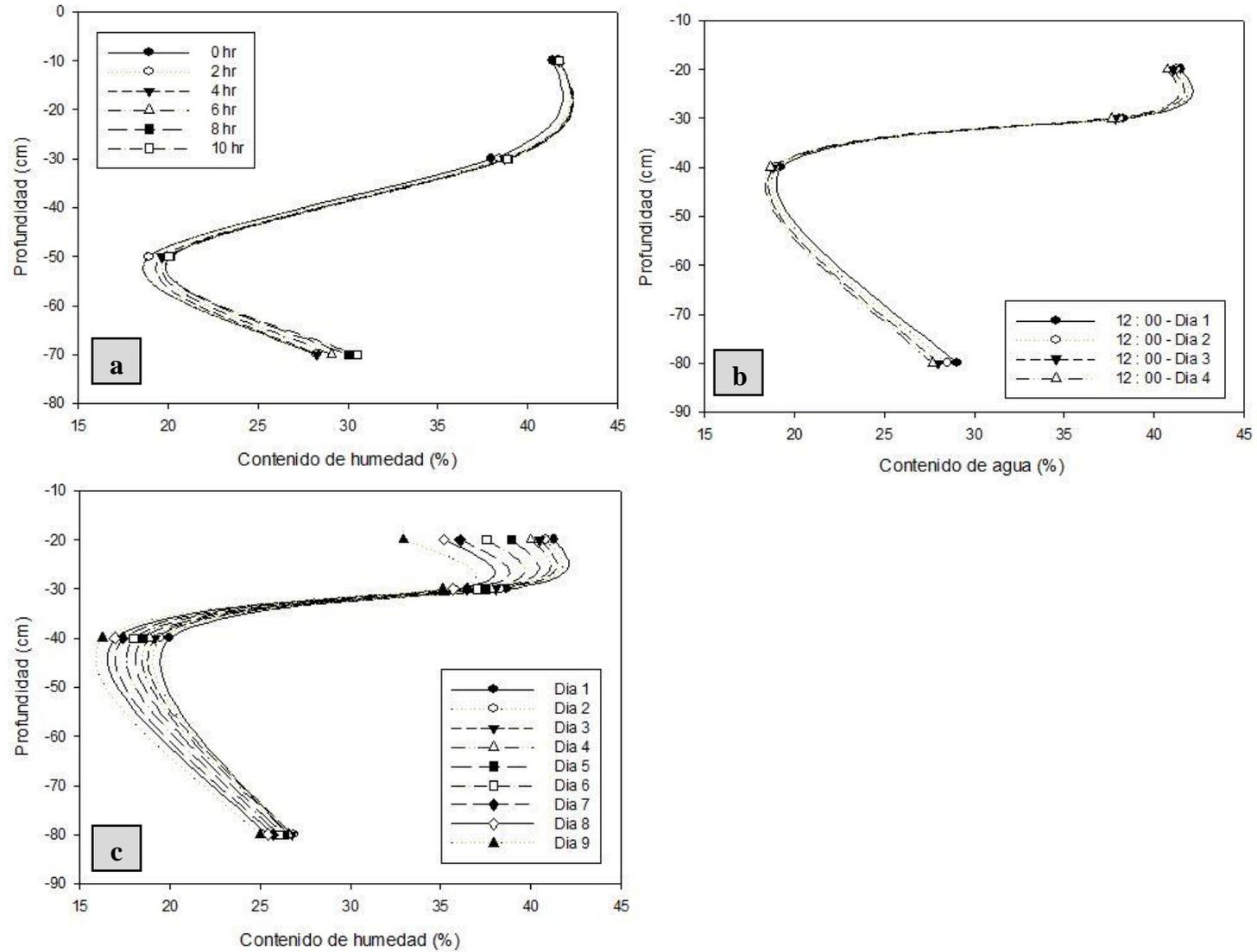


Figura 19. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel THH. Riego común durante diciembre (a). Ciclo típico de 3 días entre riegos durante diciembre (b). Ciclo sin riegos al fin de la temporada en abril (c).

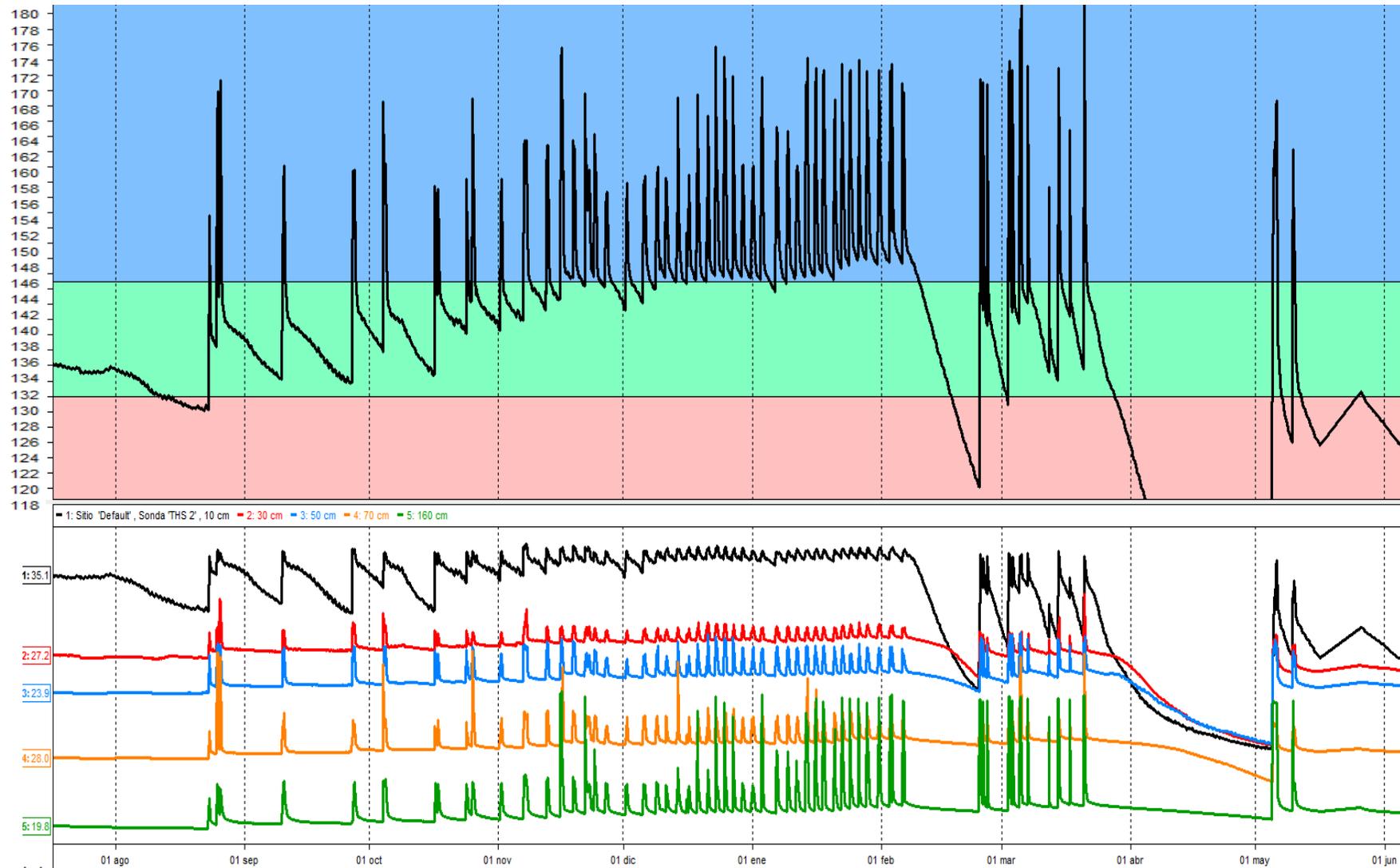


Figura 20. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel THS en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 10 cm a 160 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores a 10, 30, 50, 70 y 160 cm (Abajo).

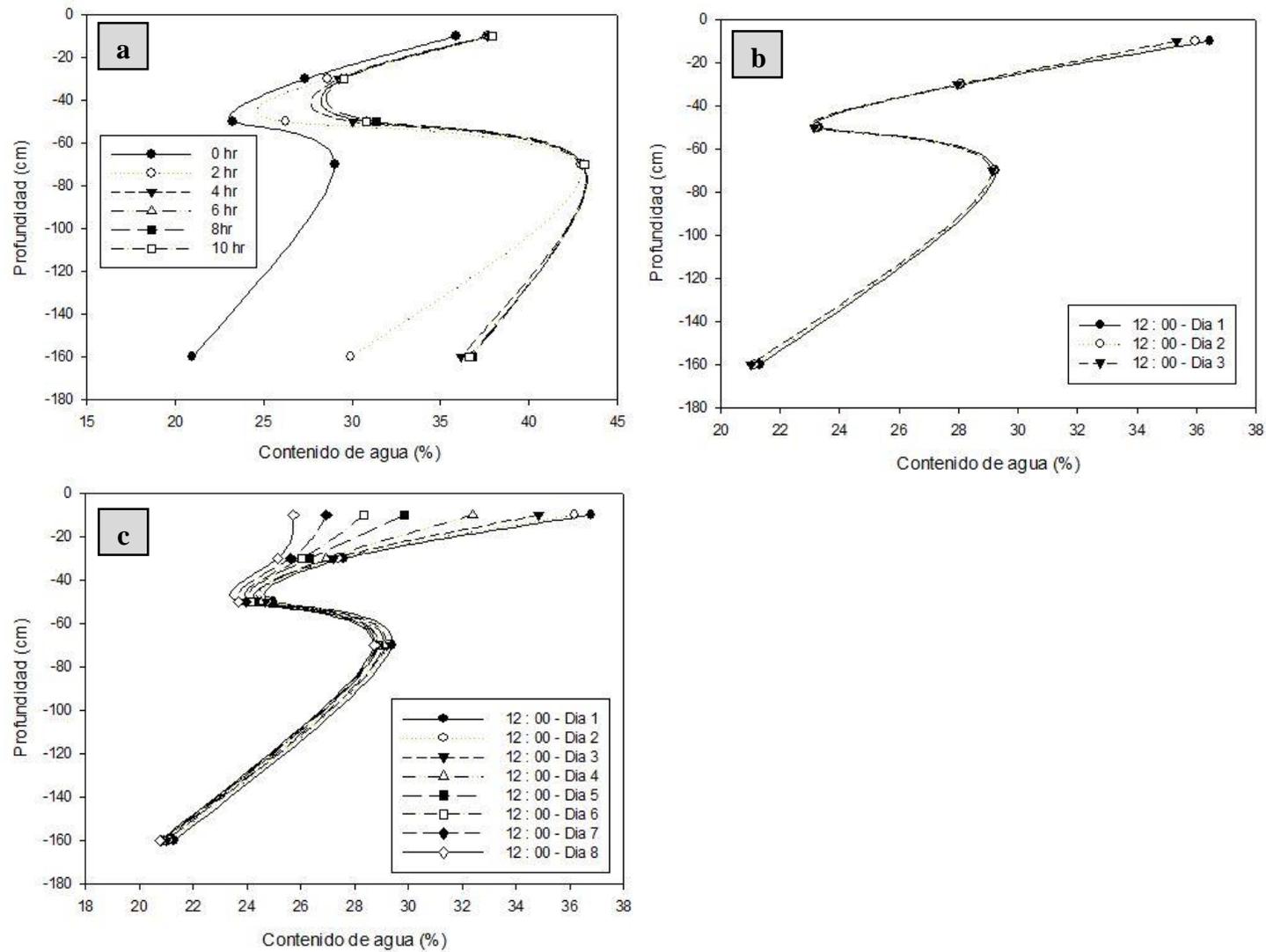


Figura 21. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel THS. Riego común durante diciembre (a). Ciclo típico de 3 días entre riegos durante diciembre (b). Ciclo sin riegos al fin de la temporada (c).

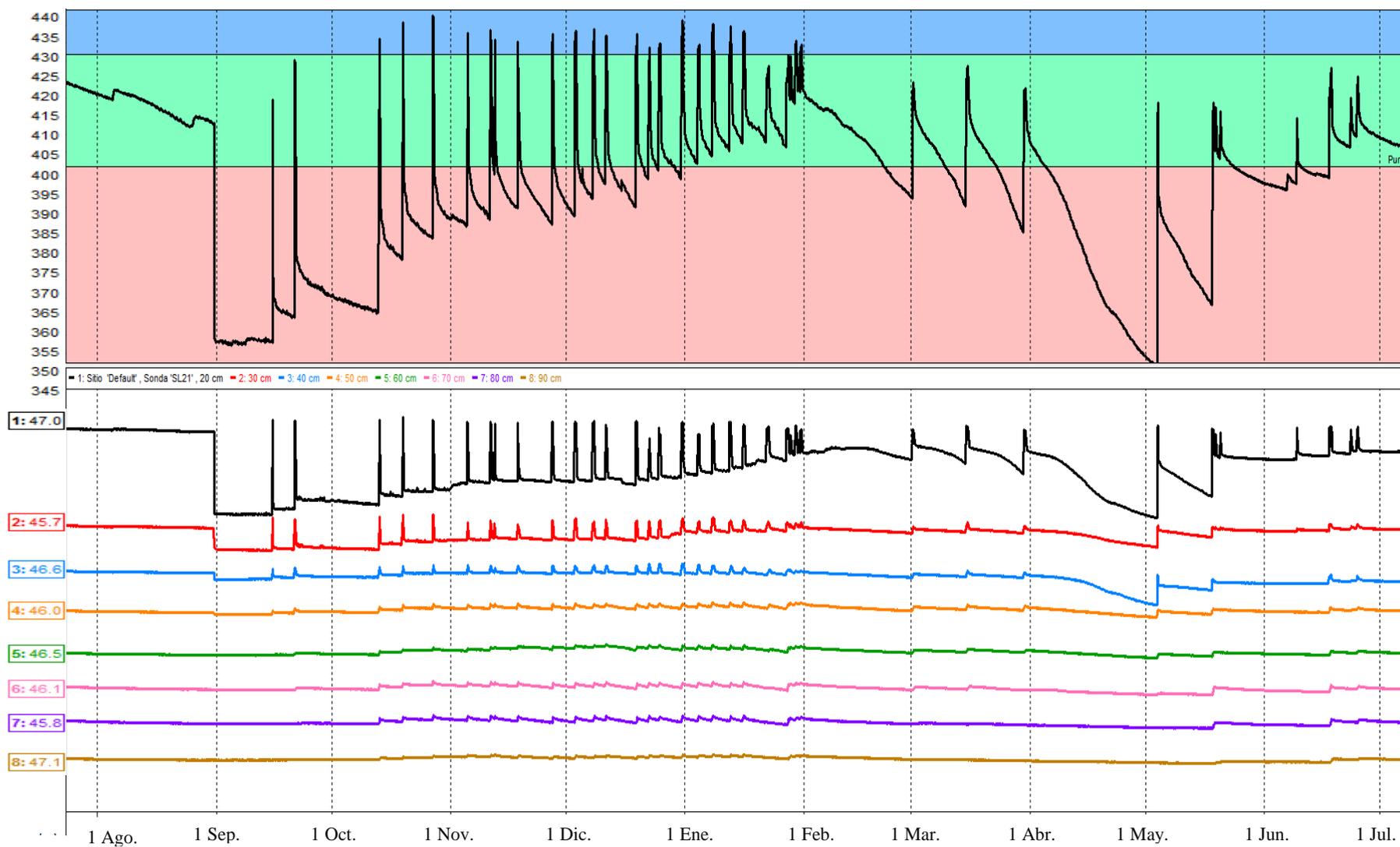


Figura 22. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel SL21 en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 20 cm a 90 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 10 cm (Abajo).

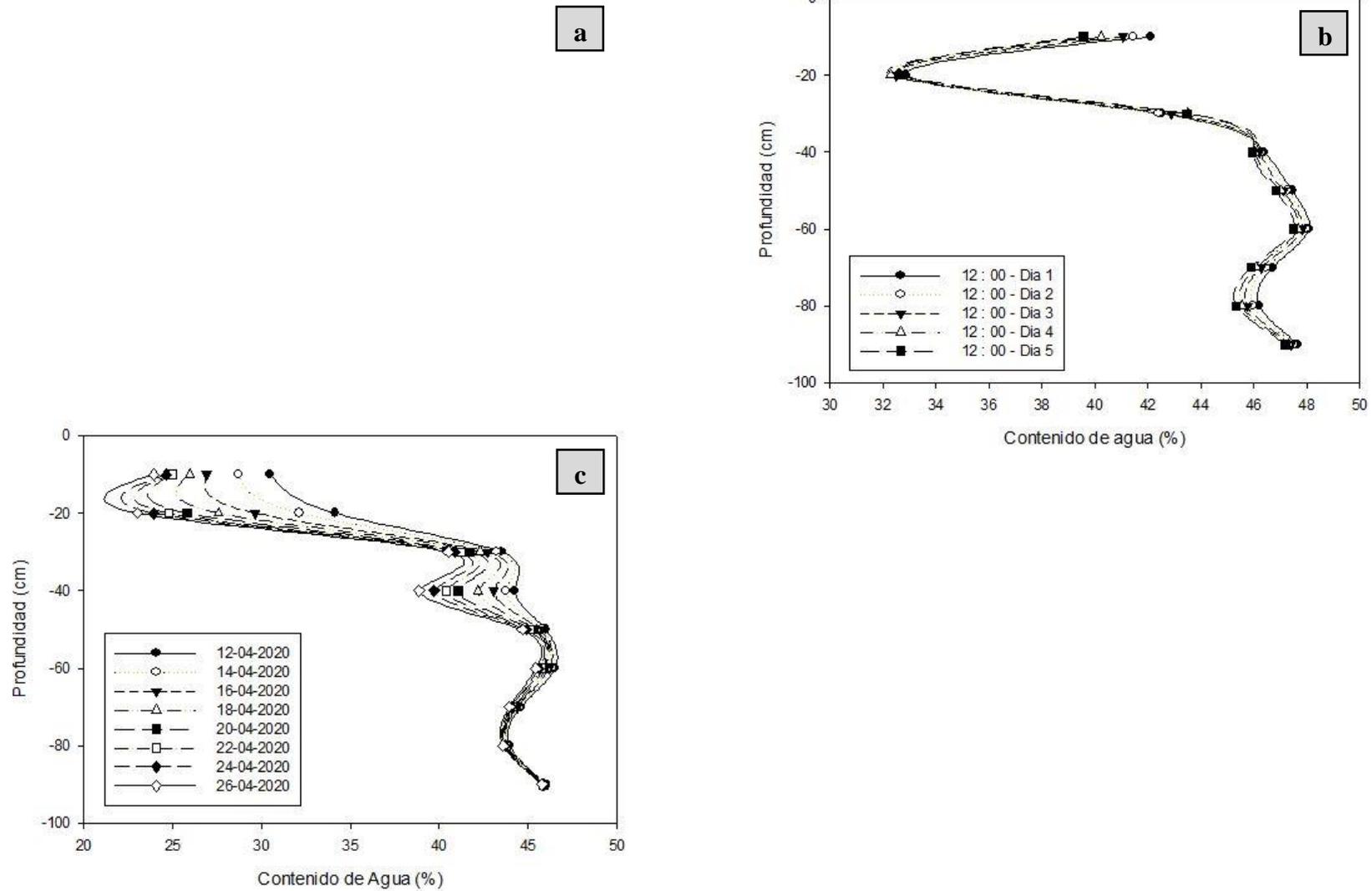


Figura 23. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel SL21. Riego común durante diciembre (a). Ciclo típico de 4-5 días entre riegos durante diciembre (b). Ciclo sin riegos al fin de la temporada (c).

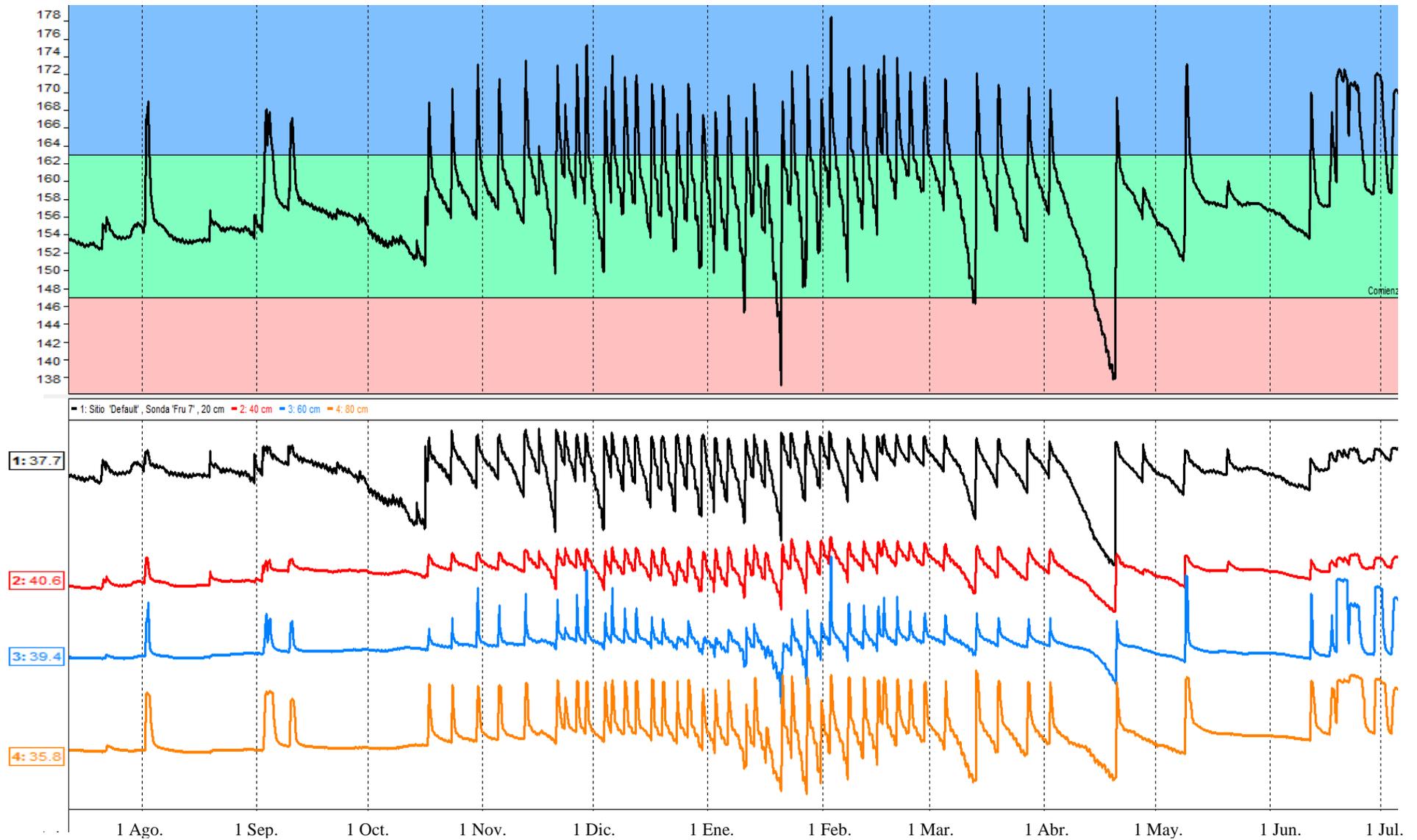


Figura 24. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel FRU7 en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 20 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

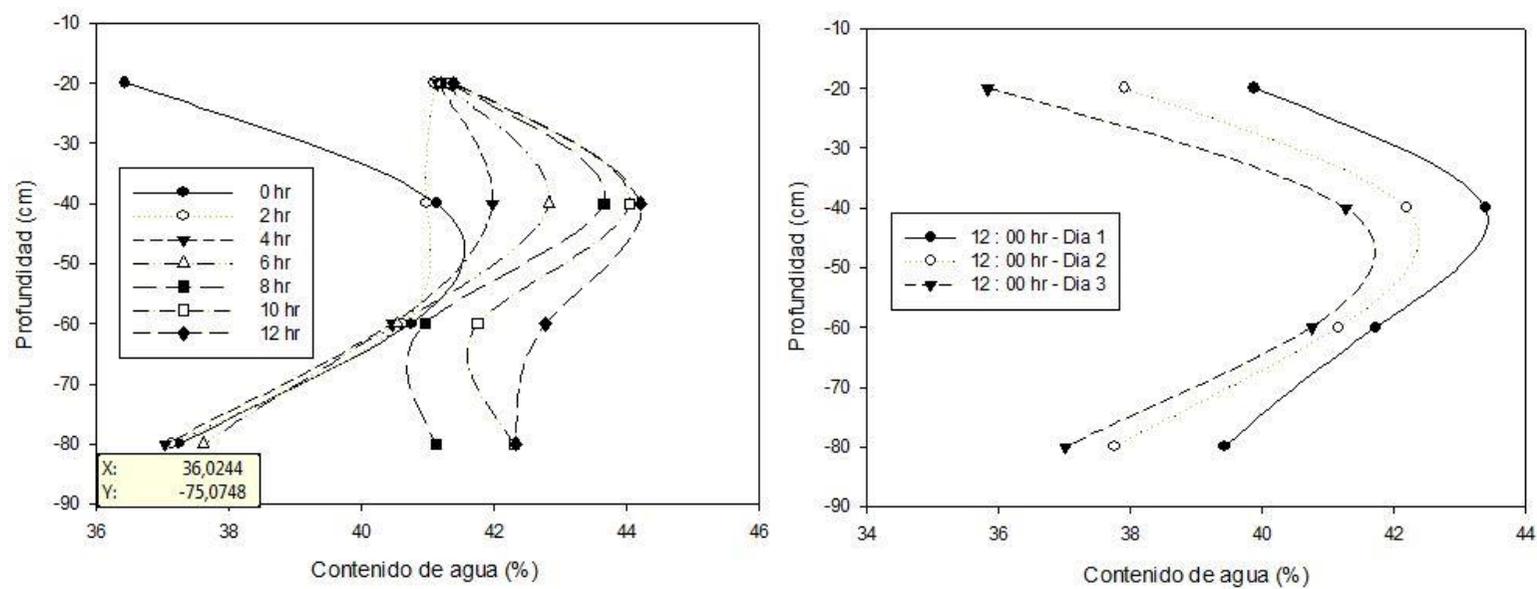


Figura 25. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo en cuartel FRU7. Riego común durante diciembre (a). Ciclo típico de 3 días entre riegos durante diciembre (b).

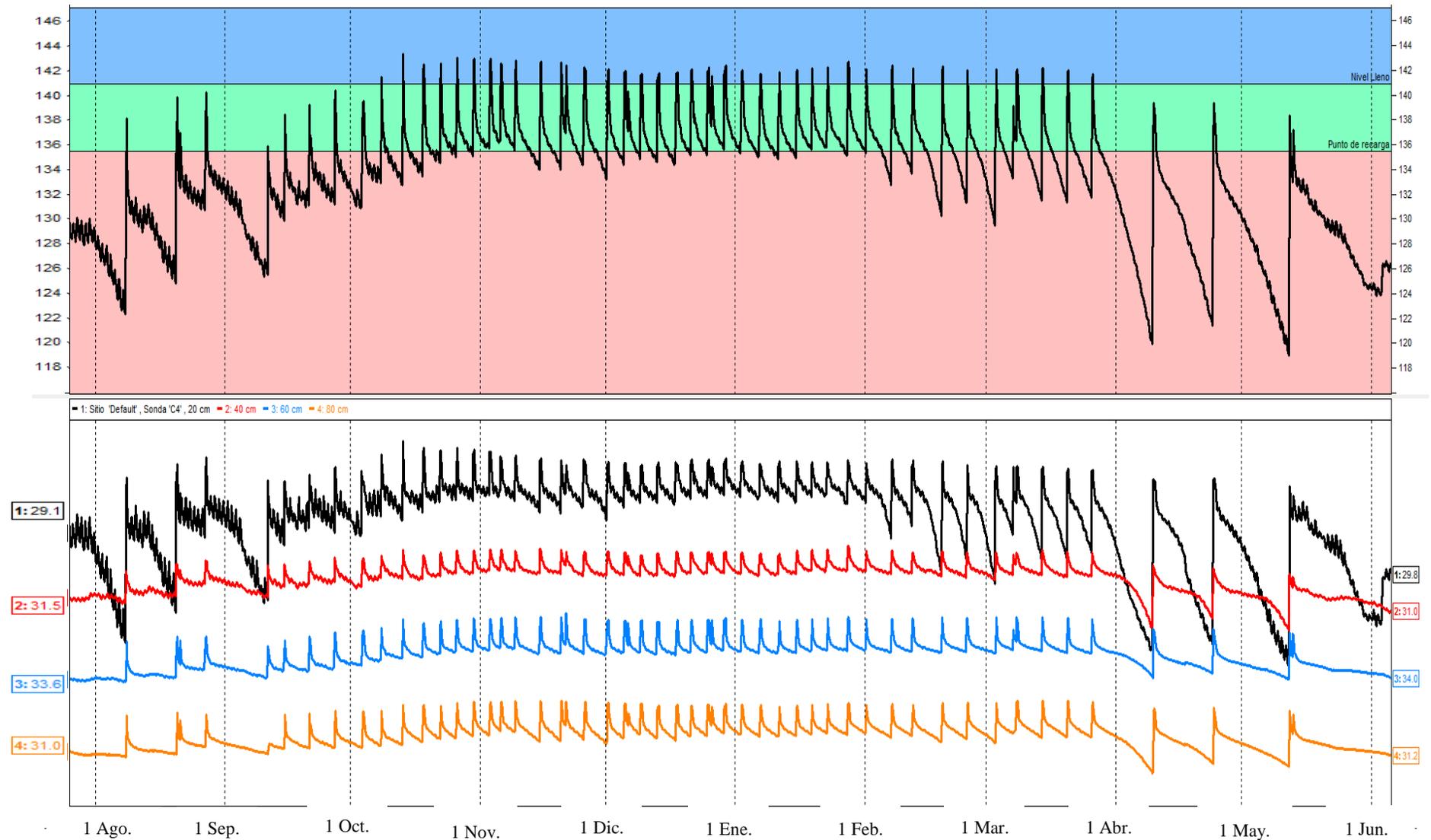


Figura 26. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C4 en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 20 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

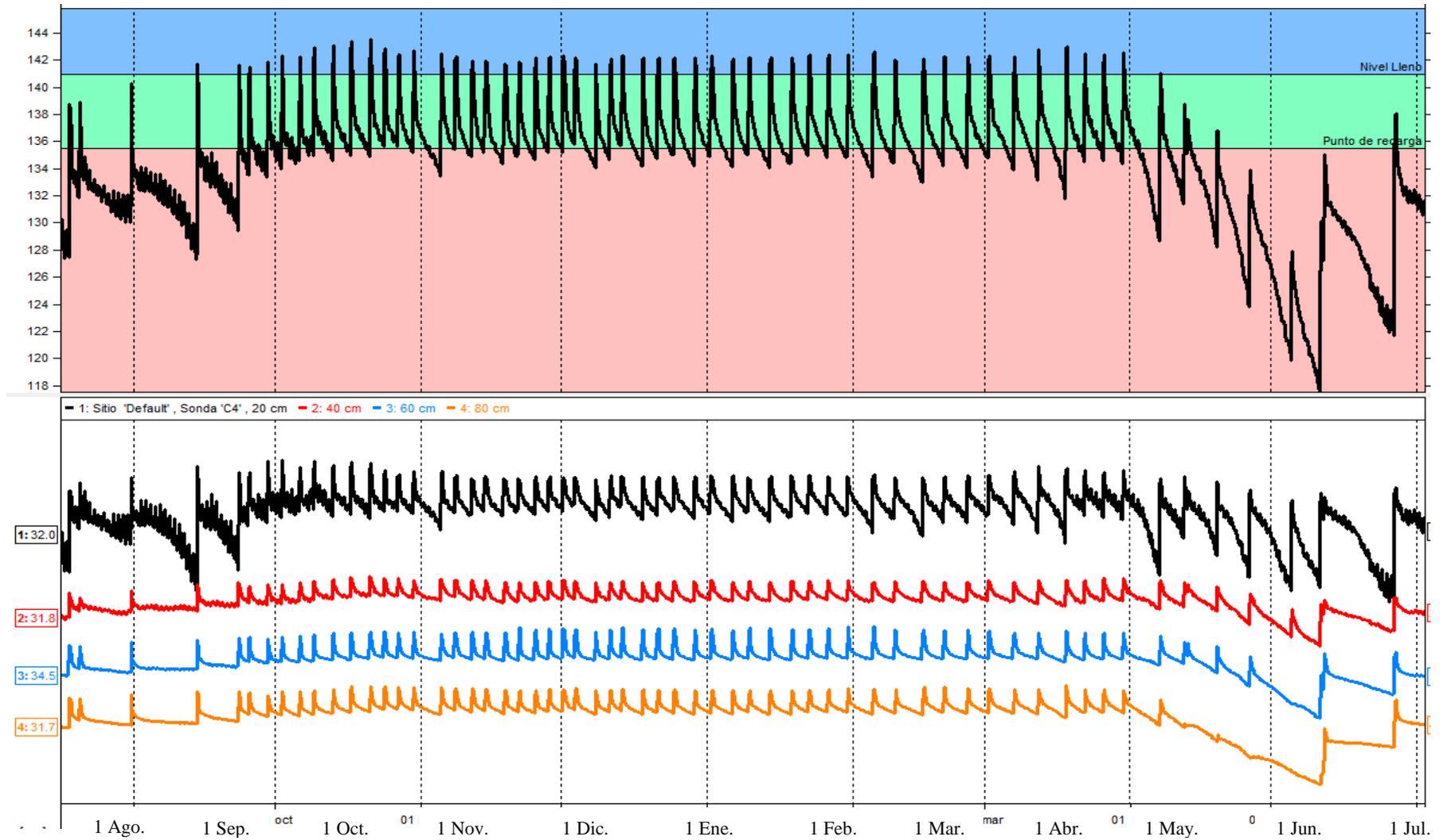


Figura 27. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C4 en la temporada 2020-2021. Gráfico sumado 20 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

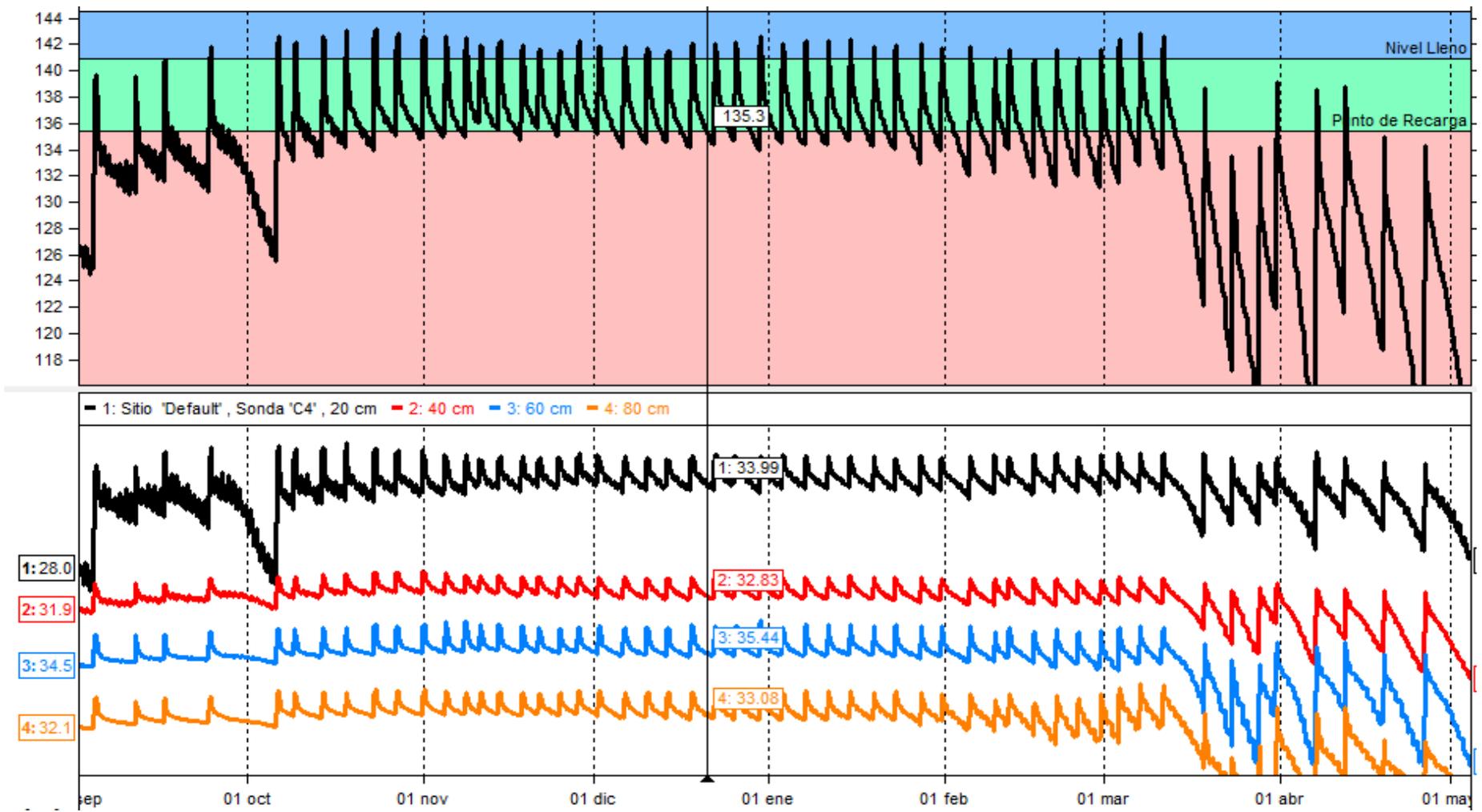


Figura 28. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C4 en la temporada 2020-2021. Gráfico sumado 20 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

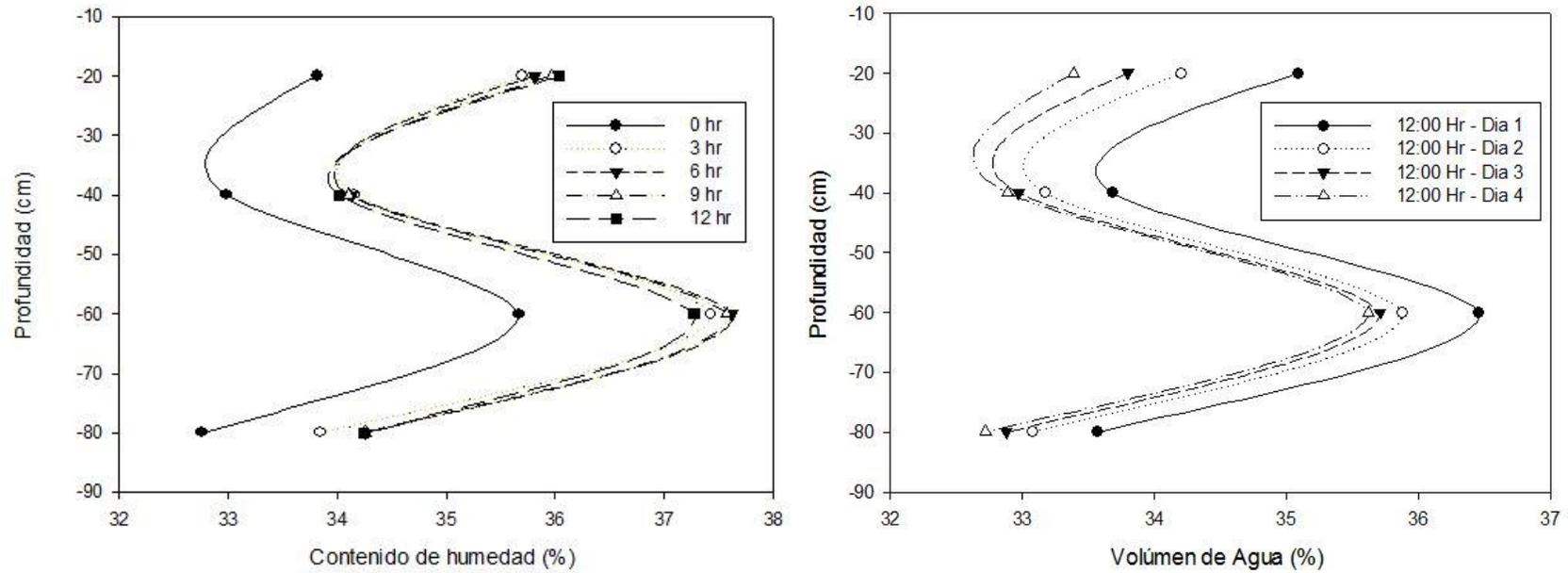


Figura 29. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo. Riego común durante diciembre (a). Ciclo típico de 4 días entre riegos durante diciembre (b).

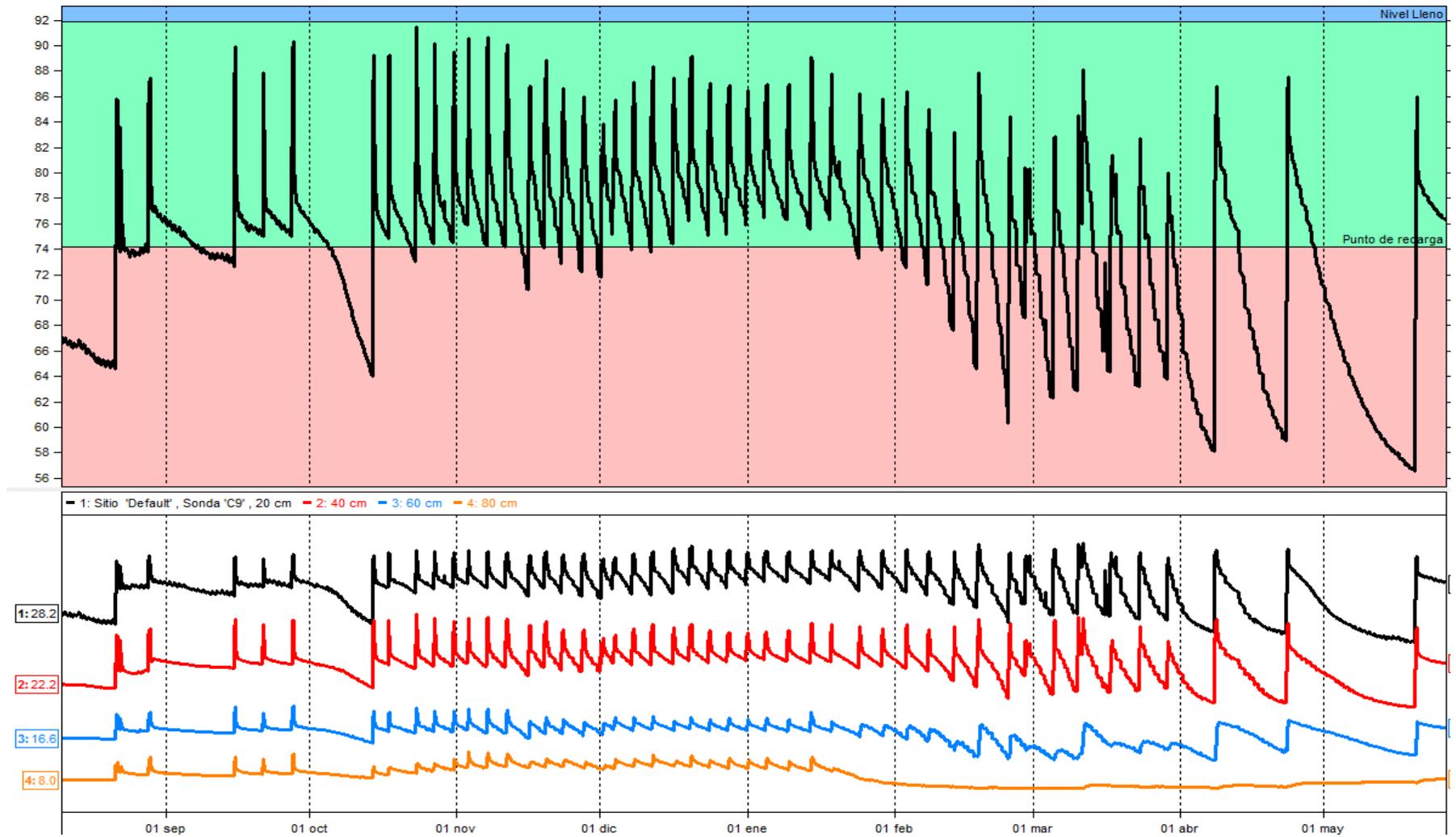


Figura 30. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C9 en la temporada 2019-2020. Gráfico sumado 20 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

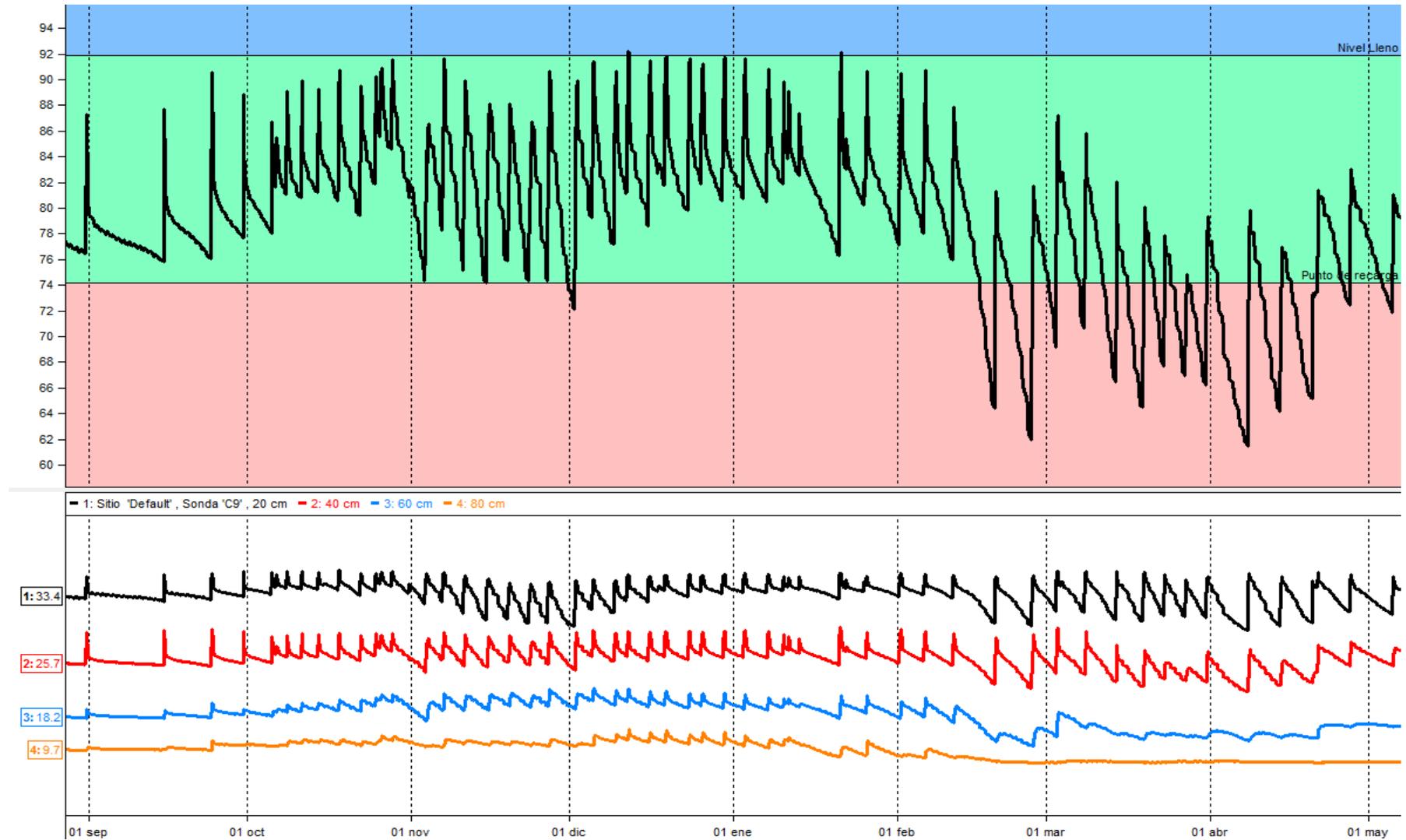


Figura 31. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C9 en la temporada 2020-2021. Gráfico sumado 20 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

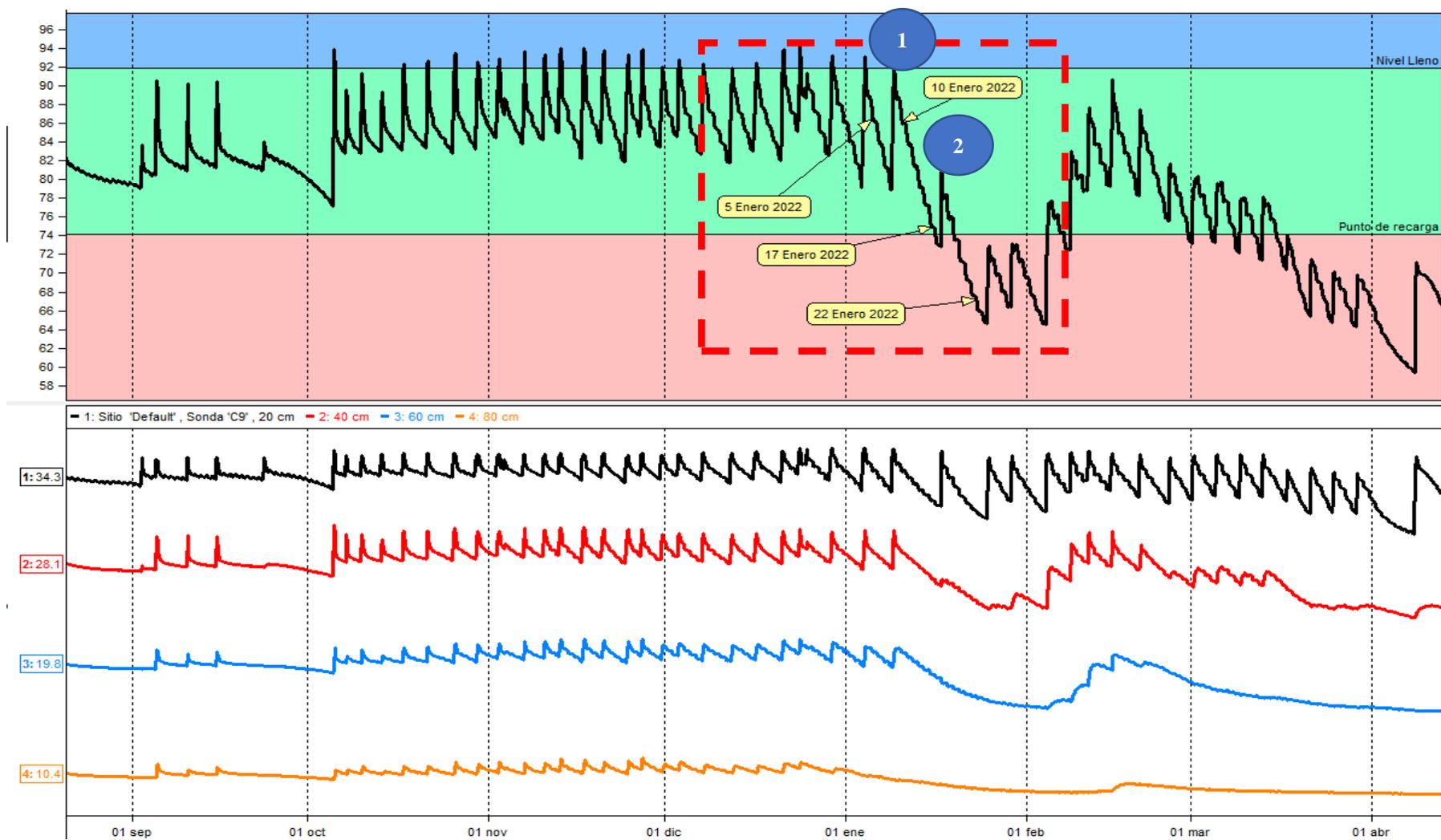


Figura 32. Dinámica del contenido de agua en el perfil de suelo para el cuartel C9 en la temporada 2021-2022. Gráfico sumado 20 cm a 80 cm (Arriba). Gráfico apilado con sensores cada 20 cm (Abajo).

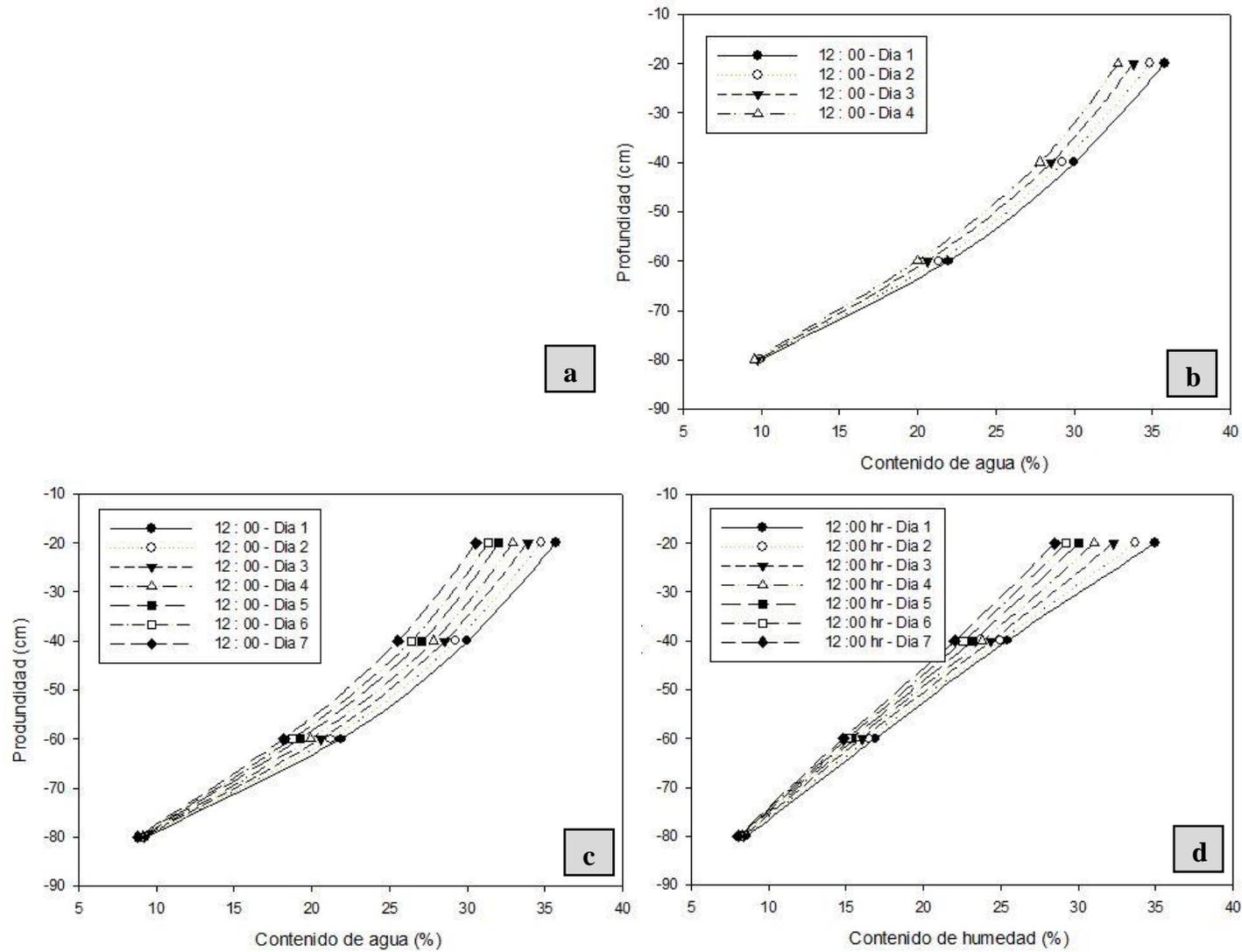


Figura 33. Contenido de agua del suelo en profundidad y a través del tiempo. Riego común durante diciembre (a). Ciclo normal entre riegos comenzando 1 de enero (b). Ciclo 1 entre riegos extendidos comenzando el 8 de enero (c) y Ciclo 2 entre riegos extendidos comenzando 17 enero (d).

Apéndice 4. Componentes del balance hídrico en parrones del grupo de análisis 2

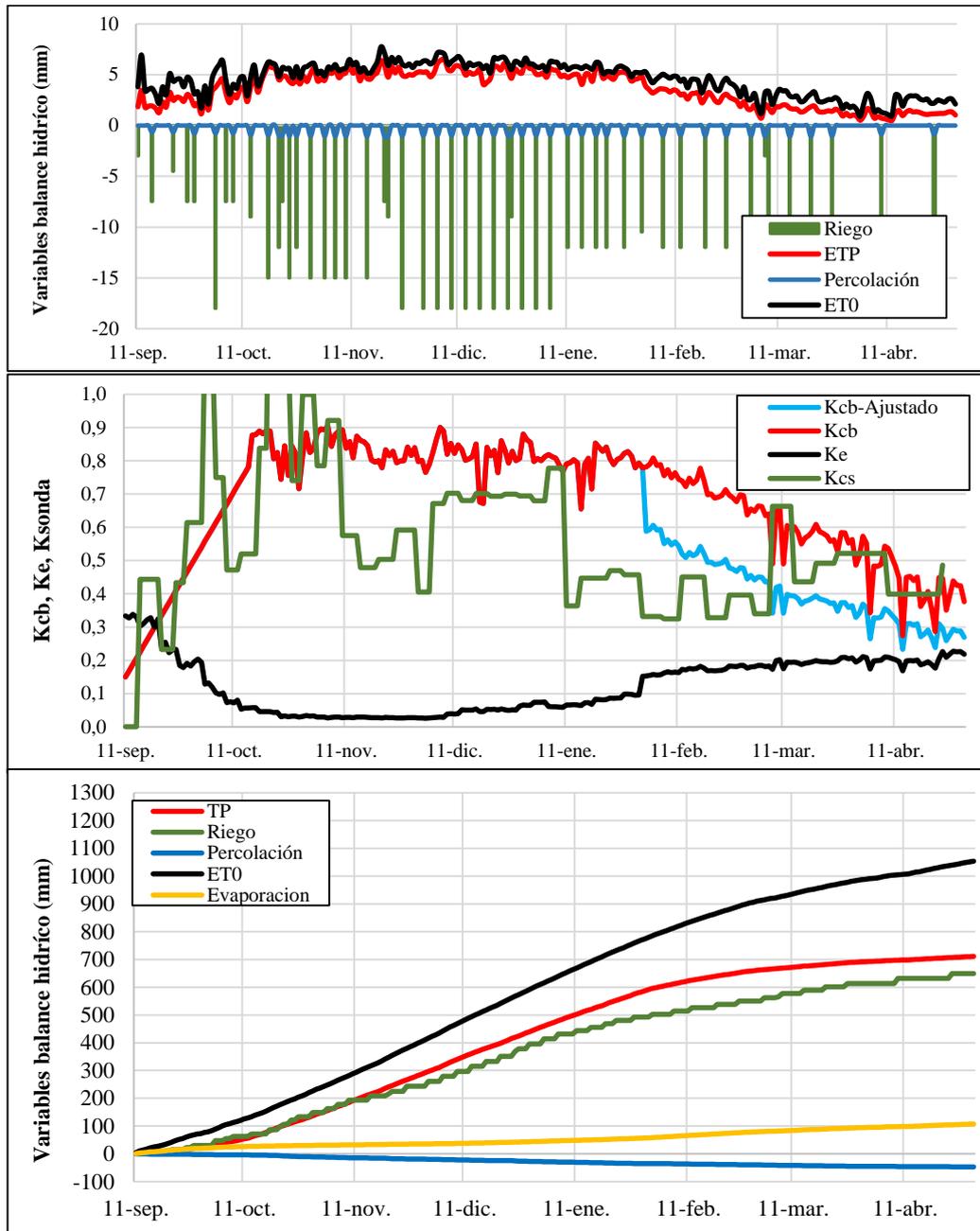


Figura 34. Componentes del balance hídrico para el cuartel C4 en temporada 2019-2020.

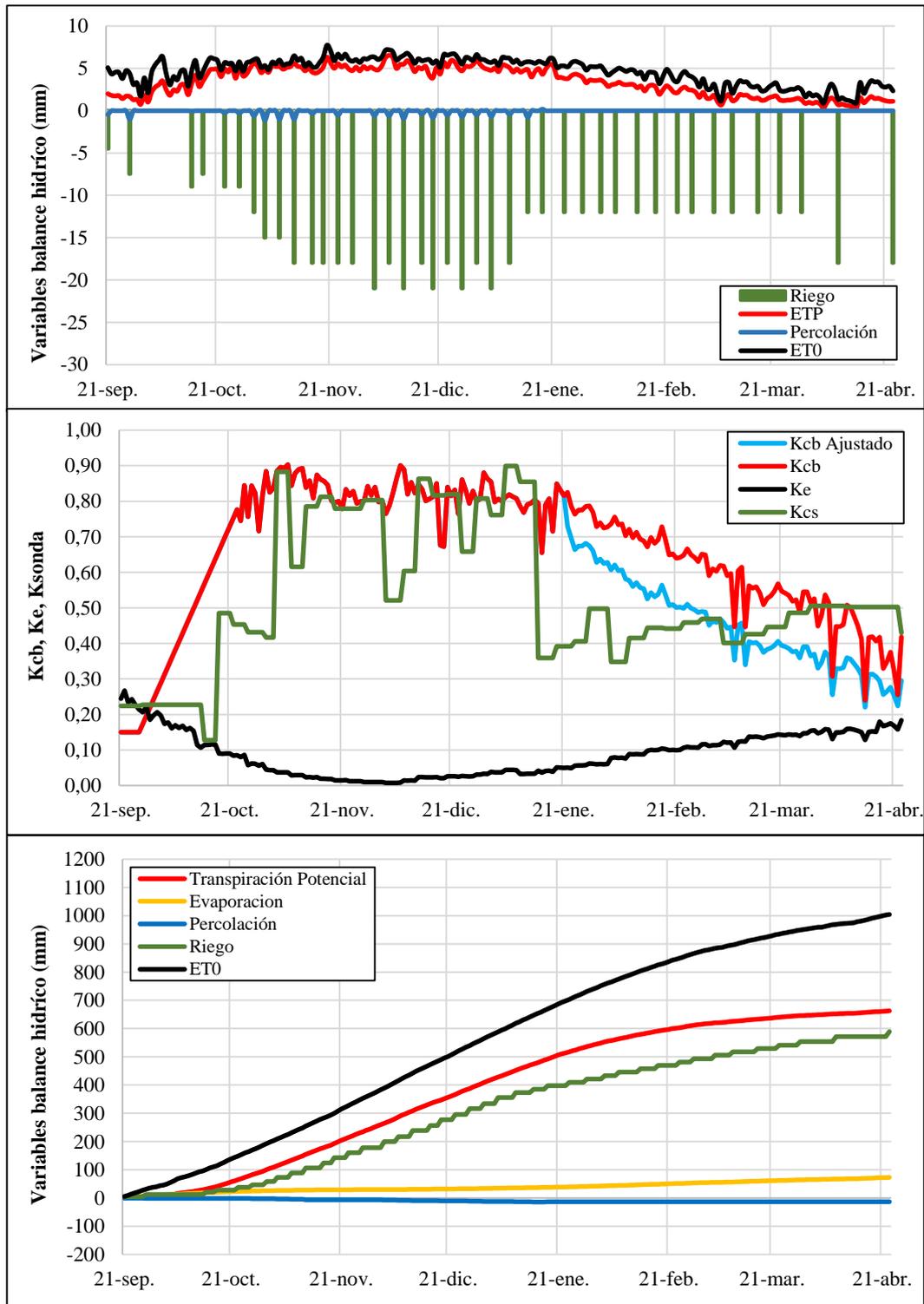


Figura 35. Componentes del balance hídrico para el cuartel C9 en temporada 2019-2020.

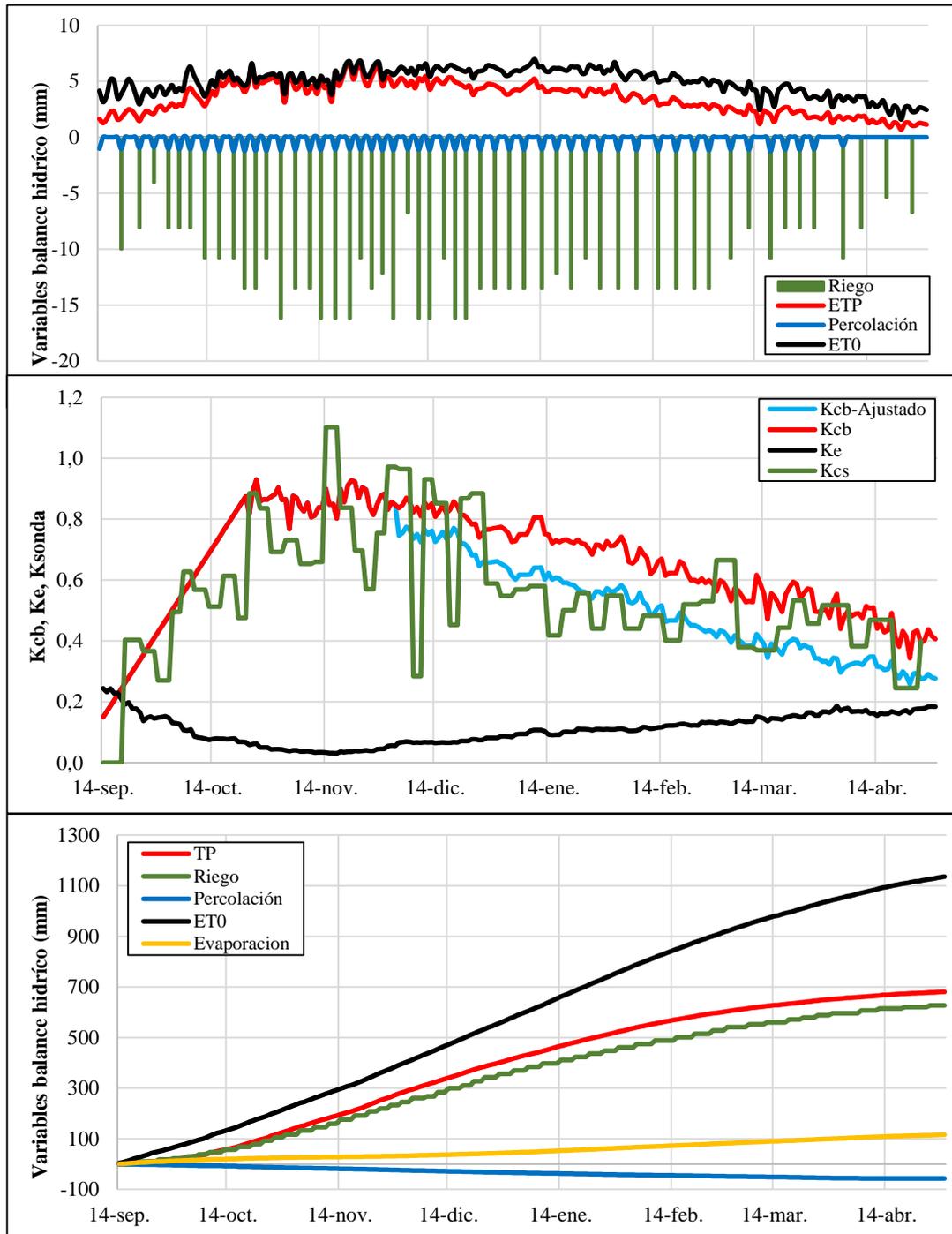


Figura 36. Componentes del balance hídrico para el cuartel C4 en temporada 2020-2021.

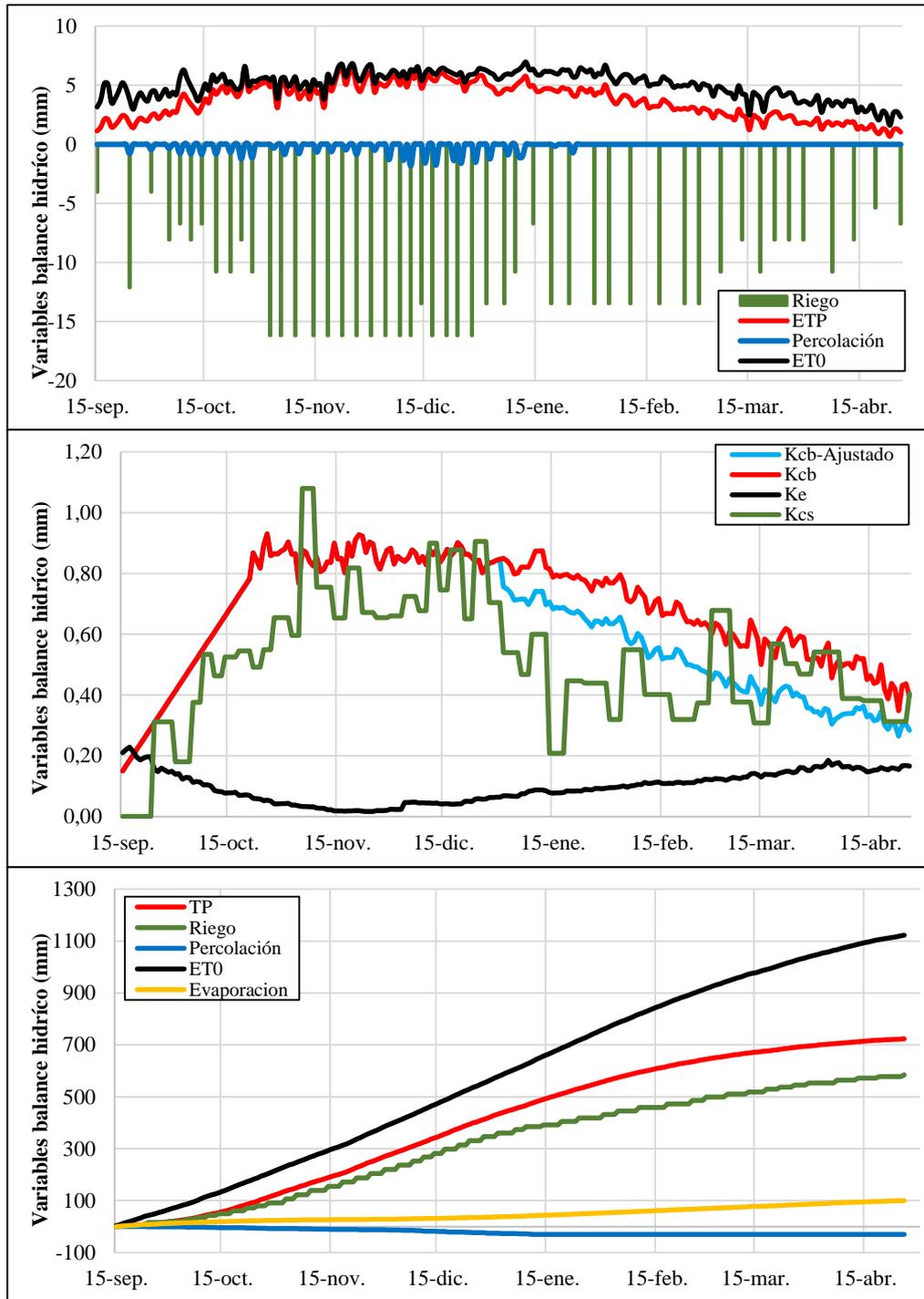


Figura 37. Componentes del balance hídrico para el cuartel C9 en temporada 2020-2021.

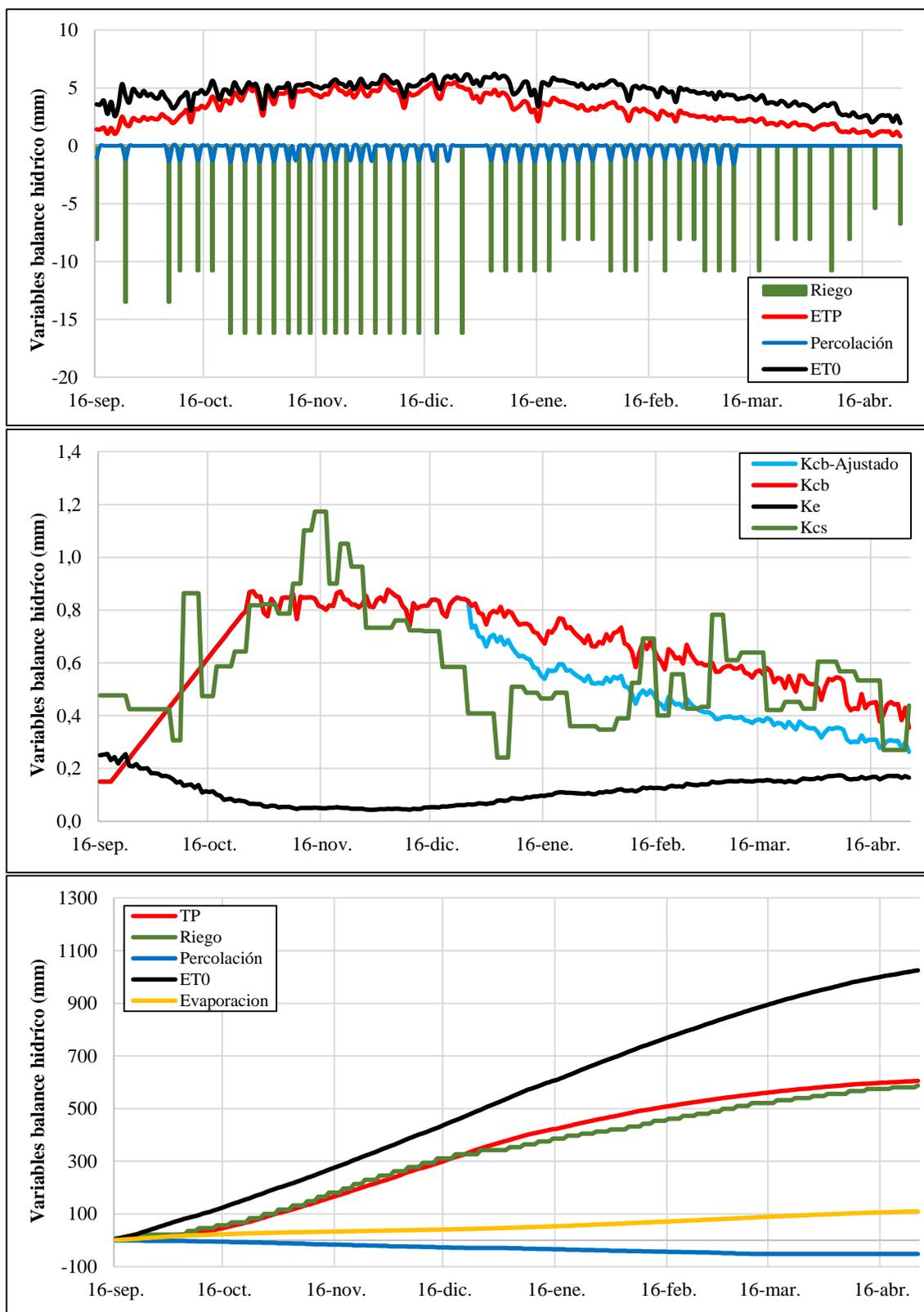


Figura 38. Componentes del balance hídrico para el cuartel C4 en temporada 2021-2022.

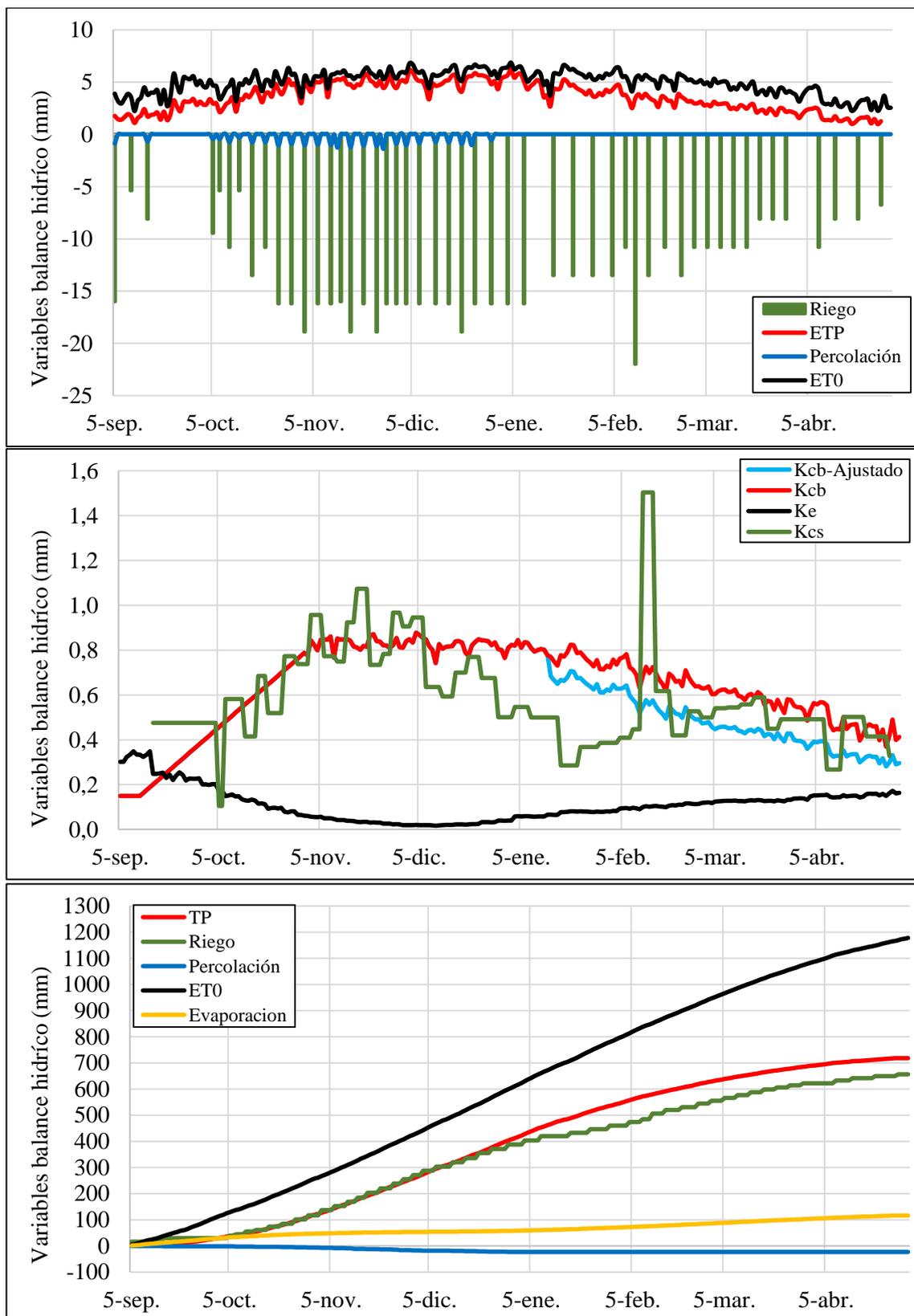


Figura 39. Componentes del balance hídrico para el cuartel C9 en temporada 2021-2022.

Apéndice 5. Propuesta de extrapolación de Kcs

Propuesta para la estimación de volúmenes de riego en parrones sin sensores de humedad de suelo

Los manejos agronómicos llevados a cabo en un parrón de uva de mesas son característicos de la variedad, el lugar de producción y los desafíos que dicha producción presente. Algunos de estos manejos afectan la necesidad y oportunidad de riego, y por este motivo se generó un modelo que pudiera extrapolar el criterio de riego a un parrón de igual variedad y características de suelo. Se generó un modelo de regresión lineal entre el índice de vegetación SAVI y el promedio de los coeficientes de cultivo quincenales (Kcs) generados por medio del uso de sensores de suelo para el control del riego de C4.

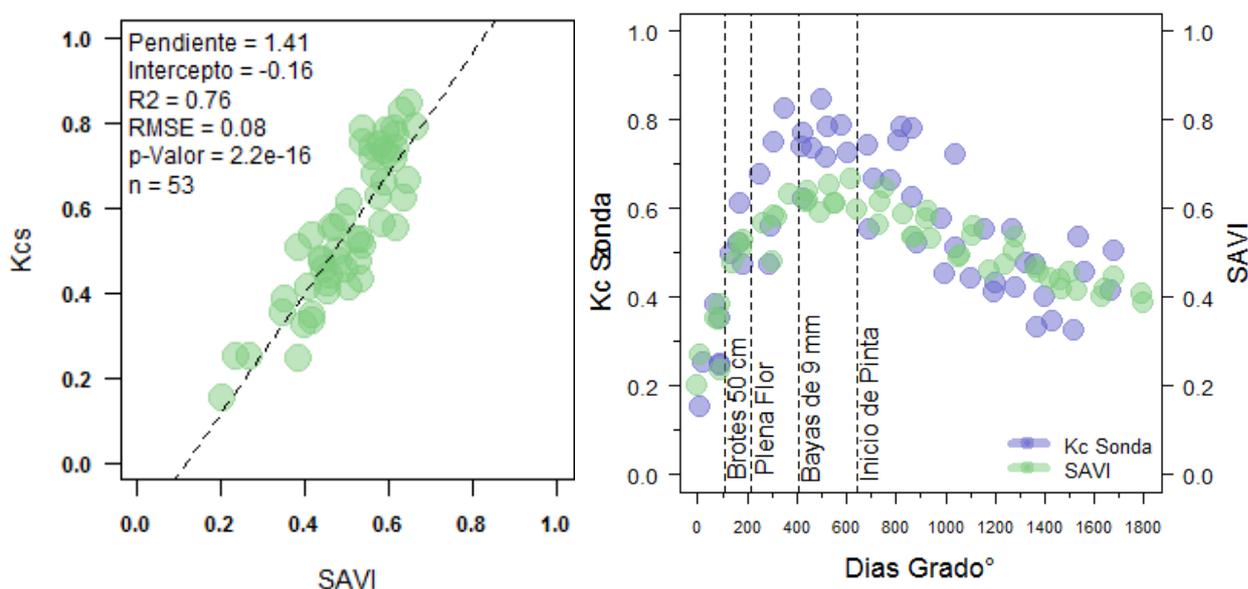


Figura 40. Modelo predictivo de Kcs a partir del cuartel C4 en las temporadas 2019-2020 y 2020-2021 (izquierda). Evolución de Kc sonda y SAVI en función de DG° (derecha).

El modelo predictivo generado es estadísticamente significativo y el valor R^2 encontrado indica una alta relación entre la variable predictora y el Kcs. El valor del error es bajo y podría producir un error de estimación de 0,48 mm diarios con una ETo de 6 mm. La principal limitación encontrada para la mayoría de las estimaciones de Kc es la distribución espacial de este valor, lo que está asociado a la heterogeneidad de las cubiertas vegetales. En primer lugar se estudió la cubierta vegetal del cuartel C3 en el periodo de máxima cobertura, por medio del procedimiento de análisis de conglomerados K-Means. Se encontraron 4 clases de vigor distintas, donde el promedio de Kcs (en máxima cobertura) es de 0,47; 0,57; 0,62 y 0,66 para las categorías de vigor bajo, medio y medio alto. La mayor parte de la superficie del cuartel pertenece a la categoría de alto vigor con 1,2 ha.

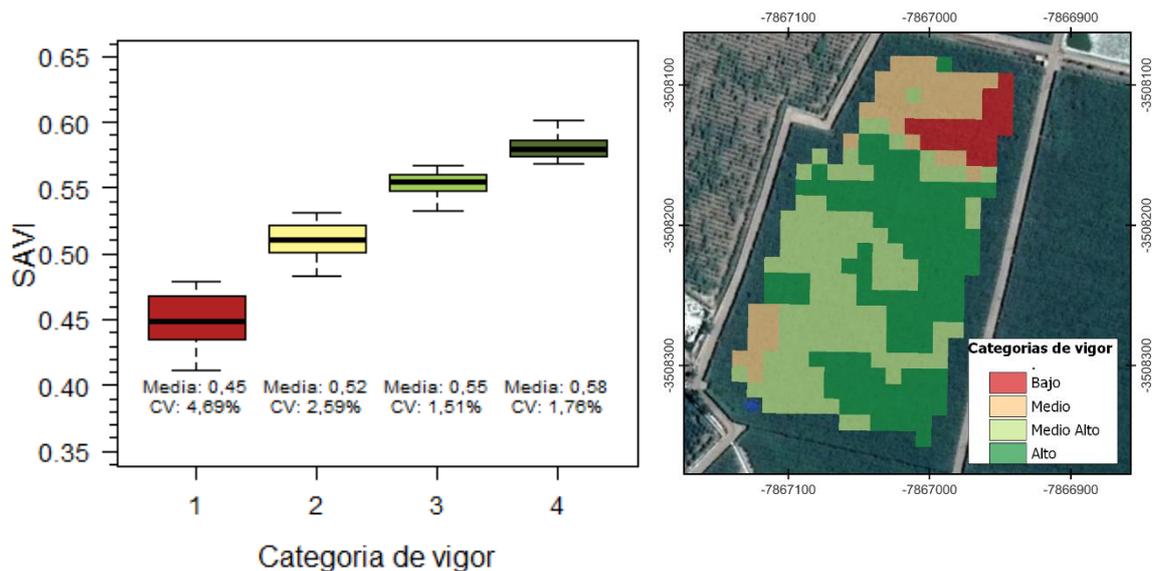


Figura 41. Caracterización de los grupos detectados por la mETodología K-Means. Gráfico Boxplot (izquierda). Histograma de frecuencia del índice de vegetación SAVI para cada clase de vigor (derecha).

Al comparar las necesidades de riego estimadas por el modelo para el cuartel C3 en las temporadas 2019-2020 y 2020-2021, con la evapotranspiración potencial modelada a través del Kc dual se obtienen resultados similares comparados con C4 y C9.

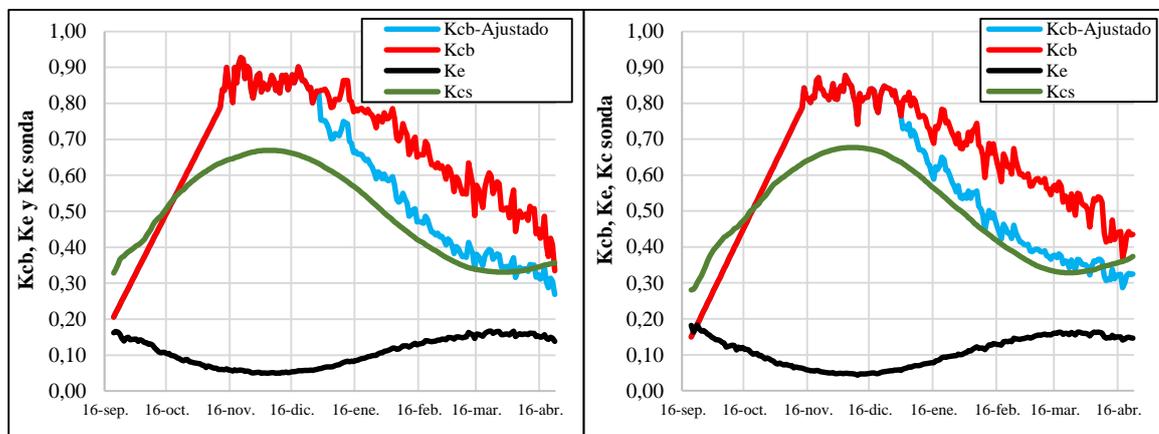


Figura 42. Componentes del balance hídrico para el cuartel C3 en temporada 2019-2020 (izquierda) y 2020-2021 (derecha). Kcb ajustado corresponde al Kcb ajustado al follaje y clima, Kcb corresponde al Kcb ajustado por clima, Ke es el coeficiente de evaporación y Kcs es el coeficiente de cultivo sonda estimado por el modelo generado.

Cuadro 16. Estimación de evapotranspiración para cuartel C3 mediante modelo SAVI-Kcs para la temporada 2021-2022. ETo es la demanda atmosférica del periodo, riego real es el riego efectivamente aportado, ET estimada es la estimación de evapotranspiración a través del modelo propuesto, ETP es la evapotranspiración potencial estimada por el Kc dual ajustado, TP es la transpiración potencial estimada con el Kcb ajustado, EP es la evaporación potencial estimada con Ke.

	Temporada		
	2019-2020	2020-2021	2021-2022
ETo (mm)	1132,0	1088,1	1088,1
Riego real (mm)	625,0	579,0	579,0
ET estimada (mm)	575,1	562,0	562,0
ETP (mm)	783,0	745,0	745,0
TP (mm)	666,0	632,7	632,7
EP (mm)	117,2	112,7	112,7
Estimación respecto ETP (%)	73,4	75,4	75,4
Estimación respecto riego (%)	92,0	97,1	97,1