



Producto 5

Datos y análisis de la línea base y el resultado de los indicadores seleccionados en los pilotos tecnológicos por país y nivel de análisis (parcela y cuenca).

Claudio Balbontín, Jesús Garrido, Alfonso Calera, Roberto Martínez, Ayelén Montenegro, Fernando González, Carlos Puertas, Liliana Ríos, Claudio García, Álvaro Otero, Claudia Bavestrello, Britt Wallberg.

2024

Proyecto Plataforma de gestión del agua en la agricultura 2030, ATN_RF-17950-RG





Códigos JEL: Q16

ISBN:

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Claudio Balbontín, Jesús Garrido, Roberto Martínez, Ayelén Montenegro, Fernando González, Carlos Puertas, Liliana Ríos, Claudio García, Álvaro Otero, Claudia Bavestrello, Britt Wallberg.

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:



Tabla de Contenidos

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. CONTABILIDAD DEL AGUA DE RIEGO ASISTIDA POR TELEDETECCIÓN	9
Descripción y aplicaciones del concepto.....	9
Valle del Río Elqui. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	12
Presentación del modelo y productos obtenidos.....	12
Intercambio de información de entrada al modelo.....	13
Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	15
Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua.....	19
Villa Regina. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	21
Presentación del modelo y productos obtenidos.....	21
Intercambio de información de entrada al modelo.....	22
Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	25
Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua.....	28
Tunuyán Inferior. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	30
Presentación del modelo y productos obtenidos.....	30
Intercambio de información de entrada al modelo.....	31
Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	34
Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua.....	34
Colonia Fiscal Sarmiento. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	36
Presentación del modelo y productos obtenidos.....	36
Intercambio de información de entrada al modelo.....	38



Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	44
Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua	46
Arroyo del Tala. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	48
Presentación del modelo y productos obtenidos	48
Intercambio de información de entrada al modelo	49
Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	52
Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua	55
Distrito RUT. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección	58
Presentación del modelo y productos obtenidos	58
Intercambio de información de entrada al modelo	58
3. RESUMEN DE SUPERFICIES REGADAS Y NECESIDADES NETAS DE AGUA DE RIEGO ASISTIDAS POR TELEDETECCIÓN	61
4. RESULTADOS DE LOS CULTIVOS DE LAS PARCELAS PILOTO POR PAÍS	63
4.1 CULTIVOS DE ARGENTINA	63
Piloto tecnológico en cultivo de peras	63
Piloto tecnológico en cultivo de maíz.	74
Piloto tecnológico en cultivo de vid	89
Piloto tecnológico en cultivo de tomates.	97
4.2 CULTIVOS DE CHILE	106
Piloto tecnológico en cultivo de lechuga.	106
Piloto tecnológico en cultivo de habas	112
Piloto tecnológico en cultivo de papas.	118
Piloto tecnológico en cultivo de poroto verde	125
Piloto tecnológico en cultivo de maíz	132
Piloto tecnológico en cultivo de uva de mesa	143
Piloto tecnológico en cultivo de mandarinas	150
Piloto tecnológico en cultivo de alfalfa	160
Piloto tecnológico Choapa; mejoras en sistema de riego de la parcela experimental INIA Choapa.	166



4.2	CULTIVOS DE COLOMBIA.....	170
	Piloto tecnológico en cultivo de lima Tahití en el C.I. Palmira.....	170
	Piloto tecnológico en cultivos tropicales asistido por sensores y redes IoT.	181
4.4	CULTIVOS DE URUGUAY	210
	Piloto tecnológico en el Junco, INIA Uruguay.....	210
	Piloto tecnológico en cultivo de soja.	216
	Piloto tecnológico en cultivo de maíz.	224
	Piloto tecnológico en cultivo de pasturas permanentes.	232
4.	CONCLUSIONES Y REFLEXIONES FINALES.....	246
5.	REFERENCIAS.....	251



Resumen

La iniciativa **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”** de **FONTAGRO**, busca la gestión eficiente del agua de riego en América Latina y el Caribe (ALC), ya que es fundamental para garantizar la sostenibilidad agrícola, especialmente ante la creciente variabilidad climática y la presión sobre los recursos hídricos. Este informe combina análisis a escala de cuenca con pilotos tecnológicos a nivel de parcela para validar la aplicabilidad de la contabilidad del agua asistida por teledetección en diversos contextos agrícolas. En seis cuencas representativas, la metodología permitió estimar las necesidades netas de riego (NIR), identificar patrones de demanda hídrica y evaluar la eficiencia en la asignación del agua, mientras que los pilotos en cultivos estratégicos de Argentina, Chile, Colombia y Uruguay demostraron la utilidad de herramientas como el NDVI, sensores de humedad y plataformas digitales para optimizar el manejo del riego, aumentar la productividad y reducir costos. Los resultados subrayan la capacidad de estas tecnologías para adaptar las prácticas de riego a necesidades específicas, mejorar la eficiencia hídrica incluso bajo estrés hídrico y resaltar áreas críticas donde es necesario optimizar la infraestructura y las bases de datos. Este estudio refuerza la relevancia de la adopción de tecnologías innovadoras para promover la sostenibilidad hídrica y la productividad agrícola en la región.

Palabras Clave: América Latina, teledetección, cuenca, recurso agua, piloto tecnológico, agricultura.



Abstract

The initiative "New Technologies for Increasing Efficiency in Agriculture ALC-2030" by FONTAGRO aims to achieve efficient water management for irrigation in Latin America and the Caribbean (LAC), as it is essential to ensure agricultural sustainability, particularly in the face of increasing climate variability and pressure on water resources. This report combines basin-scale analyses with technological pilots at the plot level to validate the applicability of water accounting assisted by remote sensing in diverse agricultural contexts. In six representative basins, the methodology enabled the estimation of net irrigation requirements (NIR), the identification of water demand patterns, and the evaluation of water allocation efficiency. Meanwhile, pilots in strategic crops in Argentina, Chile, Colombia, and Uruguay demonstrated the utility of tools such as NDVI, moisture sensors, and digital platforms to optimize irrigation management, increase productivity, and reduce costs. The results highlight the ability of these technologies to tailor irrigation practices to specific needs, improve water efficiency even under water stress, and identify critical areas where infrastructure and databases need optimization. This study underscores the importance of adopting innovative technologies to promote water sustainability and agricultural productivity in the region.

Keywords: Latin America, remote sensing, basin, water resource, technological pilot, agriculture.



1. INTRODUCCIÓN

La gestión del agua para riego es un desafío estratégico en América Latina y el Caribe (ALC), una región caracterizada por su alta dependencia de la agricultura para la seguridad alimentaria y económica. Las crecientes demandas hídricas, la variabilidad climática y la competencia entre sectores por los recursos limitados han puesto de manifiesto la necesidad de adoptar enfoques más sostenibles y eficientes en el uso del agua. En este contexto, la integración de tecnologías avanzadas, como la teledetección y los modelos de balance hídrico, emerge como una herramienta clave para enfrentar los retos asociados con la gestión hídrica en sistemas agrícolas diversos.

Este informe presenta una combinación innovadora de análisis a escala de cuenca y validación de pilotos tecnológicos a nivel de parcela. En la primera escala, la contabilidad del agua asistida por teledetección permitió identificar patrones de demanda hídrica, estimar las necesidades netas de riego (NIR) y evaluar la eficiencia en la asignación de los recursos hídricos en seis cuencas agrícolas representativas de ALC. Estas cuencas, seleccionadas por su diversidad de condiciones climáticas, socioeconómicas y productivas, ofrecieron un panorama integral sobre la versatilidad de la metodología en contextos heterogéneos. A través de herramientas como imágenes satelitales, datos meteorológicos y modelos específicos, se logró generar información detallada para respaldar decisiones informadas en la gestión hídrica a nivel regional.

A escala de parcela, se implementaron pilotos tecnológicos en cultivos estratégicos para cada país, como viñedos en Argentina, pasturas permanentes y soja en Uruguay, caña de azúcar en Colombia y cultivos hortofrutícolas en Chile. Estos pilotos validaron la utilidad de la teledetección para estimar las necesidades hídricas y demostraron su capacidad para mejorar la eficiencia del riego, aumentar la productividad y reducir los costos operativos. La integración de índices como el NDVI, sensores de humedad y plataformas de monitoreo, junto con metodologías estandarizadas como la FAO 56, permitió adaptar las prácticas de manejo del agua a las necesidades específicas de cada cultivo y región, incluso en escenarios de estrés hídrico.

Este análisis integral, que combina escalas de cuenca y parcela, ofrece una visión práctica sobre cómo la innovación tecnológica puede contribuir al manejo sostenible del agua en la agricultura. Los resultados demuestran que estas herramientas no solo son aplicables, sino que pueden transformarse en modelos replicables para otras regiones y cultivos, promoviendo una agricultura más resiliente, eficiente y sostenible en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos.



2. CONTABILIDAD DEL AGUA DE RIEGO ASISTIDA POR TELEDETECCIÓN

Descripción y aplicaciones del concepto.

La contabilidad del agua de riego asistida por teledetección, RS-IWA por sus siglas en Inglés (Garrido-Rubio et al., 2020a), se basa en agregar espacial y temporalmente en las escalas de trabajo de los gestores del agua, la cartografía temática espacial y temporalmente distribuida generada sobre las necesidades netas de agua de riego (NIR, *Net Irrigation Requirements*), estimadas tras realizar el balance de agua en el suelo asistido por teledetección (Garrido-Rubio et al., 2020b), RS-SWB por sus siglas en Inglés. Tal y como se detalló en la nota técnica 3, el balance de agua en el suelo asistido por teledetección sigue la metodología FAO56 (Allen et al., 1998) globalmente aceptada y operativa, y es ejecutado en la última versión disponible de la aplicación operativa HidroMORE (Torres, 2010; Garrido-Rubio, 2021). Dicho balance se trabaja píxel a píxel y bajo una frecuencia de cálculo diaria extendida al rango temporal deseado (x-semanas, x-meses, x-años...), con el fin de obtener una base de datos cartográfica y temática del regadío, espacial y temporalmente distribuida, gracias a las salidas al modelo de mapas de las variables de balance de agua en el suelo. Su extensión final de trabajo está determinada por la superficie abarcada por las imágenes de satélite empleadas, y la mínima unidad espacial de trabajo es la inherente a dichas imágenes, es decir, el tamaño del píxel de entrada. Además, necesario indicar que, para llevar a cabo el balance de agua en el suelo asistido por teledetección, HidroMORE emplea los siguientes datos de entrada: a) series temporales de Índices de Vegetación; b) mapa de usos del suelo en regadío; c) mapa de tipos de suelo según sus propiedades hidrológicas; y d) bases de datos diaria agroclimáticas (precipitación, P, y evapotranspiración de referencia, ET_0).

En base al anterior marco metodológico, el producto generado a nivel de cuenca de trabajo se basa en series temporales mensuales y anuales de las NIR que surgen de acumular temporalmente los resultados diarios que genera HidroMORE en dicha variable del balance. Ahora bien, para generar una contabilidad del agua de riego asistida por teledetección que sea empleada como información complementaria de trabajo por los gestores públicos y privados del agua requiere conocer las dimensiones espaciales de manejo de dichos gestores sobre los recursos hídricos. Es decir, es necesario conocer la dimensión espacial a la cual agregar los resultados para obtener dicha contabilidad. Gracias a que los resultados de NIR se obtienen a escala de píxel de 10 m, es posible agregarlos espacialmente a la escala de trabajo requerida, normalmente: parcela, asociación de regantes, agrupaciones de asociaciones o bien, distritos o cuencas hidrográficas. El esquema de trabajo para dicha contabilidad se presenta en la **Figura 1**, mientras que la **Tabla 1** describe cada cuenca de trabajo.

En consecuencia, en la siguiente sección detallaremos por cuenca de trabajo los inputs necesarios, así como las escalas espaciales de trabajo y las acciones para la evaluación y validación que junto con los responsables de cada cuenca se ha trabajado. Para ello, consideraremos los

siguientes apartados:

1. **Presentación del modelo y productos obtenidos.**
2. **Intercambio de información de entrada al modelo.**
3. **Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.**
4. **Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua.**



Figura 1. Esquema conceptual de trabajo para determinar la contabilidad de agua de riego asistida por teledetección (adaptado de Garrido-Rubio, 2021).

Tabla 1. Superficie total y cultivos principales desarrollados por cuencas de trabajo.

Cuenca de trabajo	Superficie	Cultivos principales	
Tunuyán Inferior (Mendoza, Argentina)	100.000 ha	Vid, frutal, olivo y hortalizas	
Colonia Fiscal Sarmiento (San Juan, Argentina)	2.000 ha	Vid, hortalizas y alfalfa	
Villa Regina (Río Negro, Argentina)	7.000 ha	Peral, Manzano, ciruela...	
Valle del Río Elqui (Coquimbo, Chile)	15.000 ha	Vid, maíz, papas, alfalfa	
Distrito RUT (Valle del Cauca, Colombia)	10.000 ha	Caña de azúcar, maíz...	
Arroyo del Tala (Salto, Uruguay)	2.000 ha	Arroz, maíz, sorgo, soja y pasturas	

Valle del Río Elqui. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Presentación del modelo y productos obtenidos

Tanto el modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección como los productos generados y su aplicación a la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección fueron presentados por los autores a los responsables de cuenca en varias reuniones de trabajo. En consonancia con el responsable de la cuenca (INIA Intihuasi) y la autoridad pública de Junta de Vigilancia de Río Elqui (JVRE) se decidió abordar la contabilidad de agua de riego con las siguientes características temporales, espaciales y de manejo de los recursos hídricos recogidas en la **Tabla 2** y **Figura 2**.

Tabla 2. Características de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en el Valle del Río Elqui.

Cuenca de trabajo	Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección		
	Campañas de riego consideradas	Resolución temporal	Manejo de los recursos hídricos según unidades espaciales
Valle del Río Elqui (Coquimbo, Chile)	2018/2019, 2019/2020 y 2020/2021	Anual mensual	1. Perímetro total de la cuenca 2. Zona de riego

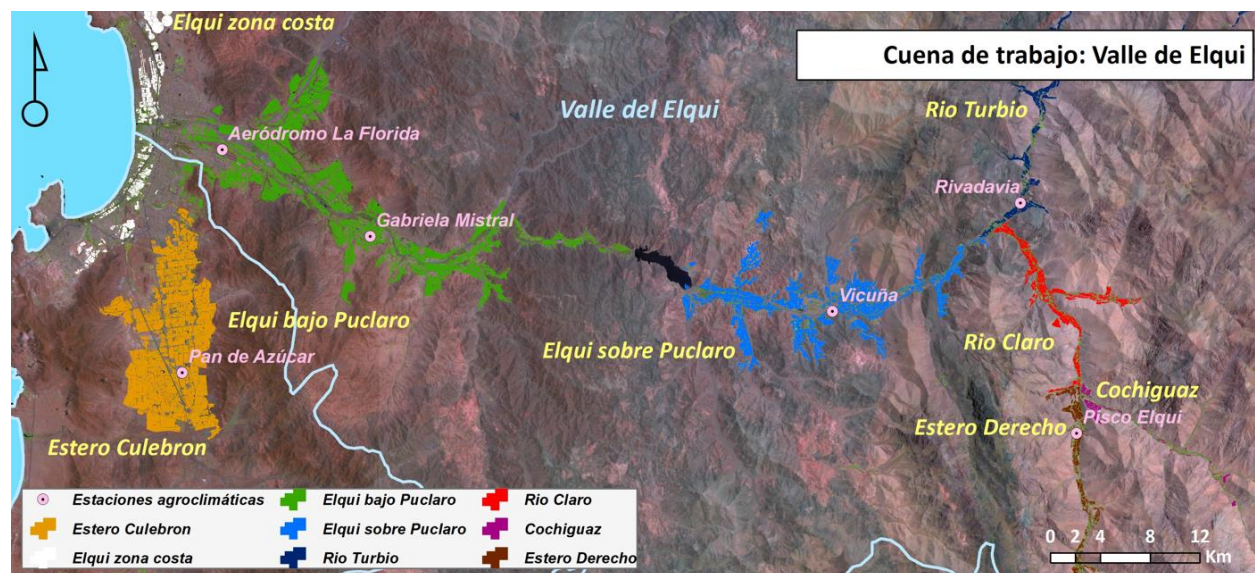


Figura 2. Estaciones agroclimáticas seleccionadas y escalas espaciales de manejo de los recursos hídricos en el Valle del Río Elqui para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.

Intercambio de información de entrada al modelo

Las entradas al modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección se dividen en:

i. Series temporales de imágenes de satélite de índice de vegetación NDVI:

Para el Valle del Río Elqui fueron procesados dos gránulos (19JBG y 19 JCG) del satélite Sentinel-2, S2 (gemelos S2A y S2B). La **Tabla 3** muestra las fechas de imágenes empleadas.

Tabla 3. Fechas de imágenes NDVI seleccionadas por campaña de riego en el Valle del Río Elqui.

Campaña	Fechas imágenes NDVI (día/mes/año)
2018/2019	28/07/18; 07/08/18; 01/09/18; 16/09/18; 01/10/18; 14/10/18; 21/10/18; 26/10/18; 31/10/18; 05/11/18; 10/11/18; 15/11/18; 30/11/18; 05/12/18; 10/12/18; 15/12/18; 23/12/18; 30/12/18; 09/01/19; 17/01/19; 19/01/19; 13/02/19; 23/02/19; 05/03/19; 10/03/19; 20/03/19; 04/04/19; 14/04/19; 22/04/19; 29/04/19; 04/05/19; 14/05/19; 03/06/19; 08/06/19; 18/06/19; 23/06/19; 03/07/19; 18/07/19; 28/07/19; 07/08/19; 17/08/19; 22/08/19 y 27/08/19
2019/2020	01/09/19; 11/09/19; 21/09/19; 26/09/19; 06/10/19; 21/10/19; 26/10/19; 31/10/19; 05/11/19; 15/12/19; 25/12/19; 30/12/19; 09/01/20; 18/02/20; 23/02/20; 04/03/20; 19/03/20; 29/03/20; 08/04/20; 13/04/20; 18/04/20; 28/04/20; 13/05/20; 23/05/20; 12/06/20; 02/07/20; 12/07/20; 27/07/20; 06/08/20 y 26/08/20
2020/2021	05/09/20; 10/09/20; 20/09/20; 30/09/20; 10/10/20; 20/10/20; 25/10/20; 14/11/20; 24/11/20; 29/11/20; 09/12/20; 19/12/20; 29/12/20; 13/01/21; 23/01/21; 02/02/21; 17/02/21; 27/02/21; 09/03/21; 14/03/21; 24/03/21; 08/04/21; 13/04/21; 18/04/21; 28/04/21; 08/05/21; 23/05/21; 07/06/21; 22/06/21; 07/07/21; 17/07/21; 27/07/21; 01/08/21; 21/08/21; 26/08/21 y 31/08/21

ii. Datos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o)

Para el Valle del Río Elqui se obtuvieron por parte de los responsables locales los datos diarios de P y ET_o, así como su localización (**Figura 2**). A continuación, se enumeran las estaciones agroclimáticas seleccionadas: El Romeral; Aeródromo La Florida; Pan de Azúcar, Gabriela Mistral, Vicuña, Pisco Elqui y Rivadavia. La siguiente **Figura 3** muestra la evolución diaria de la P, la ET_o mostrando un acumulado de alrededor de 1400 y 20 mm/campaña de ET_o y P (campaña 2019/2020) respectivamente, siendo prácticamente nulos los recursos hídricos disponibles procedentes de la precipitación durante toda la campaña de riego (duración anual, en morado).

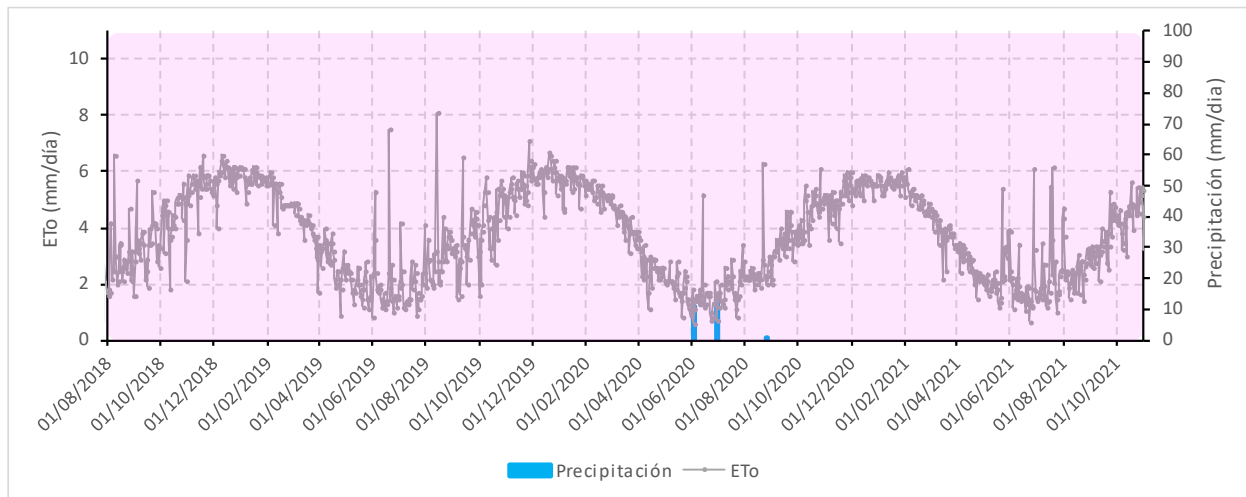


Figura 3. Evolución diaria de la Precipitación y la ETo para la estación de Vicuña.

iii. Mapas de tipos de suelo

Para el Valle del Río Elqui se consideraron principalmente los valores de los estudios de Meléndez et al. (1979), y Reyes Calvo et al. (2015) (**Figura 4**), y en aquellas zonas cultivadas y que no estuvieran descritas se empleó a información obtenida del “*Harmonized World Soil Database*”, año 2012 (FAO et al., 2012).

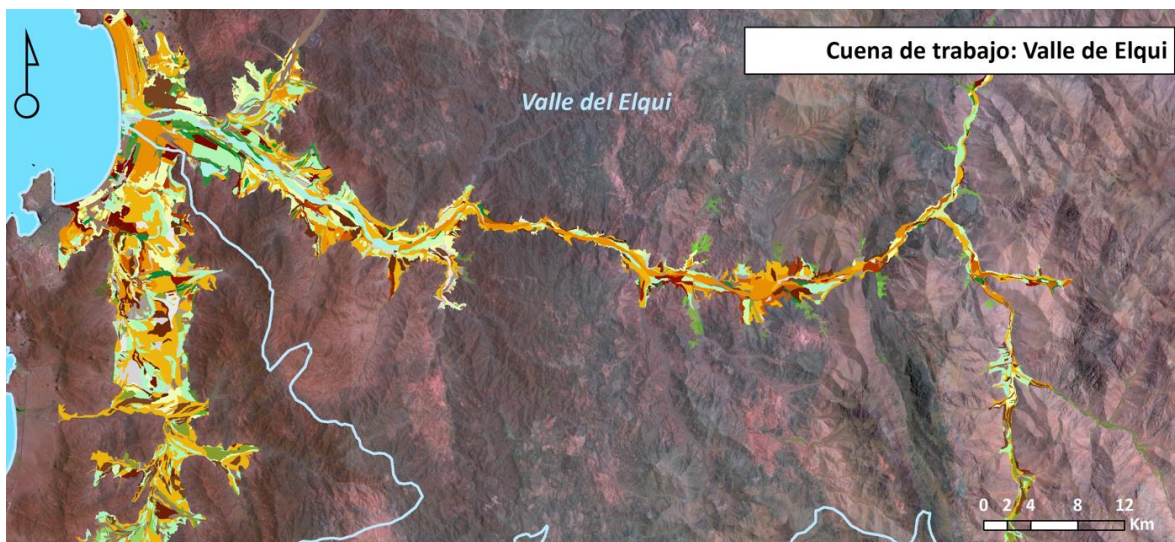


Figura 4. Tipos de suelos en el Valle del Río Elqui.

iv. Mapas con la clasificación de usos del suelo en regadío

Se utilizó en cada campaña de riego la clasificación de uso de suelos realizada por el laboratorio PROMMRA de la Universidad de La Serena (Universidad de La Serena, 2017; Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes, 2023) que presenta 4 clases: Frutales Persistentes (cítricos); Frutales

Caducos (viñedos); Cultivos de Ciclo corto (hortalizas); y Praderas (alfalfas). La siguiente **Figura 5** muestra la distribución espacial de los usos del suelo en regadío empleada. Se aprecia cómo los cultivos leñosos se cultivan en la zona alta del Valle, mientras que los hortícolas en la zona baja. Frutales persistentes y praderas se cultivan de forma diseminada.

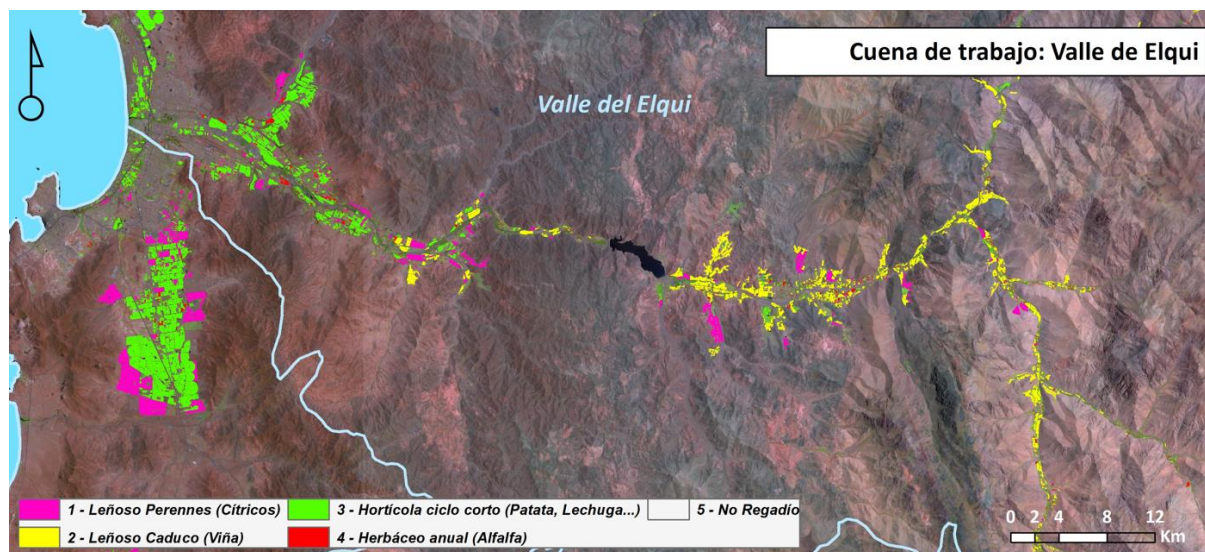


Figura 5. Mapa de usos del suelo en regadío para la campaña 2018/2019 en el Valle del Río Elqui.

v. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados

Para el Valle del Río Elqui se han considerado las siguientes características de manejo y riego según los tipos de cultivos clasificados (**Tabla 4**).

Tabla 4. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados en el Valle del Río Elqui.

Cultivo	Periodo de riego (día/mes)	Tolerancia al estrés	Agotamiento permisible (<i>p</i>)	Dosis de riego máxima
Frutales Persistentes	01/09 – 01/09	No	0,50	10 mm
Frutales Caducos	01/09 – 15/04	No	0,35	10 mm
Cultivos de Ciclo corto	01/09 – 01/09	No	0,30	8 mm
Praderas	01/09 – 01/09	No	0,55	25 mm

Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Para llevar a cabo la evaluación sobre la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en el Valle del Río Elqui se ha contado con el volumen bruto mensual de agua que circula por los canales de cada zona regable (ver **Figura 2**), empleándolos a su vez como estructura espacial de manejo de los recursos hídricos por parte de las autoridades públicas. La información, facilitada por la Junta de Vigilancia del Río Elqui (JVRE) ha sido cruzada a escala mensual con las

NIR, agregada espacialmente a dichas estructuras espaciales de manejo. Así mismo, se ha considerado un criterio de eficiencia global de 0,5 para transformar las estimaciones netas a brutas, (*Gross Irrigation Requirements*, GIR). Las siguientes **Figura 6** y **Figura 7** muestran los resultados durante las tres campañas de riego monitorizadas.

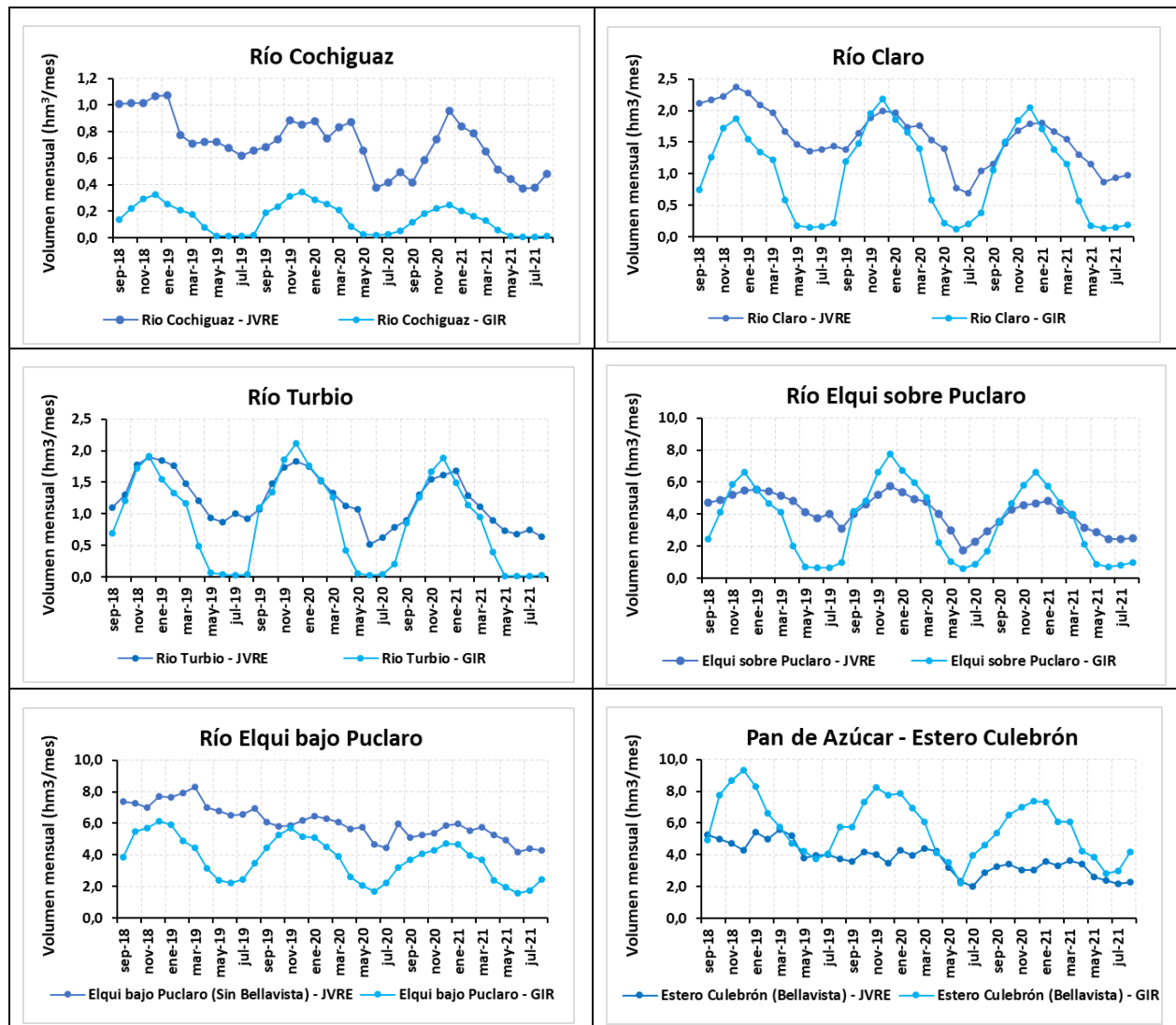


Figura 6. Evaluación mensual de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en el Valle del Río Elqui entre la dotación asignada por zona regable y las necesidades de agua de riego brutas estimadas.

En la **Figura 6** mostramos la evolución mensual de los volúmenes brutos asignados por estructura espacial de manejo hídrico frente los estimados por el balance de agua en el suelo asistido por teledetección (GIR). Un primer análisis muestra desigualdades en la mayoría de los meses y



estructuras espaciales, si bien, el lector debe considerar que el volumen asignado a dichas estructuras de manejo por la JVRE incorpora además de los usos agrícolas en regadío, volúmenes de agua asignados a los usos doméstico e industrial. Es por ello, que se observe un acoplamiento y desacoplamiento de las series temporales mensuales según la demanda de agua agrícola a lo largo de la campaña de riego. Dicha afirmación se entiende mejor al comprobar que salvo en Río Cochiguaz y Estero Culebrón, los valores máximos de los GIR por estructura (correspondientes a los meses con mayor demanda hídrica) sean más coincidentes con los asignados por la JVRE; mientras que los valores mínimos de los GIR por estructura (correspondientes a los meses con menor demanda hídrica) sean menos coincidentes con los asignados por la JVRE. Además, refuerza dicha afirmación comprobar que en todas las estructuras espaciales de manejo hídrico salvo en Estero Culebrón, las series temporales de las GIR sean normalmente menores (salvo algunos meses de mayor demanda agraria) que los volúmenes designados por la JVRE. Finalmente, explicamos este comportamiento contrario de Estero Culebrón pues se trata de una estructura espacial de manejo que recibe agua tanto desde el Río Elqui como mediante extracción de agua subterránea usando pozos.

En paralelo, la **Figura 7** enfrenta para todos los meses de estudio los volúmenes dotados por la JVRE y los estimados por la contabilidad del agua de riego basada en teledetección (GIR). La fila superior muestra los resultados sin diferenciar la dotación asignada por uso productivo agrícola y otros usos productivos (urbano, rural, minero e industrial), mientras que la fila inferior sí muestra los resultados bajo una diferenciación aproximada de usos del agua por sector productivo según un informe del Ministerio de Agricultura (Lara Pulgar and Casanova, 2020). Así, los resultados sin una diferenciación de usos productivos presentan un coeficiente de determinación r^2 de 0,73, mejorando sensiblemente hasta un r^2 de 0,8 cuando desagregamos la dotación por usos productivos. Comentar finalmente que los resultados incluyen (columna izquierda) o ignoran (columna derecha) la estructura de manejo hídrico de Estero Culebrón, por ser esta una estructura cuyo uso del agua depende en gran medida de la extracción de agua de pozos (y no contar con dichos datos).

Finalmente, destacamos cómo se ha generado una información cartográfica a escala temporal mensual con la que no se contaba en el Valle del Río Elqui.

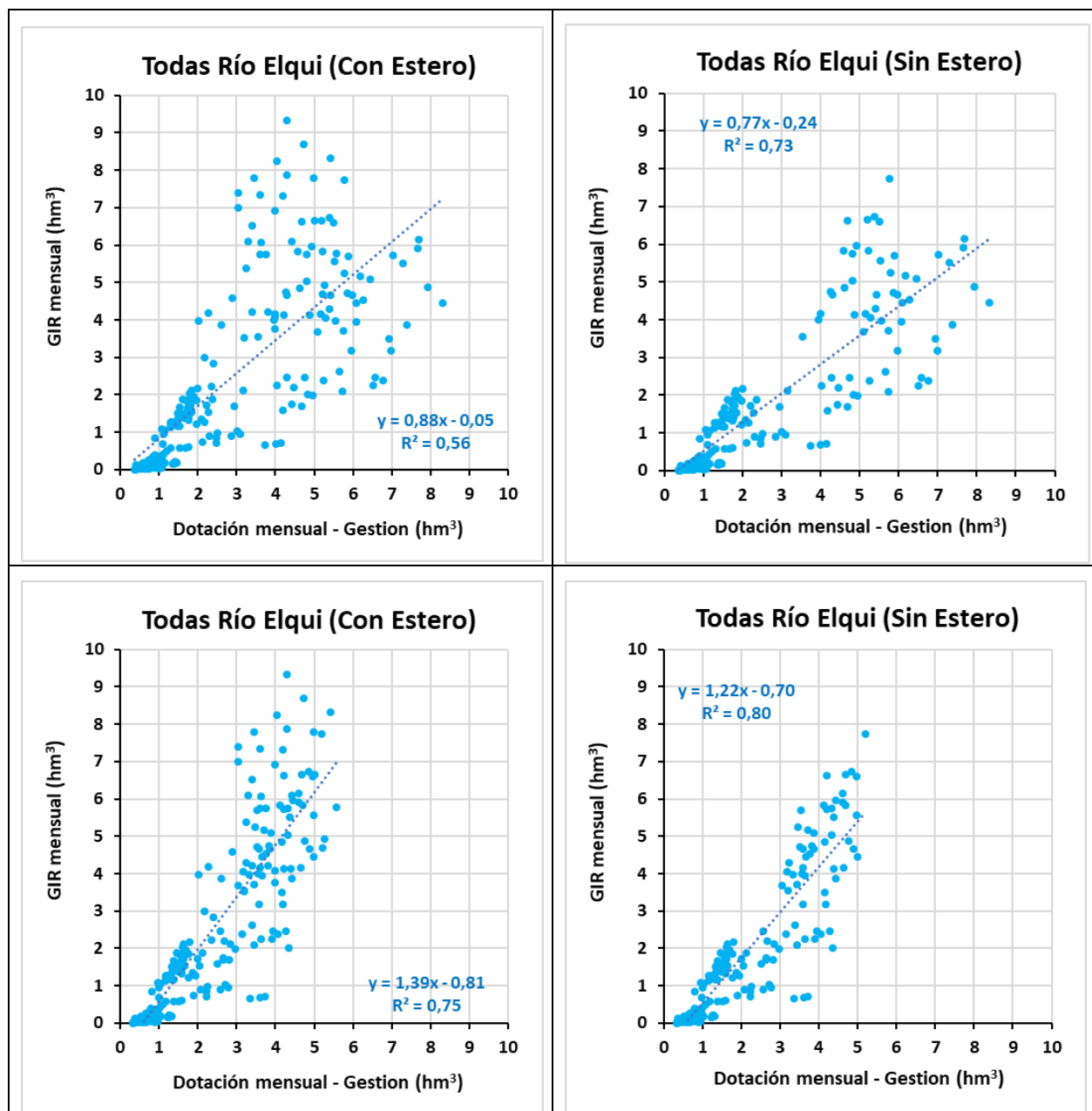


Figura 7. Evaluación mensual de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en el Valle del Río Elqui agrupando todas las zonas regables o estructuras espaciales de manejo hídrico según se considere el volumen total de agua gestionado por la JVRE (fila superior) o bien exclusivamente el aproximado a uso agrícola (fila inferior).

Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua

Para el Valle del Río Elqui se ha generado la cartografía temática espacialmente distribuida de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA), agregando temporalmente los resultados a la escala mensual y anual. Se muestra un ejemplo de la cartografía generada y entregada a los gestores del agua (**Figura 8**). Así mismo, se adjuntan las necesidades netas de agua de riego (NIR) estimadas por unidad de gestión (**Tabla 5**).

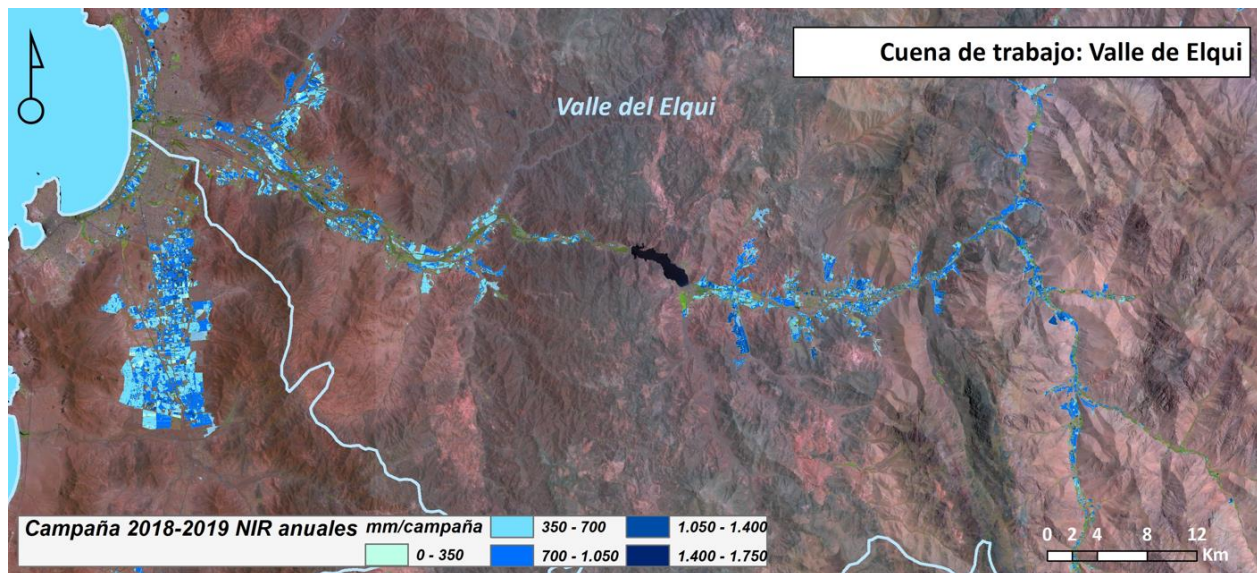
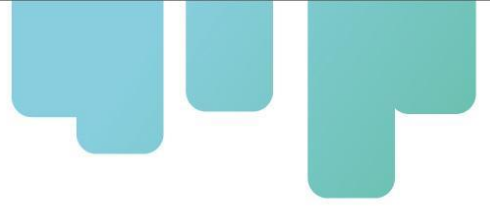


Figura 8. Cartografía temática para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección a escala anual (campaña 2018/2019) en el Valle del Río Elqui.

Tabla 5. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en el Valle del Río Elqui. Necesidades netas de riego, NIR (hm^3), obtenidas a escala mensual y por campaña de riego.

Periodo	Rio Cochiguaz	Rio Claro	Rio Turbio	Elqui sobre Puclaro	Elqui bajo Puclaro	Estero Culebrón
Campaña 2018/2019	0,89	5,49	5,13	19,21	25,14	36,98
Sep-18	0,07	0,37	0,35	1,23	1,94	2,46
Oct-18	0,11	0,63	0,60	2,07	2,75	3,89
Nov-18	0,15	0,86	0,86	2,92	2,86	4,35
Dic-18	0,16	0,94	0,96	3,30	3,07	4,66
Ene-19	0,13	0,77	0,77	2,78	2,96	4,16
Feb-19	0,10	0,67	0,67	2,33	2,44	3,32



Mar-19	0,09	0,61	0,59	2,07	2,23	2,88
Abr-19	0,04	0,29	0,25	1,01	1,59	2,35
May-19	0,01	0,09	0,03	0,35	1,19	2,11
Jun-19	0,01	0,07	0,02	0,33	1,13	1,89
Jul-19	0,01	0,08	0,01	0,34	1,23	2,04
Ago-19	0,01	0,11	0,02	0,48	1,75	2,87
Campaña 2019/2020	1,02	6,62	5,87	23,81	22,95	34,21
Sep-19	0,09	0,60	0,55	2,08	2,23	2,88
Oct-19	0,12	0,74	0,68	2,43	2,62	3,66
Nov-19	0,16	0,98	0,93	3,32	2,84	4,11
Dic-19	0,17	1,09	1,06	3,87	2,58	3,89
Ene-20	0,14	0,93	0,88	3,37	2,54	3,94
Feb-20	0,13	0,83	0,76	2,98	2,27	3,46
Mar-20	0,10	0,70	0,63	2,51	1,97	3,05
Abr-20	0,04	0,29	0,21	1,12	1,31	2,07
May-20	0,01	0,11	0,03	0,52	1,05	1,76
Jun-20	0,01	0,06	0,02	0,31	0,85	1,11
Jul-20	0,01	0,10	0,02	0,45	1,10	1,98
Ago-20	0,03	0,19	0,10	0,85	1,59	2,30
Campaña 2020/2021	0,69	5,98	4,88	20,34	19,63	31,93
Sep-20	0,06	0,53	0,43	1,77	1,84	2,69
Oct-20	0,09	0,75	0,63	2,33	2,03	3,26
Nov-20	0,11	0,92	0,84	2,92	2,15	3,50
Dic-20	0,12	1,03	0,94	3,31	2,36	3,70
Ene-21	0,10	0,86	0,75	2,87	2,33	3,68
Feb-21	0,08	0,69	0,57	2,37	1,99	3,05
Mar-21	0,07	0,58	0,48	2,00	1,86	3,03
Abr-21	0,03	0,29	0,19	1,05	1,19	2,11
May-21	0,01	0,09	0,01	0,45	0,99	1,93
Jun-21	0,00	0,07	0,01	0,36	0,79	1,42

Jul-21	0,01	0,08	0,01	0,42	0,88	1,49
Ago-21	0,01	0,10	0,01	0,49	1,23	2,09

Villa Regina. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Presentación del modelo y productos obtenidos

Tanto el modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección como los productos generados y su aplicación a la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección fueron presentados por los autores a los responsables de cuenca en varias reuniones de trabajo. Hasta la fecha y en consonancia con el responsable de la cuenca, el técnico del distrito de riego y drenaje se ha decidido abordar la contabilidad de agua de riego con las siguientes características temporales, espaciales y de manejo de los recursos hídricos recogidas en la **Tabla 6** y **Figura 9**.

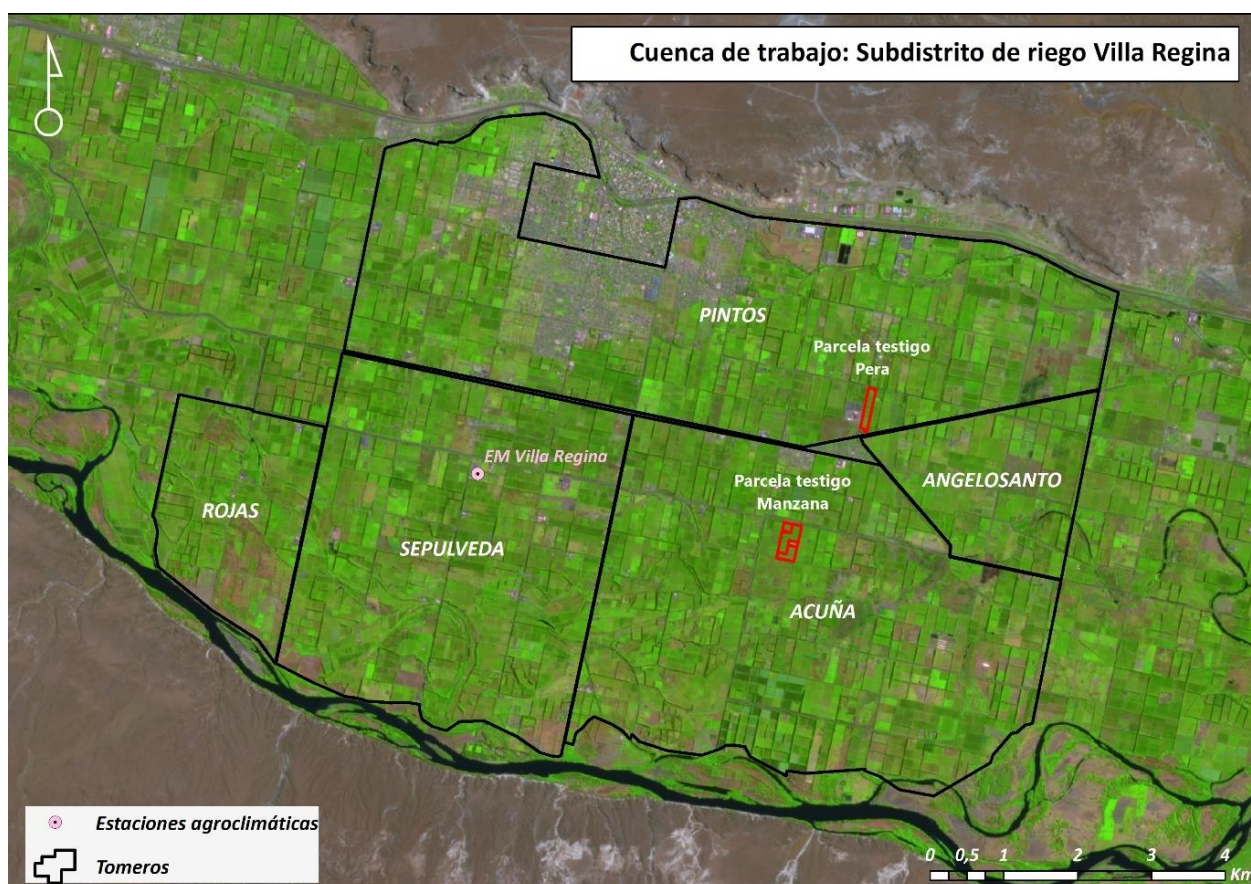


Figura 9. Estaciones agroclimáticas y escalas espaciales de manejo de los recursos hídricos en Villa Regina.

Tabla 6. Características de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Villa Regina.

Cuenca de trabajo	Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección		
	Campañas de riego consideradas	Resolución temporal	Manejo de los recursos hídricos según unidades espaciales y por cultivo
Villa Regina (Río Negro, Argentina)	2020/2021 2021/2022	y Anual y mensual	1. Perímetro total de la cuenca 2. Zona de tomero 3. Parcela testigo

Intercambio de información de entrada al modelo

Las entradas al modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección se dividen en:

i. Series temporales de imágenes de satélite de índice de vegetación NDVI:

Para el subdistrito de riego Villa Regina fue procesado un gránulo (19HFS) del satélite Sentinel-2, S2 (gemelos S2A y S2B). La **Tabla 3** con las fechas de imágenes NDVI seleccionadas.

Tabla 7. Fechas de imágenes NDVI seleccionadas por campaña de riego en el Villa Regina.

Campaña	Fechas imágenes NDVI (día/mes/año)
2020/2021	04/09/20; 09/09/20; 14/09/20; 19/09/20; 01/10/20; 06/10/20; 09/10/20; 11/10/20; 14/10/20; 26/10/20; 29/10/20; 31/10/20; 05/11/20; 15/11/20; 23/11/20; 25/11/20; 30/11/20; 03/12/20; 05/12/20; 08/12/20; 13/12/20; 15/12/20; 20/12/20; 23/12/20; 25/12/20; 28/12/20; 01/01/21; 02/01/21; 09/01/21; 12/01/21; 17/01/21; 19/01/21; 22/01/21; 03/02/21; 06/02/21; 13/02/21; 16/02/21; 18/02/21; 21/02/21; 23/02/21; 28/02/21; 13/03/21; 15/03/21; 20/03/21; 23/03/21; 28/03/21; 04/04/21; 12/04/21; 14/04/21; 22/04/21; 24/04/21; 27/04/21 y 29/04/21
2021/2022	14/09/21; 16/09/21; 21/09/21; 24/09/21; 29/09/21; 04/10/21; 06/10/21; 09/10/21; 14/10/21; 16/10/21; 19/10/21; 26/10/21; 29/10/21; 05/11/21; 18/11/21; 20/11/21; 23/11/21; 25/11/21; 28/11/21; 05/12/21; 10/12/21; 15/12/21; 23/12/21; 25/12/21; 28/12/21; 01/01/22; 04/01/22; 07/01/22; 12/01/22; 14/01/22; 22/01/22; 06/02/22; 11/02/22; 13/02/22; 16/02/22; 18/02/22; 26/02/22; 05/03/22; 08/03/22; 10/03/22; 13/03/22; 15/03/22; 18/03/22; 23/03/22; 30/03/22; 02/04/22; 04/04/22; 12/04/22; 14/04/22 y 27/04/22

ii. Datos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o)

Para el subdistrito de riego Villa Regina se obtuvo por parte de los responsables locales los datos diarios de P y ET_o, así como la localización de la estación Villa Regina (Figura 9). La siguiente Figura 10 muestra la evolución diaria de la P, la ET_o y la duración de la campaña de riego (morado),

mostrando un acumulado de alrededor de 900 y 160 mm/campaña de ET_o y P respectivamente.

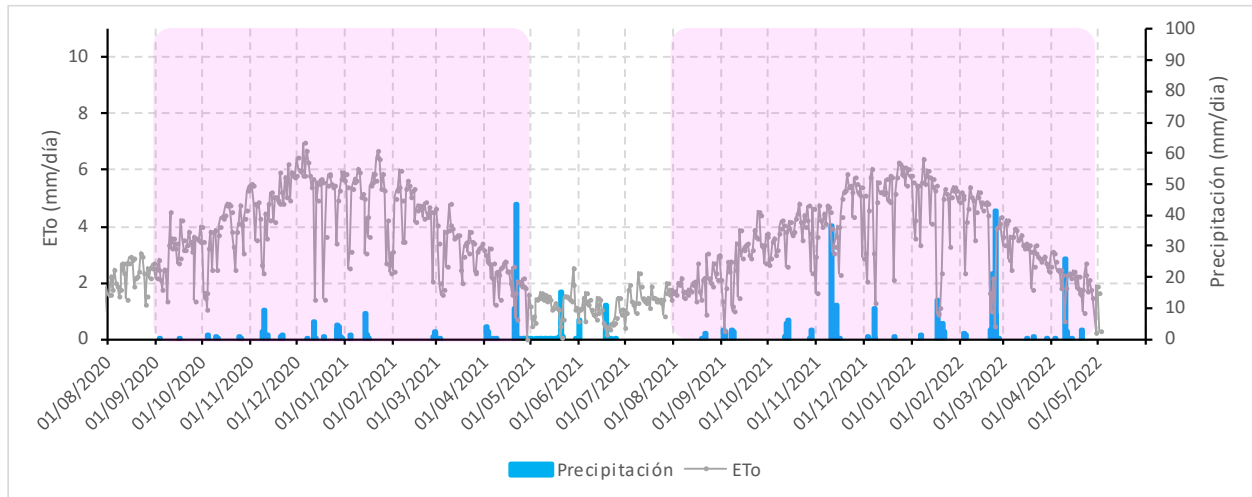


Figura 10. Evolución diaria de la Precipitación y la ET_o para la estación de Villa Regina.

iii. Mapas de tipos de suelo

Para el subdistrito de riego Villa Regina se consideró el “Estudio para el aprovechamiento Integral del Río Negro” (CIL-AyEE, 1991). La siguiente **Figura 11** muestra la distribución espacial de la tipología de suelos empleada.

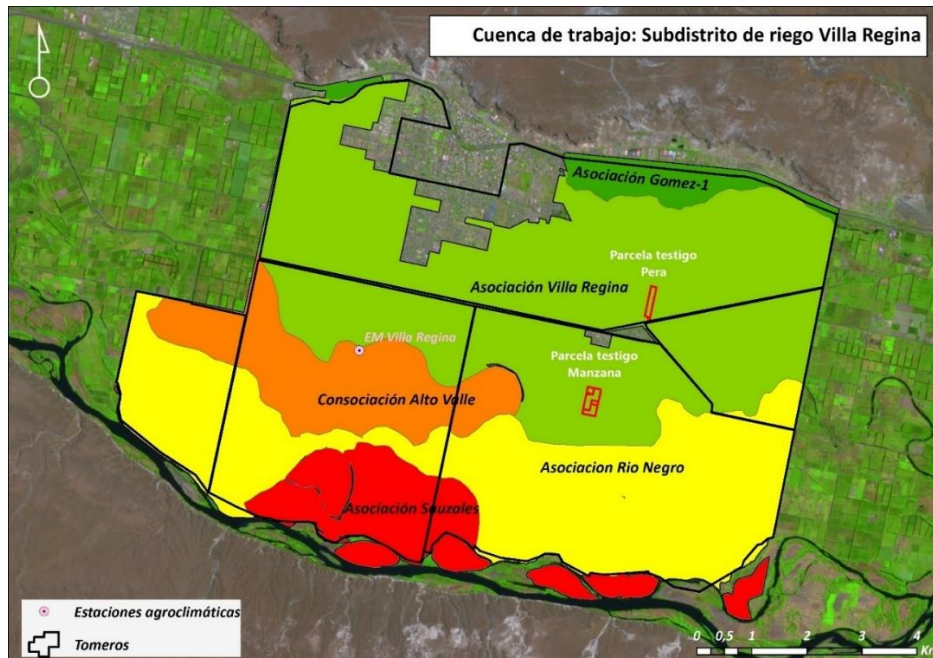


Figura 11. Tipos de suelos en Villa Regina.

iv. Mapas con la clasificación de usos del suelo en regadío

Para el subdistrito de riego Villa Regina se utilizó en cada campaña de riego la clasificación de uso de suelos realizada por Montenegro y técnicos del distrito, que cuenta con 8 clases de uso de suelo: Pera; Manzana; Malla antigranizo (frutal); Carozo; Pastura; Viñedo; Hortícola y No regadío. La siguiente **Figura 12** muestra la distribución espacial de los usos del suelo en regadío empleada. Se aprecia claramente cómo los cultivos de pera y manzana predominan sobre el resto de los cultivos encontrándose muy repartidos por todo el subdistrito de riego.

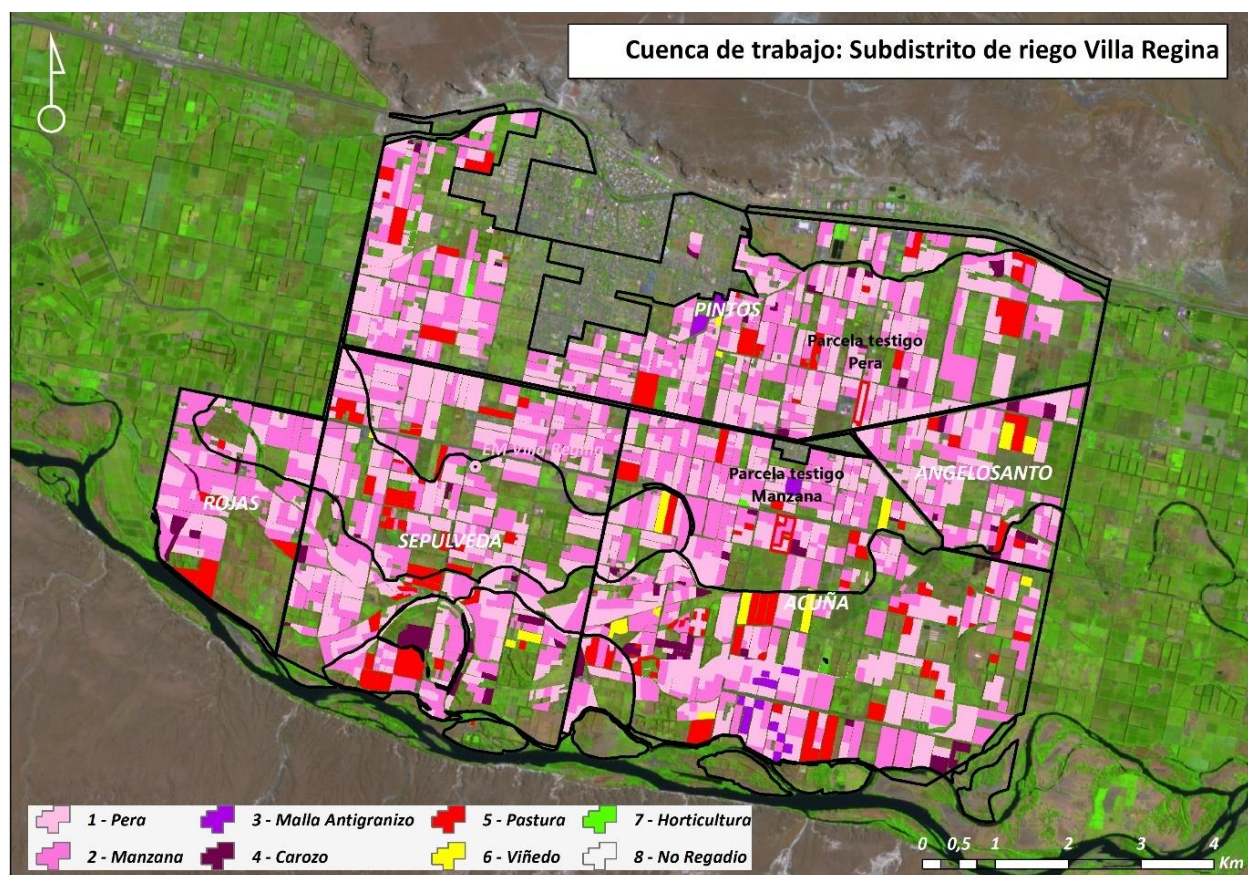


Figura 12. Mapa de usos del suelo en regadío para la campaña 2018/2019 en Villa Regina.

v. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados

Para el Valle del Río Elqui se han considerado las siguientes características de manejo y riego según los tipos de cultivos clasificados (**Tabla 8**).



Tabla 8. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados en el Villa Regina.

Cultivo	Periodo de riego (día/mes)	Tolerancia al estrés	Agotamiento permisible (p)	Dosis de riego máxima
Pera	01/09 – 31/12; 01/ 03 – 31/03	No	0,55	100 mm
Manzana	01/09 – 31/12; 01/ 03 – 31/03	No	0,55	100 mm
Malla antigranizo	01/09 – 30/04	No	0,50	100 mm
Carozo	01/09 – 30/04	No	0,50	100 mm
Pastura	01/09 – 30/04	No	0,55	100 mm
Viñedo	01/09 – 30/04	No	0,35	100 mm
Hortícola	01/09 – 30/04	No	0,30	80 mm

Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Para llevar a cabo la evaluación sobre la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en el subdistrito de riego Villa Regina se ha contado con datos sobre diferentes unidades espaciales de manejo de los recursos hídricos (**Figura 9**) sobre la campaña de riego 2020/2021 y 2021/2022. Así, a escala parcela con cultivo de pera (Chacra-57) los responsables de cuenca facilitaron los datos recogidos por una sonda de humedad y los riegos aplicados, campaña 2021/2022. Por otro lado, y a escala tomero, se facilitó el caudal por campaña enviado al área de influencia manejado por los diferentes tomeros, campañas 2020/2021 y 2021/2022. A continuación, mostramos los resultados de evaluación sobre las diferentes escalas de manejo.

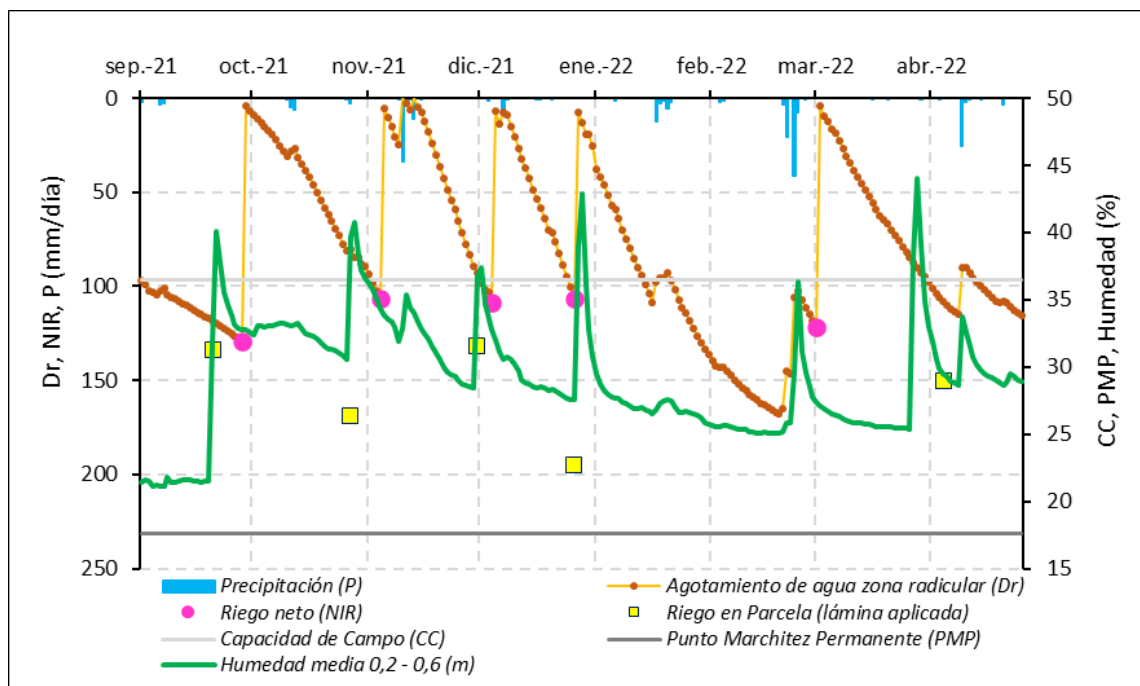


Figura 13. Evolución temporal diaria de la humedad en el perfil del suelo explorado por las raíces.

Relativo a la escala parcela, presentamos la **Figura 13** donde evaluamos cualitativamente el agotamiento de agua en el suelo explorado por las raíces (Dr) y las necesidades netas de agua de riego estimadas por teledetección (NIR) frente a la humedad promedio registrada por la sonda de humedad (%) y el calendario de riegos en parcela (lámina aplicada). Teniendo presente que el objetivo del modelo del balance de agua en el suelo asistido por teledetección no es reproducir con exactitud el manejo individual que cada regante realiza en su parcela, sino estimar y ofrecer información espacial y temporalmente distribuida de las necesidades netas de agua de riego que satisfacen la evapotranspiración de los cultivos estimada mediante dicho balance, se observa gran semejanza en cuanto al calendario de aplicación de riegos y la evolución del contenido de agua en el suelo. Así, a lo largo de la campaña de riego se estiman necesarios el mismo número de riegos que el regante realiza. Además, se muestra una frecuencia entre los riegos simulados cercana a la realizada en parcela, salvo en el último riego donde HidroMORE simula el último riego 1 mes antes que el aplicado en parcela. Esto es debido a que tras el parón de riegos tras cosecha (enero – febrero, ver **Tabla 4**), el agotamiento del agua en el suelo el 1 de marzo es superior al nivel exigido por el modelo para un manejo del cultivo en condiciones óptimas.

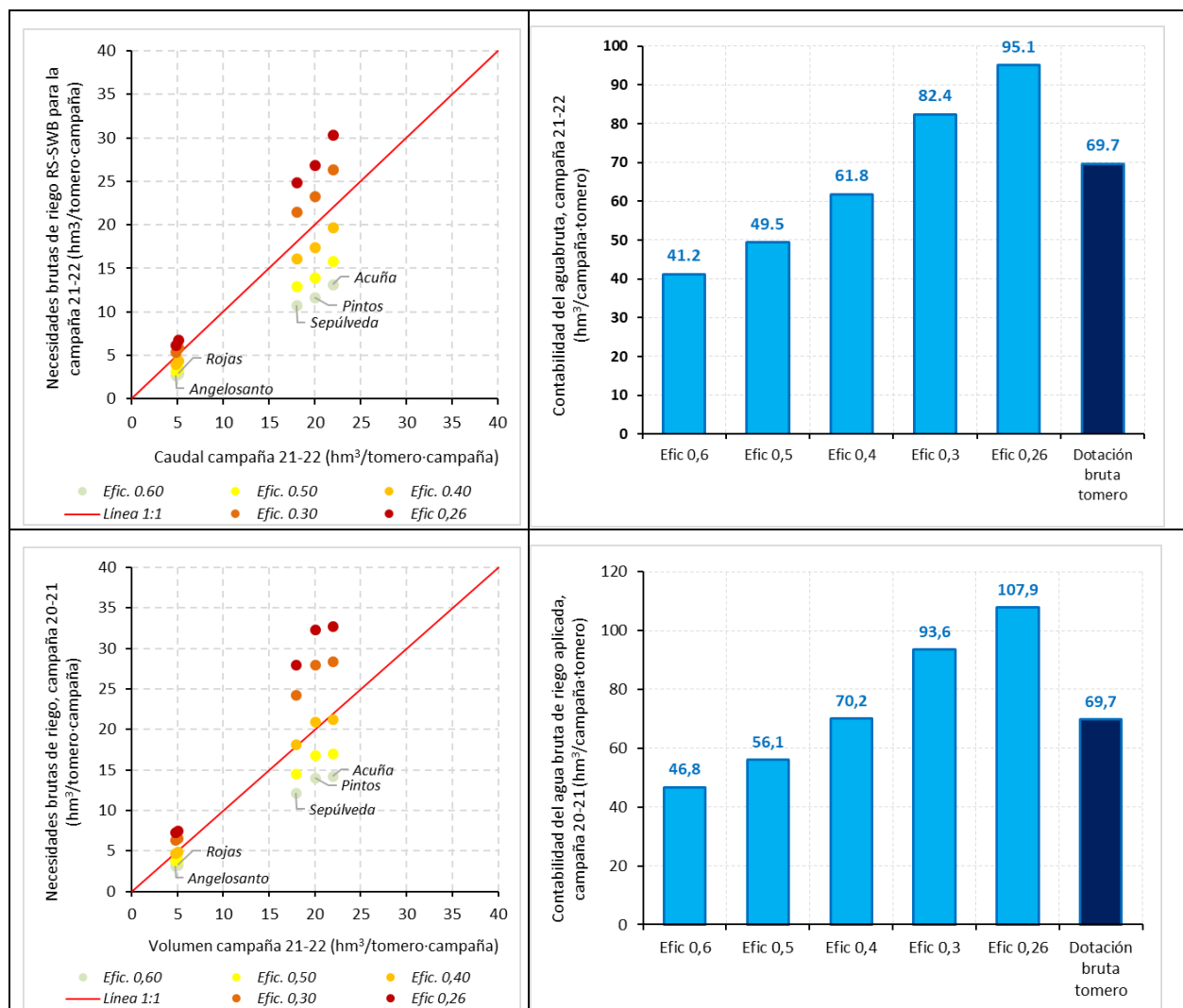


Figura 14. Evaluación por campaña 2020/2021 (fila inferior) y 2021/2022 (fila superior) de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en el subdistrito de riego Villa Regina por tomero (izquierda) y por perímetro total (derecha) según diferentes coeficientes de eficiencia.

Relativo a la escala tomero, se presenta la siguiente **Figura 14** (izquierda) donde se muestran las necesidades netas de agua de riego (NIR) por campaña 2020/2021 y 2021/2022 agrupadas espacialmente a la escala de manejo de los recursos hídricos en la que trabajan los tomeros del subdistrito de riego. Además, se ha planteado diferentes coeficientes globales de eficiencia de riego (incluyendo por tanto la aplicación, distribución y transporte del agua de riego). Dicha comparativa muestra que para un coeficiente global de eficiencia de riego en torno al 0,4 los resultados del modelo y del agua derivada por los tomeros son semejantes. En paralelo y cómo era esperable, llegamos a la misma conclusión si consideramos la escala de manejo del perímetro total del subdistrito de riego, donde la **Figura 14** (columna derecha) muestra las necesidades

netas de agua de riego agrupadas espacialmente a dicho perímetro y según diferentes coeficientes globales de eficiencia de riego. Los resultados de esta evaluación se sustentan en un coeficiente global de aplicación entorno al 0,35 - 0,40 (35 - 40%), semejante al determinado tanto por el consorcio de riegos del subdistrito como por otras fuentes locales disponibles (Galeazzi and Requena, 2011; Ponce et al., 2015; Polla, 2017)

Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua

Para el subdistrito de riego Villa Regina se ha generado la cartografía temática espacialmente distribuida de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección, agregando temporalmente los resultados a la escala mensual y anual. Se muestra a continuación un ejemplo de la cartografía generada y entregada a los gestores agua (**Figura 15**). Así mismo, se adjuntan las necesidades netas de agua de riego estimadas por tomero (**Tabla 9**).

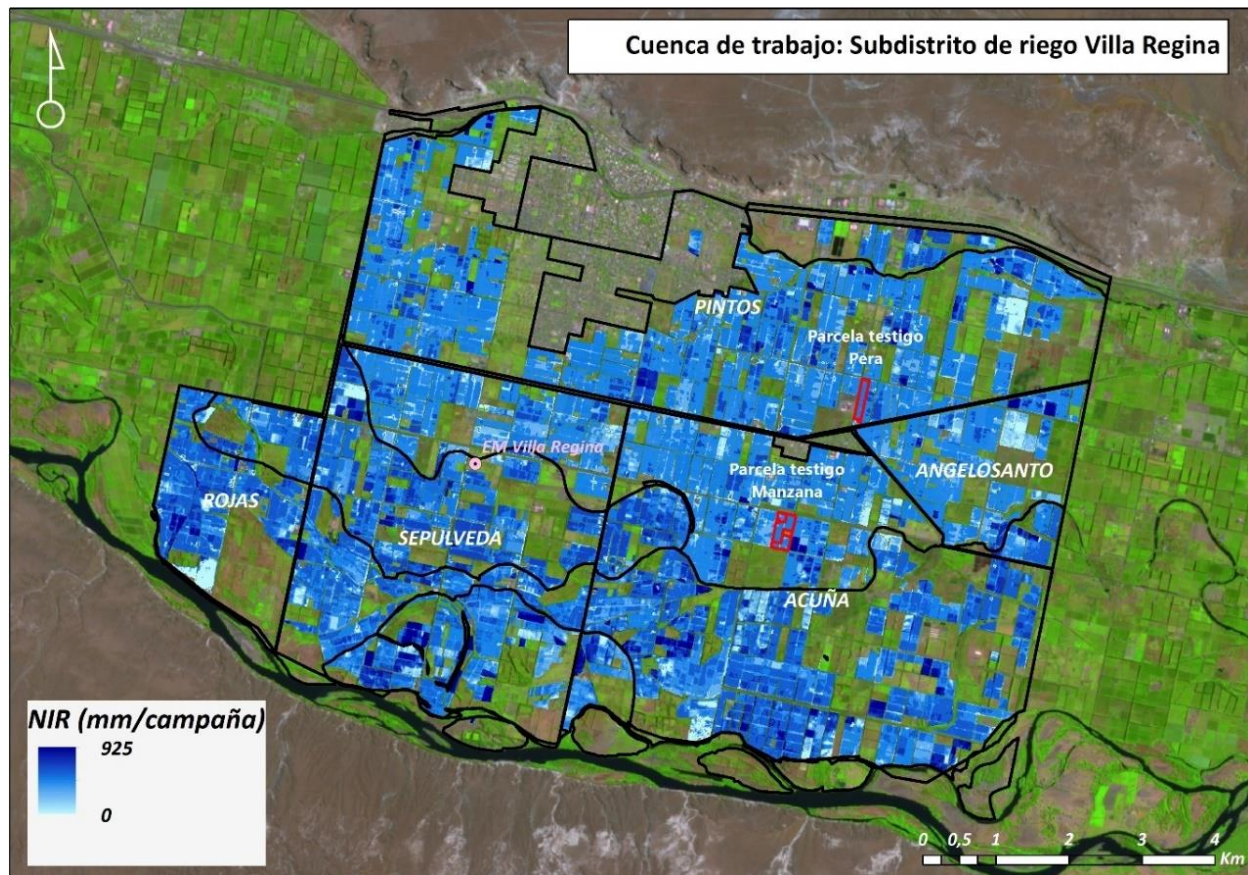


Figura 15. Cartografía temática para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección a escala anual (campana 2021/2022) en el sub-distrito de riego de Villa Regina.

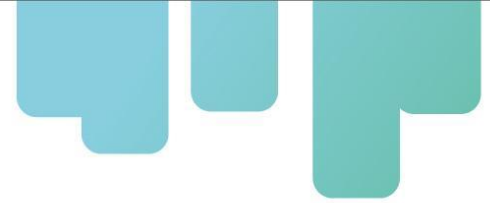


Tabla 9. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en el subdistrito de riego de Villa Regina. Necesidades netas de riego, NIR (hm^3), obtenidas a escala mensual y por campaña de riego.

Periodo	Angelosanto	Acuña	Pintos	Sepúlveda	Rojas
Campaña 2020/2021	4,79	21,37	21,08	18,26	4,92
Sep-20	0,68	3,15	3,04	2,76	0,74
Oct-20	0,67	3,19	2,87	2,67	0,81
Nov-20	0,89	3,99	3,91	3,45	0,92
Dec-20	0,95	4,36	4,20	3,75	1,01
Jan-21	0,05	0,25	0,19	0,25	0,04
Feb-21	0,04	0,20	0,14	0,21	0,03
Mar-21	1,49	6,17	6,70	5,12	1,38
Apr-21	0,01	0,06	0,05	0,06	0,01
Campaña 2021/2022	4,06	19,83	17,53	16,22	4,45
Sep-21	0,69	3,25	3,06	2,81	0,72
Oct-21	0,63	3,08	2,73	2,45	0,74
Nov-21	0,65	3,21	2,88	2,68	0,76
Dec-21	0,98	4,69	4,47	3,88	1,02
Jan-22	0,11	0,62	0,34	0,41	0,07
Feb-22	0,10	0,44	0,24	0,30	0,05
Mar-22	0,90	4,44	3,78	3,59	1,08
Apr-22	0,01	0,11	0,03	0,09	0,02

Tunuyán Inferior. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Presentación del modelo y productos obtenidos

Tanto el modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección como los productos generados y su aplicación a la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección fueron presentados por los autores a los responsables de cuenca en varias reuniones de trabajo. En consonancia con el responsable de la cuenca (Departamento General de Irrigación, DGI) se ha decidido abordar la contabilidad de agua de riego con las siguientes características temporales, espaciales y de manejo de los recursos hídricos recogidas en la

Tabla 10 y Figura 16

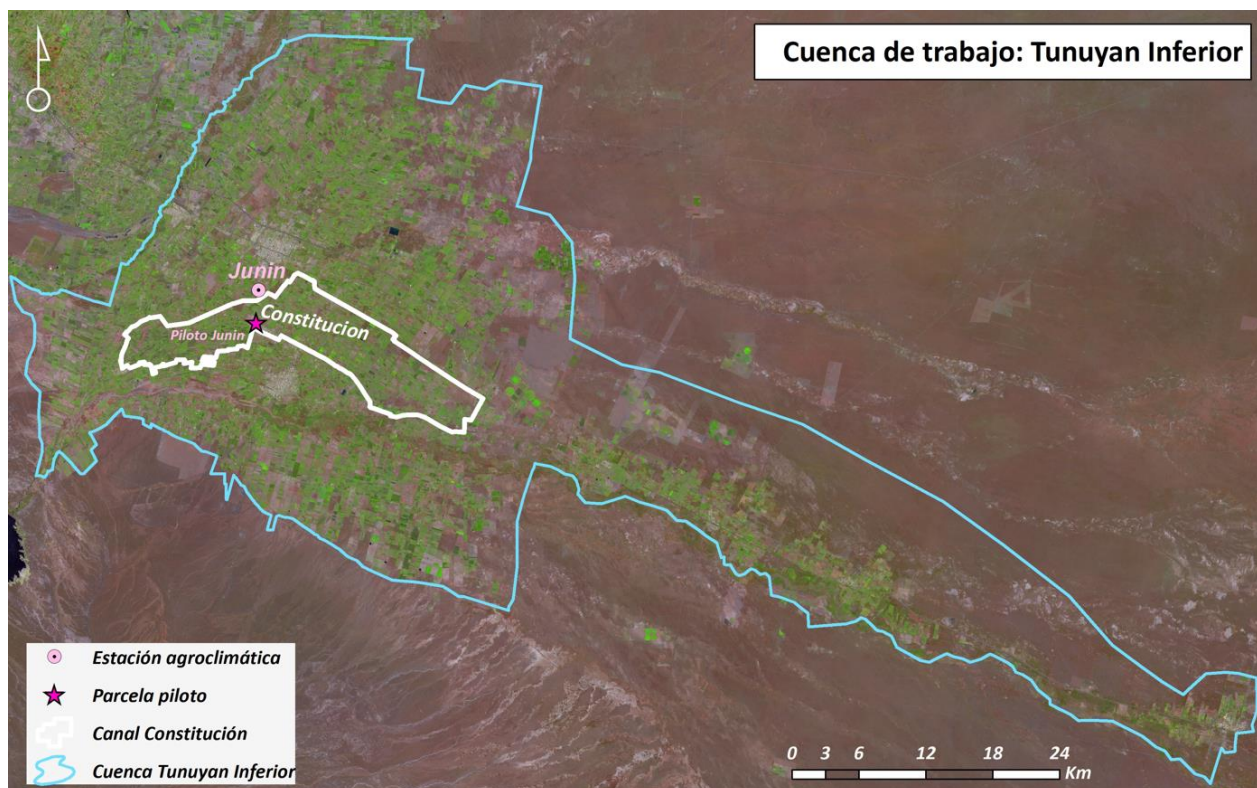


Figura 16. Estaciones agroclimáticas seleccionadas y escalas espaciales de manejo de los recursos hídricos en Tunuyán Inferior para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.

Tabla 10. Características de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Tunuyán Inferior.

Cuenca de trabajo	Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección		
	Campañas de riego consideradas	Resolución temporal	Manejo de los recursos hídricos según unidades espaciales y por cultivo
Subcuenca del río Tunuyán Inferior (Mendoza, Argentina)	2020/2021	Anual y mensual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Perímetro total de la cuenca 2. Canal constitución 3. Parcela piloto Junín

Intercambio de información de entrada al modelo

Las entradas al modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección se dividen en:

i. Series temporales de imágenes de satélite de índice de vegetación NDVI:

Para Tunuyán Inferior fueron procesados dos gránulos (19HED y 19HFD) del satélite Sentinel-2, S2 (gemelos S2A y S2B). La **Tabla 11** muestra las fechas seleccionadas de imágenes NDVI.

Tabla 11. Fechas de imágenes NDVI seleccionadas por campaña de riego en Tunuyán Inferior.

Campaña	Fechas imágenes NDVI (día/mes/año)
2020/2021	02/09/20; 09/09/20; 12/09/20; 14/09/20; 17/09/20; 19/09/20; 22/09/20; 27/09/20; 29/09/20; 07/10/20; 09/10/20; 17/10/20; 19/10/20; 22/10/20; 03/11/20; 06/11/20; 11/11/20; 16/11/20; 18/11/20; 21/11/20; 23/11/20; 26/11/20; 28/11/20; 01/12/20; 03/12/20; 06/12/20; 08/12/20; 11/12/20; 13/12/20; 16/12/20; 18/12/20; 21/12/20; 23/12/20; 28/12/20; 07/01/21; 10/01/21; 17/01/21; 22/01/21; 27/01/21; 04/02/21; 06/02/21; 11/02/21; 14/02/21; 19/02/21; 24/02/21; 26/02/21; 06/03/21; 13/03/21; 21/03/21; 23/03/21; 28/03/21; 31/03/21; 12/04/21; 15/04/21; 20/04/21; 25/04/21; 27/04/21; 05/05/21; 12/05/21; 15/05/21; 25/05/21; 27/05/21 y 30/05/21

ii. Datos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o)

Para Tunuyán Inferior los responsables de cuenca obtuvieron los datos diarios de P y ET_o, así como la localización de la estación Junín (**Figura 16**). Se enumera la estación agroclimática seleccionada: Junín. La siguiente **Figura 17** muestra la evolución diaria de la P, la ET_o y la duración de la campaña de riego (morado), mostrando un acumulado de alrededor de 1200 y 130 mm/campaña de ET_o y P respectivamente.

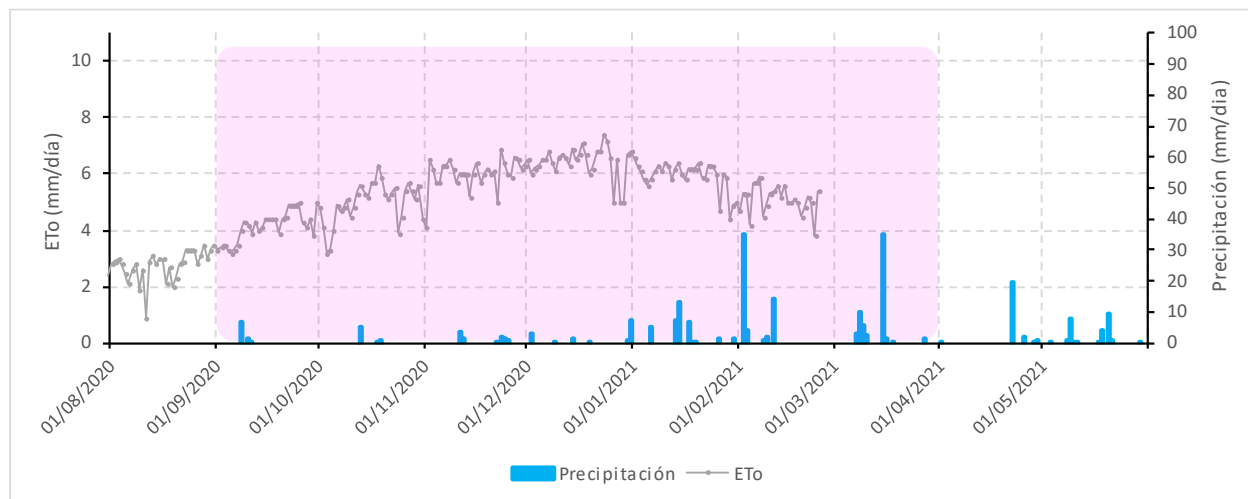


Figura 17. Evolución diaria de la Precipitación y la ET_0 para la estación de Junín.

iii. Mapas de tipos de suelo

Para Tunuyán Inferior los responsables de cuenca entregaron el mapa de tipos de suelos con unidades texturales basada en información y estudios locales (**Figura 18**).

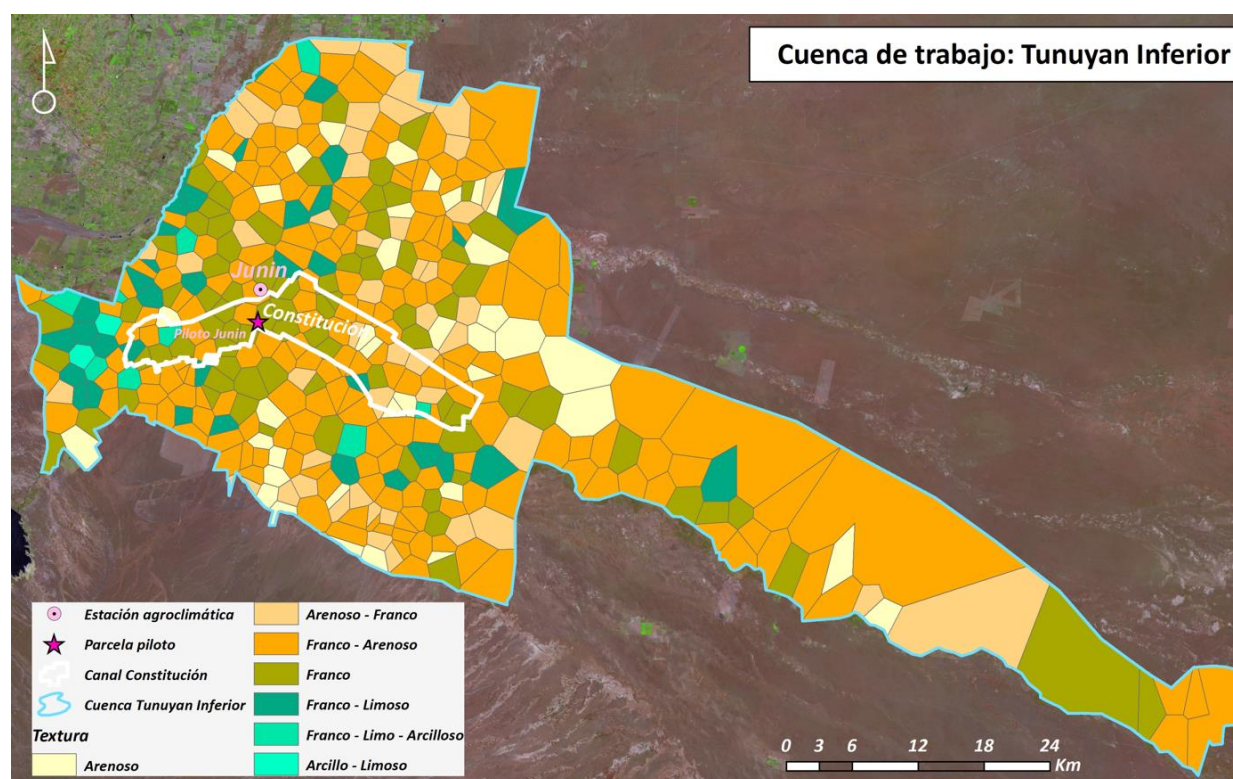


Figura 18. Tipos de suelos en Tunuyán Inferior.

iv. Mapas con la clasificación de usos del suelo en regadío

Para Tunuyán Inferior se utilizó la clasificación de uso de suelos realizada por DGI del año 2014 (*Balance hídrico Cuenca Río Tunuyán Inferior. Año 2021*) al no contar con una fuente de información operativa más actualizada. Esta clasificación presenta usos del suelo leñosos y herbáceos, siendo seleccionados sólo los leñosos para llevar a cabo la contabilidad del agua de riego basada en teledetección pues se asume que gran parte de estos cultivos permanentes aún se desarrollan en las mismas parcelas. En consecuencia, dicha información presenta cuatro clases: Vid; Olivar; Frutal; Asociación. Se aprecia cómo el cultivo de viña predomina sobre el resto y está muy repartidos por toda la superficie (**Figura 19**).

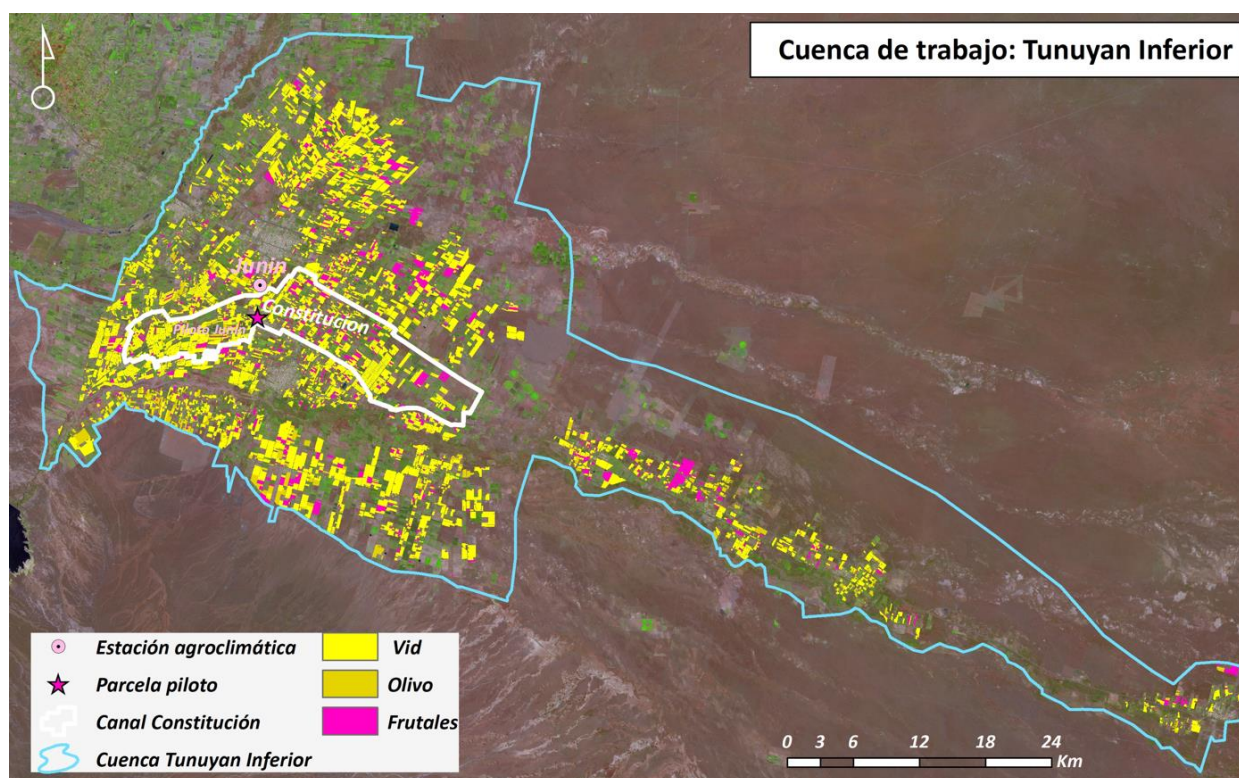


Figura 19. Mapa de usos del suelo en regadío (2014) empleado en Tunuyán Inferior.

v. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados

Para Tunuyán Inferior se han considerado las siguientes características de manejo y riego según los tipos de cultivos clasificados (

Tabla 12).

Tabla 12. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados en Tunuyán Inferior.

Cultivo	Periodo de riego (dd/mm)	Tolerancia al estrés	Agotamiento permisible (p)	Dosis de riego máxima
Vid	15/09 – 15/03	No	0,40	20 mm
Olivar	01/09 – 30/04	No	0,65	20 mm
Frutal	01/09 – 30/04	No	0,50	20 mm

Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

La evaluación sobre la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Tunuyán Inferior no se abordó ya que los resultados generados se basan en una clasificación de usos del suelo antigua (año 2014) y no es posible garantizar una correcta estimación de las necesidades netas de agua de riego asistidas por teledetección. Sin embargo, si se mostraron los resultados con el fin de enseñar la potencia de la información complementaria generada para ser usada por los gestores del agua de riego.

Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua

Para Tunuyán Inferior se ha generado la cartografía temática espacialmente distribuida de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección, agregando temporalmente los resultados a la escala mensual y anual. Se muestra a continuación un ejemplo de la cartografía generada y entregada a los gestores públicos y privados del agua (**Figura 20**). A diferencia de otras cuencas de estudio presentadas en este informe, los resultados estimados mensuales y por campaña de riego no son presentados ya que se basan en una clasificación de usos del suelo antigua y no es posible garantizar su correcta estimación.

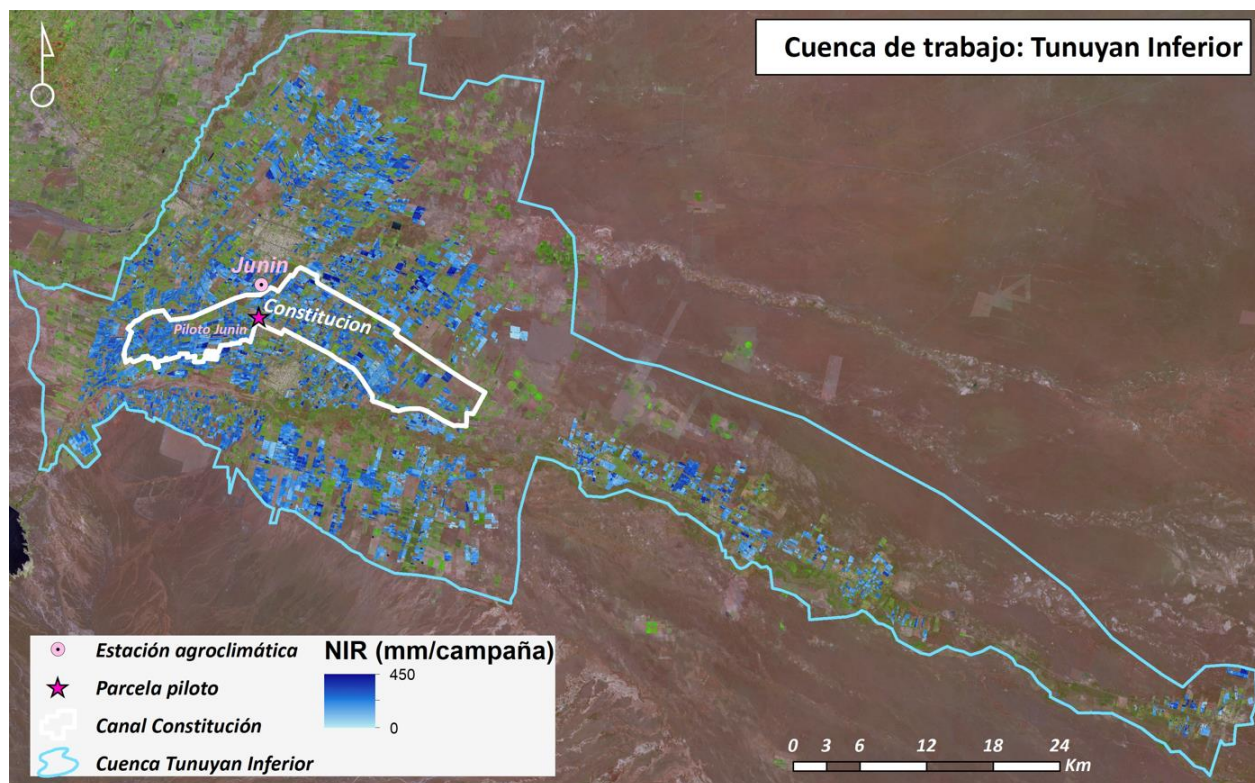


Figura 20. Cartografía temática para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección a escala anual (campaña 2020/2021) en Tunuyán Inferior.

Colonia Fiscal Sarmiento. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Presentación del modelo y productos obtenidos

Tanto el modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección como los productos generados y su aplicación a la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección fueron presentados por los autores a los responsables de cuenca en varias reuniones de trabajo. En consonancia con el responsable de cuenca (INTA EEA San Juan) se decidió abordar la contabilidad de agua de riego con las siguientes características temporales, espaciales y de manejo de los recursos hídricos recogidas en la

Tabla 13 y Figura 21.

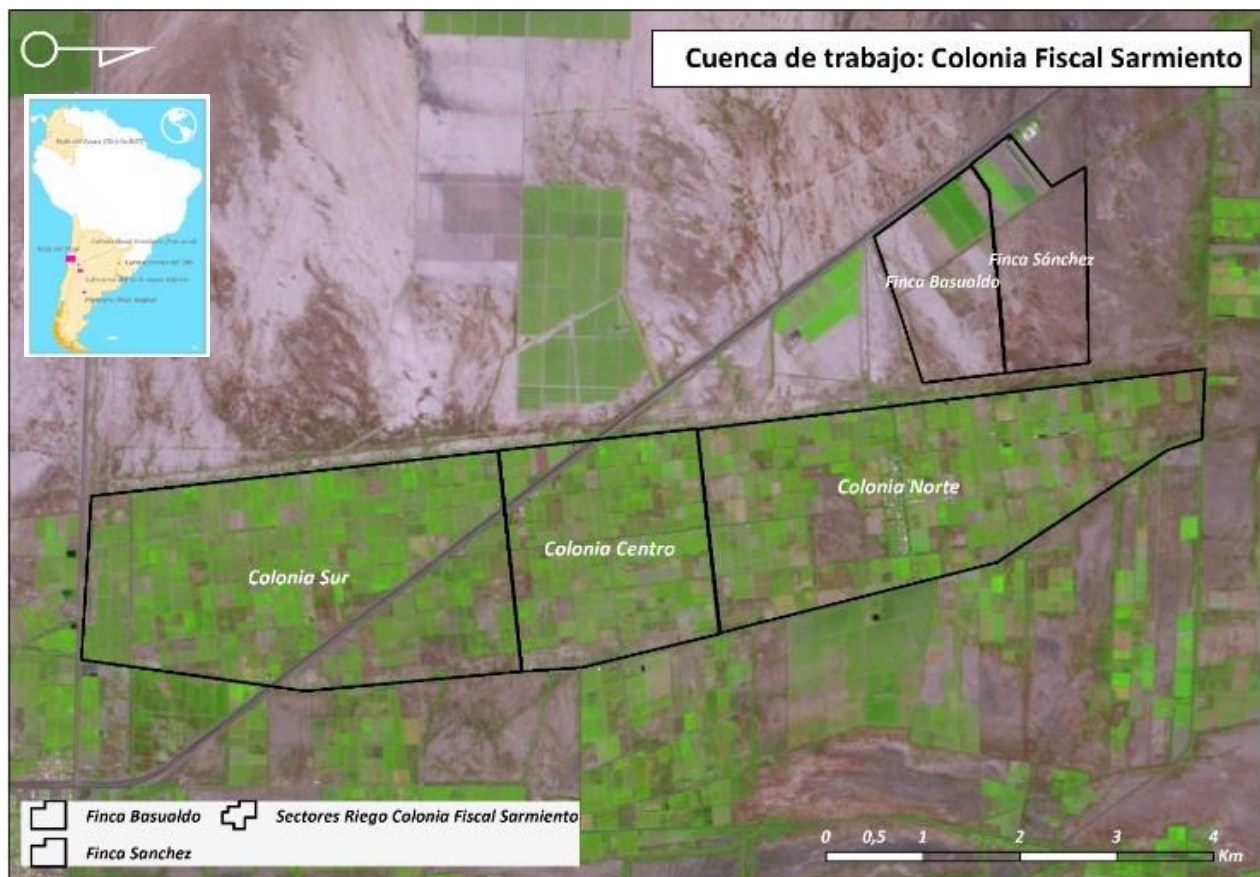


Figura 21. Escalas espaciales de manejo de los recursos hídricos en Colonia Fiscal Sarmiento.

Tabla 13. Características de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Colonia Fiscal Sarmiento.

Cuenca de trabajo	Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección		
	Campaña de riego considerada	Resolución temporal	Manejo de los recursos hídricos según unidades espaciales y por cultivo
Colonia Fiscal Sarmiento (San Juan, Argentina)	2020/2021	Anual y mensual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Perímetro total de la cuenca 2. Sector de riego 3. Tipo de cultivo

La zona regable Colonia Fiscal Sarmiento se ubica en la cola del canal Céspedes. Actualmente, la Colonia Fiscal Sarmiento presenta una fuerte limitación en la disponibilidad del agua tal y como se muestra en la **Figura 22** donde se aprecia una tendencia en la disminución de los recursos hídricos. En la **Figura 22** se muestra para los meses con mayor demanda atmosférica, la media móvil de los últimos 5 años.

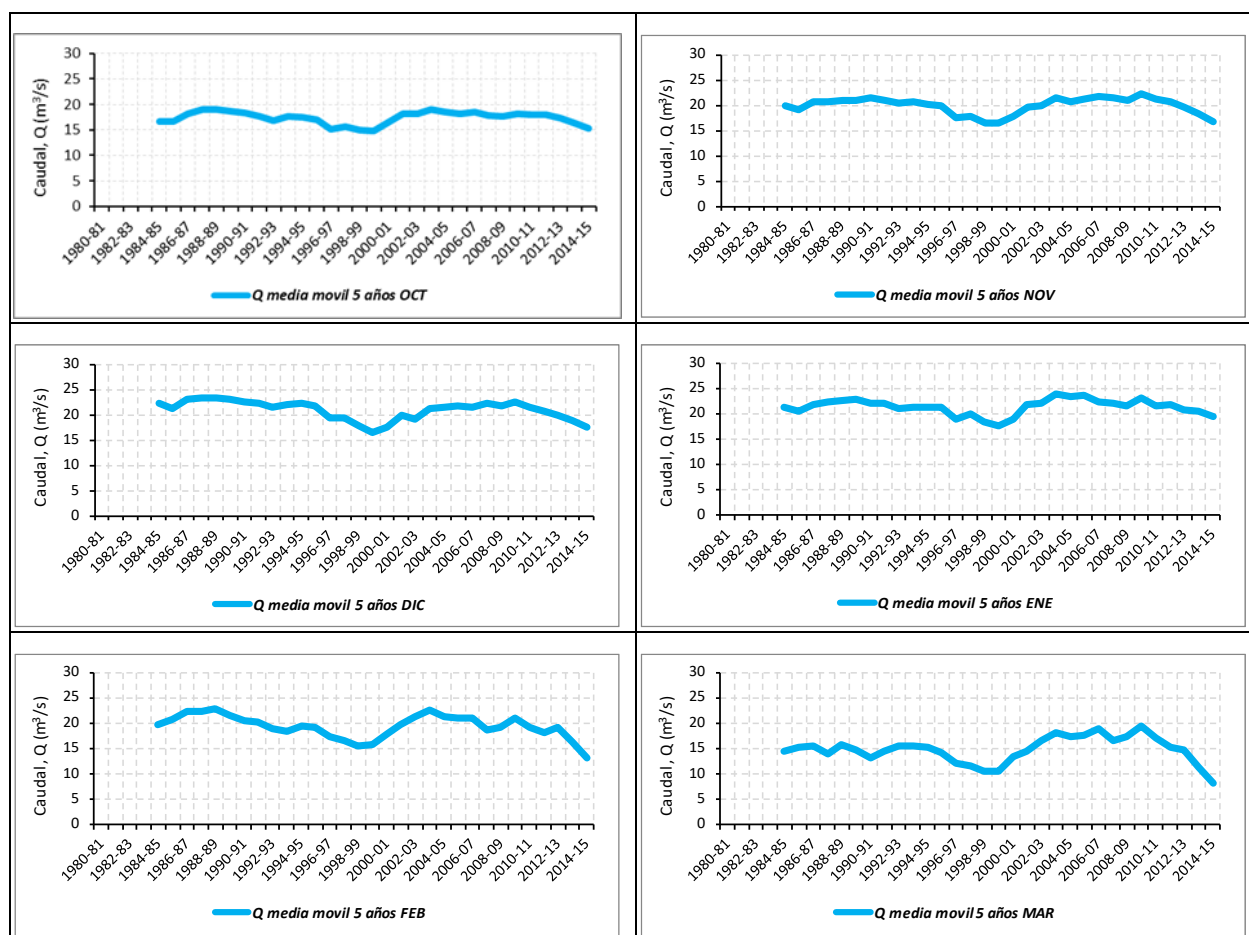


Figura 22. Evolución anual de la media móvil para los últimos 5 años del caudal de agua entregada cada mes a la Colonia Fiscal Sarmiento (representación de los meses con mayor demanda atmosférica).

Intercambio de información de entrada al modelo

Las entradas al modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección se dividen en:

i. Series temporales de imágenes de satélite de índice de vegetación NDVI:

Para Colonia Fiscal Sarmiento fue procesado un gránulo (19HEE) del satélite Sentinel-2, S2 (gemelos S2A y S2B). La **Tabla 14** muestra las fechas seleccionadas de imágenes NDVI.

Tabla 14. Fechas de imágenes NDVI seleccionadas por campaña de riego en Colonia Fiscal Sarmiento.

Campaña	Fechas imágenes NDVI (día/mes/año)
2020/2021	03/08/20; 13/08/20; 23/08/20; 28/08/20; 02/09/20; 07/09/20; 12/09/20; 17/09/20; 22/09/20; 02/10/20; 07/10/20; 17/10/20; 22/10/20; 01/11/20; 06/11/20; 11/11/20; 16/11/20; 21/11/20; 26/11/20; 01/12/20; 06/12/20; 16/12/20; 26/12/20; 10/01/21; 30/01/21; 04/02/21; 14/02/21; 06/03/21; 16/03/21; 31/03/21; 15/04/21; 20/04/21; 25/04/21; 05/05/21; 15/05/21; 25/05/21 y 30/05/21

ii. Datos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o)

Para Colonia Fiscal Sarmiento se obtuvo los datos diarios de P y ET_o, así como su localización para la estación agroclimática Lote 7 (**Figura 21**). La siguiente **Figura 23** muestra la evolución diaria de la P, la ET_o y la duración de la campaña de riego (morado), mostrando un acumulado de alrededor de 1500 y 100 mm/campaña de ET_o y P respectivamente, estando la P centrada exclusivamente durante el mes de marzo (70 mm), con lo que los recursos hídricos disponibles por parte de la precipitación son escasos a lo largo de la campaña estudiada.

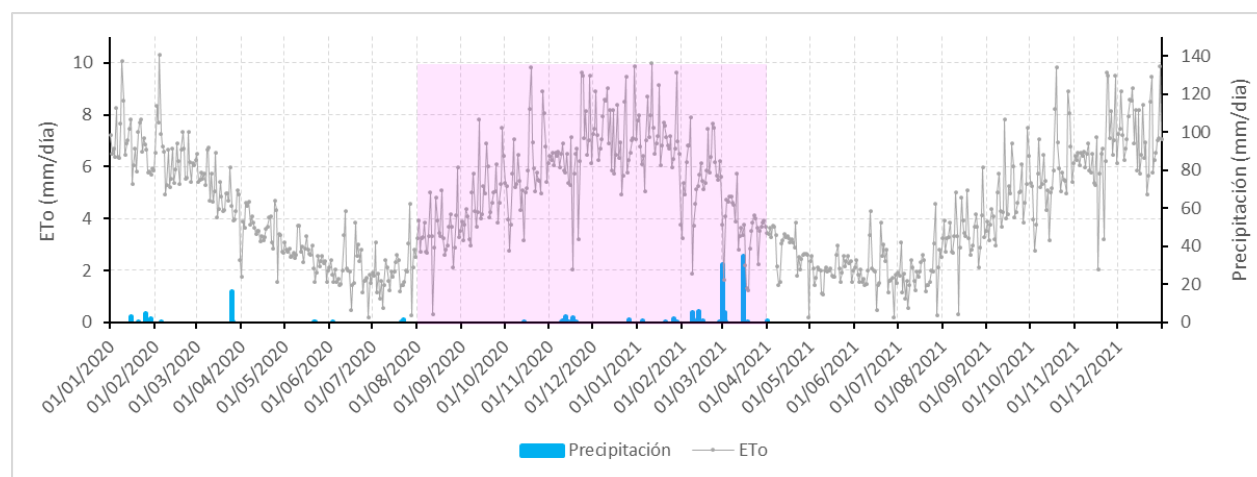


Figura 23. Evolución diaria de la Precipitación y la ET_o, en Lote 7.

iii. Mapas de tipos de suelo

Para Colonia Fiscal Sarmiento los responsables de cuenca entregaron el mapa de tipos de suelos (PROSAP, 2015) con unidades texturales basada en información y estudios locales (**Figura 24**).

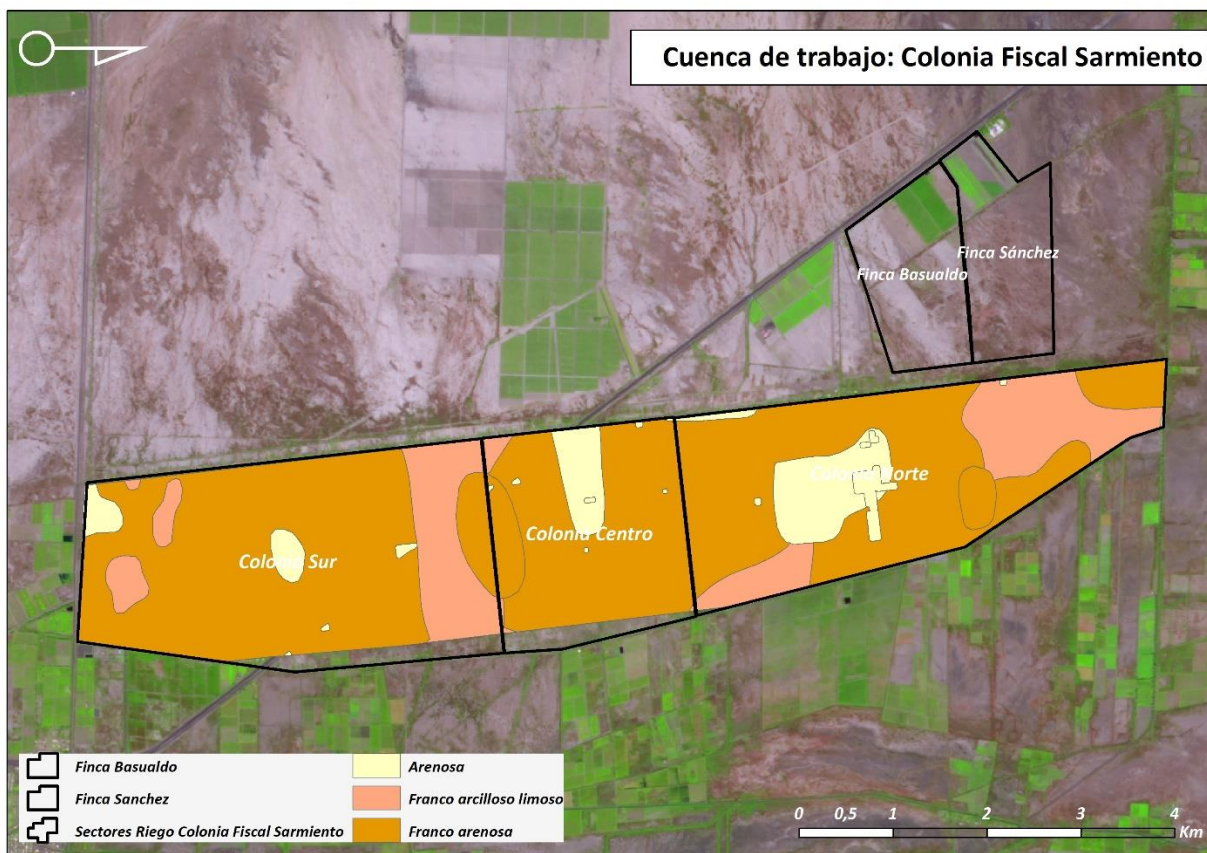


Figura 24. Tipos de suelos en Colonia Fiscal Sarmiento para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.

iv. Mapas con la clasificación de usos del suelo en regadío

Para Colonia Fiscal Sarmiento se utilizó la clasificación de uso de suelos realizada por los responsables locales de cuenca, a través de la serie temporal de NDVI para finalmente, y sobre la base de una clasificación no supervisada mediante el algoritmo de agrupamiento kmeans (Clusterización), obtener las clases de cobertura de suelo. Esta clasificación cuenta con usos del suelo leñosos de tipo viña y herbáceos del tipo alfalfa. Se aprecia claramente cómo el cultivo de viña destaca sobre alfalfa encontrándose muy repartido por toda la cuenca de trabajo (**Figura 25**), de forma que se contabilizan unas 1710 ha de viñedo (1020 ha para viñedo en producción y 690 ha para viñedo viejo/abandonado) y unas 60 ha para alfalfa.

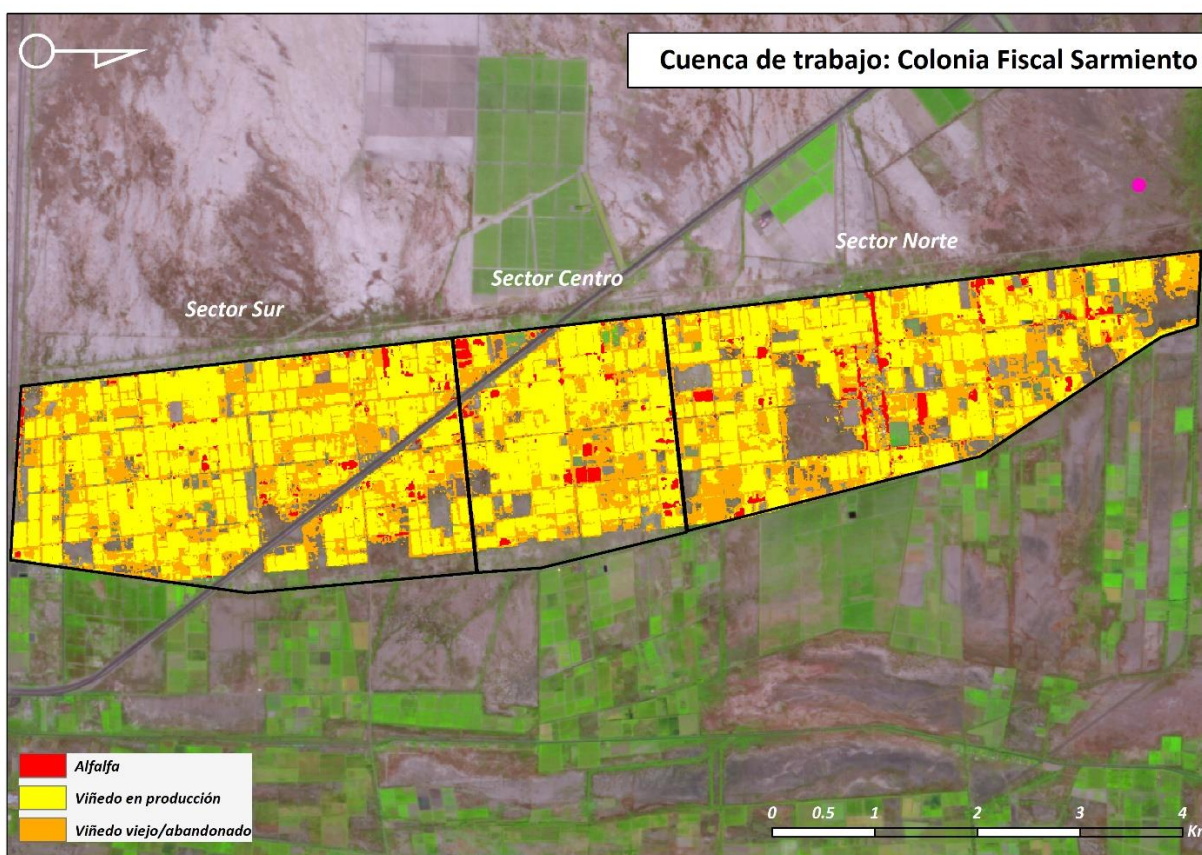


Figura 25. Mapa de usos del suelo en regadío empleado en Colonia Fiscal Sarmiento para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.

Para evaluar la fiabilidad de la clasificación, que a diferencia de otras cuencas de trabajo no ha sido entregada por los gestores privados del agua, sino que fue generada por los responsables de cuenca, se obtuvo el NDVI promedio a lo largo de toda la campaña para los usos de viñedo en producción y viñedo viejo/abandonado. El NDVI promedio nos indica para cada fecha de pasada del satélite, el valor promedio de NDVI que tiene ambos tipos de usos de suelo antes mencionados. Así, al ejecutar y obtener el NDVI promedio para cada fecha de captura de la imagen satelital a lo largo de la campaña de riego, se obtiene la serie temporal NDVI promedio por uso del suelo, lo que ofrece una información sobre cómo se comporta el uso del suelo clasificado. La **Figura 26** muestra la evolución para la viña en producción (arriba) y la viña vieja y/o abandonada (abajo). En ella se observa una evolución temporal similar y correspondiente a un cultivo de viña, pero además es posible cuantificar un mayor valor de NDVI en la meseta de la viña en producción (alrededor de 0,55), que en la vieja/abandonada (alrededor de 0,40). De esta forma, obtenemos confianza en la clasificación generada para ser usada como insumo de trabajo en el balance de agua en el suelo asistido por teledetección.

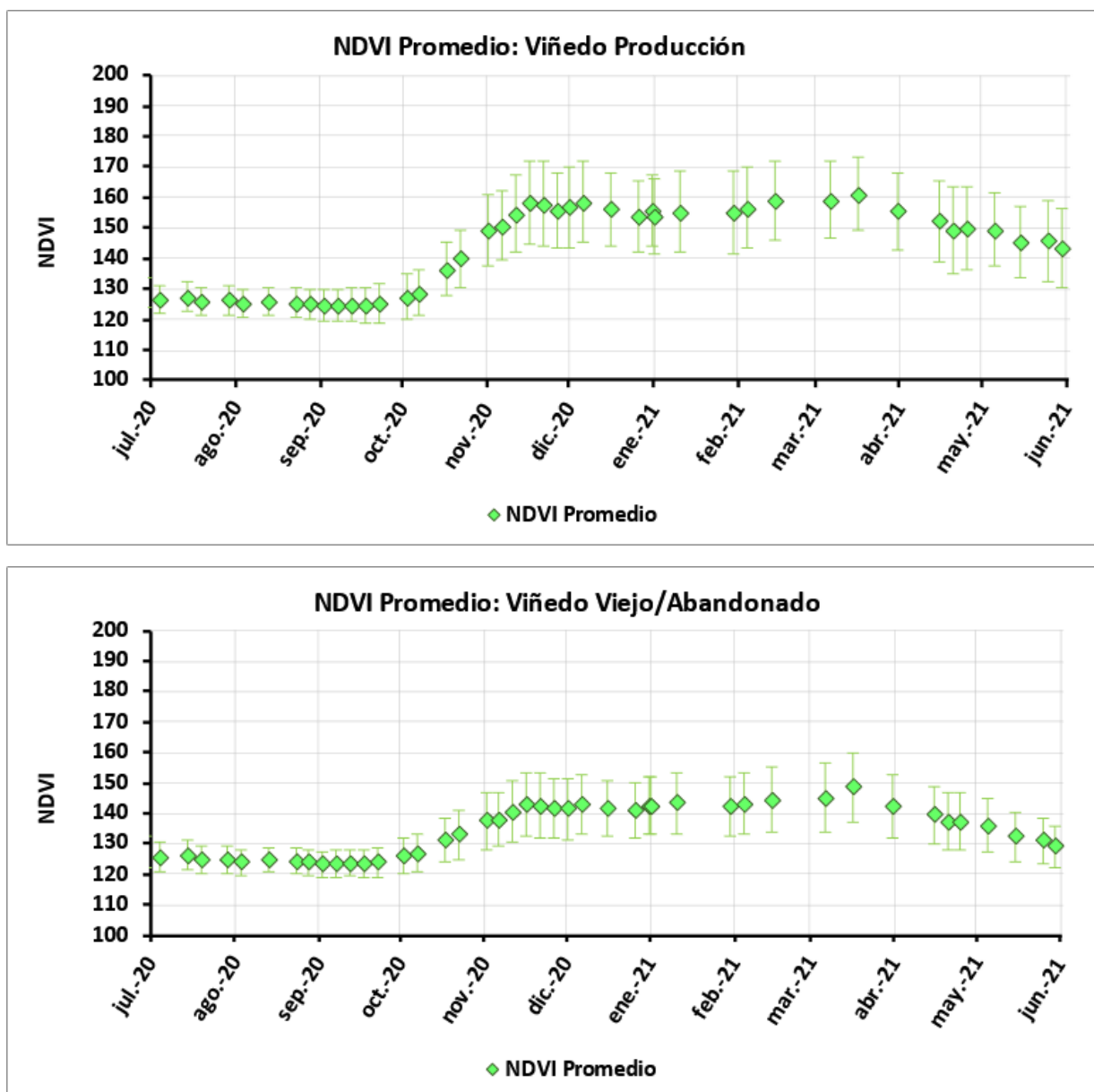


Figura 26. NDVI promedio para la campaña de riego 2020/2021 y los usos del suelo clasificados como viña en producción y viña vieja/abandonada. Informar que los valores de NDVI se han escalado de 0-200, en lugar de 0-1.

v. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados

Para Colonia Fiscal Sarmiento se han considerado las siguientes características de manejo y riego

según los tipos de cultivos clasificados (**Tabla 15**). Comentar que el periodo de riego fue ajustado a la disponibilidad de agua en el Canal Céspedes de transporte pues los responsables locales proporcionaron dichos datos que incluyen cortas en el suministro. Por ello, el periodo de riego se ha podido ajustar a escala diaria (desde enero de 2021) gracias a que los responsables de cuenca han proporcionado el dato del caudal aforado diariamente que entra en la Colonia Fiscal Sarmiento (**Figura 27**). Así mismo, se ha proporcionado el caudal declarado por cada regante, el cual no pudo ser satisfecho a lo largo de la campaña con lo que se aproxima un coeficiente de cobertura de lo declarado en 0,6. Dicho coeficiente, inferior a 1, nos expresa que el agua aforada alcanzó a proporcionar un caudal de 0,17 l/s-ha, mientras que lo declarado por el regante fue de 0,29 l/s-ha. Esto equivaldría a una dotación declarada de 5.030 m³/ha, mientras que sólo alcanzó a entregar 2.950 m³/ha. Es por ello que, la simulación del balance de agua en el suelo asistido por teledetección ha introducido para el cultivo de la vid un coeficiente de estrés severo (Ks: 0,5), tratando así de simular un estrés hídrico derivado de la baja disponibilidad de agua en Colonia Fiscal Sarmiento (**Tabla 15**).

Tabla 15. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados en Colonia Fiscal Sarmiento.

Cultivo	Periodo de riego ¹ (día/mes)	Tolerancia al estrés	Agotamiento permisible (p)	Dosis de riego máxima
Vid	01/08 – 02/01; 03-18/01; 21/01-12/02; 17-26/02; 23-30/03; 14-19/04	Sí (Ks: 0.5)	0,35	100 mm
Alfalfa		No	0,55	100 mm

¹ ajustado a la disponibilidad de agua en las acequias de transporte

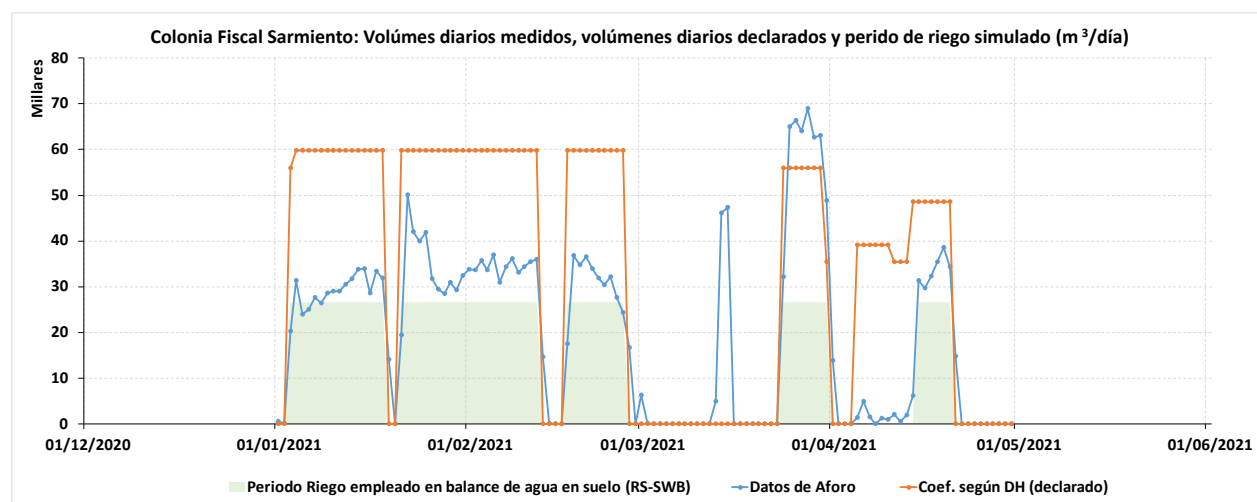


Figura 27. Volúmenes diarios aforados, declarados por los regantes y periodo de riego diario empleado en el balance de agua en el suelo asistido por teledetección para Colonia Fiscal Sarmiento.

Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Para la evaluación sobre la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Colonia Fiscal Sarmiento, se han aportado datos sobre demandas netas promedio por tipo de cultivo, volumen de agua histórico entregado y volúmenes actuales entregados de agua de riego en la campaña 2020/2021 sobre las unidades espaciales de manejo de los recursos hídricos denominados sectores de riego (**Figura 9**). A continuación, mostramos los resultados de evaluación sobre las diferentes escalas de manejo.

En relación al comportamiento de la demanda neta de agua de la viña en producción en Colonia Fiscal Sarmiento, los valores estimados han sido comparados con valores de demanda neta de riego según estudios locales (Liotta et al., 2010). En la **Figura 28** se muestra la comparativa de las necesidades hídricas del cultivo de viña en producción y viejo/abandonado a escala mensual (izquierda) y por campaña de riego (derecha) frente a las estimadas por estudios locales. En ambos cultivos y escalas las necesidades hídricas simuladas son menores a las indicadas por el estudio citado debido de tolerancia al estrés (K_s : 0,5) parametrizada en el modelo RS-SWB que genera una disminución en la tasa de transpiración, tratando así de aproximarse al manejo del riego que los regantes en Colonia Fiscal Sarmiento deben afrontar al recibir menos agua de la que demandan antes comentada (coeficiente de cobertura 60%).

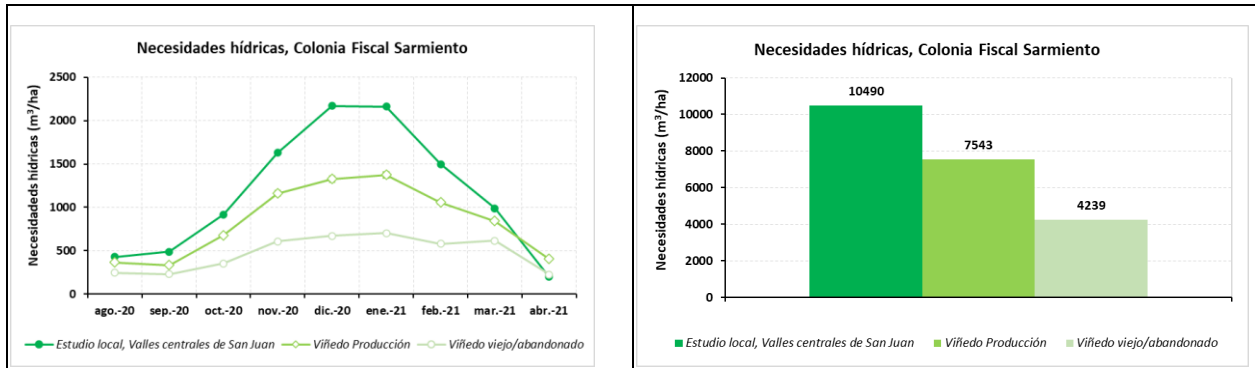


Figura 28. Comparativa a frecuencia mensual y de campaña de riego de la demanda de agua de riego simulada frente a estudios locales para la región de San Juan.

Además de la anterior evaluación, se ha contado datos sobre el agua suministrada por el canal Céspedes (enero, 2021 – diciembre, 2021) y los bombeos realizados (noviembre, 2020 – diciembre, 2021). Es necesario especificar que para contar con una serie temporal continua sobre el agua suministrada a Colonia Fiscal Sarmiento (agosto, 2020 – abril, 2021), se asume que:

- Usamos el agua aforada por el canal Céspedes para el periodo de agosto a diciembre 2021 como la suministrada durante el periodo agosto a diciembre 2020.
- Usamos el agua bombeada para el periodo de agosto a octubre 2021 como la bombeada durante el periodo agosto a octubre 2020.

En consecuencia, se ha evaluado la contabilidad del agua de riego y se presenta la **Figura 29** que compara a escala mensual las necesidades netas de agua de riego a del viñedo en producción (VP) y el viñedo viejo/abandonado (VV/VA) según consideremos riego neto para toda la superficie cultivada (**Figura 29** izquierda) o riego neto para el 60% de la superficie cultivada, porcentaje similar a la cobertura de agua entregada sobre la demanda requerida antes comentada (**Figura 29** derecha). Como se puede observar, existe una sobre estimación en la contabilidad del agua de riego estimada si consideramos toda la superficie regada (**Figura 29** izquierda), mientras que, si asumimos la hipótesis de una cobertura de riego del 60%, el agua neta de riego estimada no supera al agua bruta suministrada y bombeada (**Figura 29** derecha).

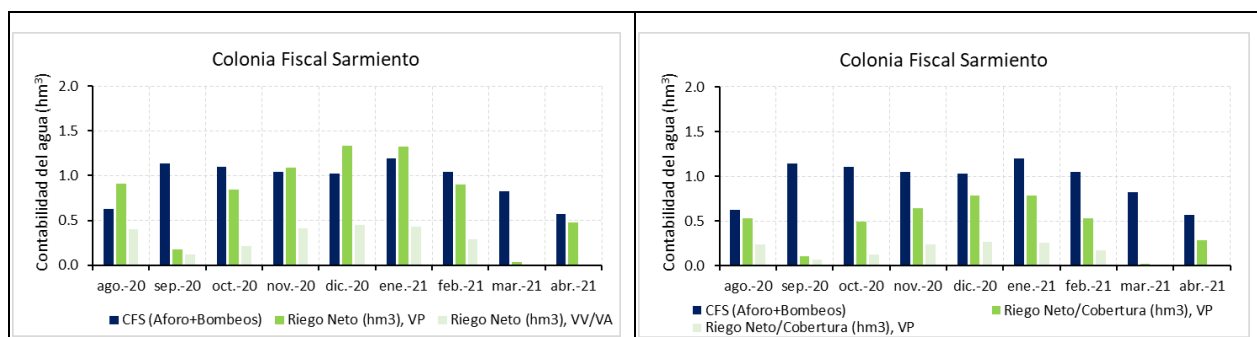


Figura 29. Comparativa a frecuencia mensual del agua suministrada (aforo) y bombeada (bombeo) a Colonia Fiscal Sarmiento respecto a las necesidades netas de agua de riego estimadas para viña en producción (VP) y viña vieja/abandonada (VV/VA) según consideremos regada toda la superficie de cultivo (izquierda) o tan sólo el 60% de la misma (derecha).

En paralelo, la contabilidad a escala temporal de campaña mostrada por la **Figura 30** (izquierda), vuelve a destacar la sobre estimación antes citada (**Figura 29** izquierda), mientras que contabilizando según la hipótesis del 60% (Riego/cobertura Neto y Bruto) observamos cómo la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección ahora sí se asemeja al agua total (aforo + bombeos) suministrada en Colonia Fiscal Sarmiento (**Figura 30** centro). Finalmente se muestra una adecuada relación entre dicha contabilidad bruta de agua de riego y agua suministrada a escala mensual (**Figura 30** derecha) para la hipótesis de cobertura del 60%.

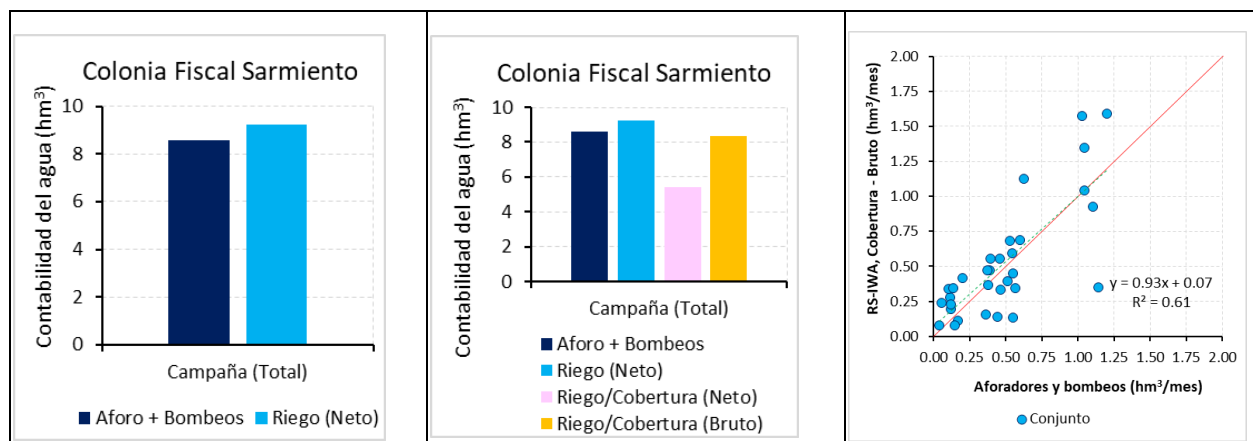


Figura 30. Comparativa a frecuencia anual (campaña de riego) según contabilicemos el agua de riego estimada por teledetección para toda la superficie en regadío (izquierda), añadiendo la hipótesis de cobertura del 60% de la superficie de riego (centro), y la comparación a escala mensual para dicha hipótesis en los 3 sectores de riego (derecha).

Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua

Para Colonia Fiscal Sarmiento se ha generado en consecuencia la cartografía temática espacialmente distribuida de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección, agregando temporalmente los resultados a la escala mensual y anual. Se muestra a continuación un ejemplo de la cartografía generada (**Figura 31**), entregada a los gestores públicos y privados del agua una vez se evalúen y consideren definitivos los resultados generados. Esta cartografía responde a la contabilidad del agua de riego para toda la superficie regable. Debido a que la hipótesis de riego del 60% de la superficie no se trabaja espacialmente distribuida sino con datos agregados no resulta fiable su representación espacial en forma de dicha cartografía. Por el mismo motivo, no presentamos los datos agregados por sector tal y como se ha realizado en las anteriores cuencas de trabajo.

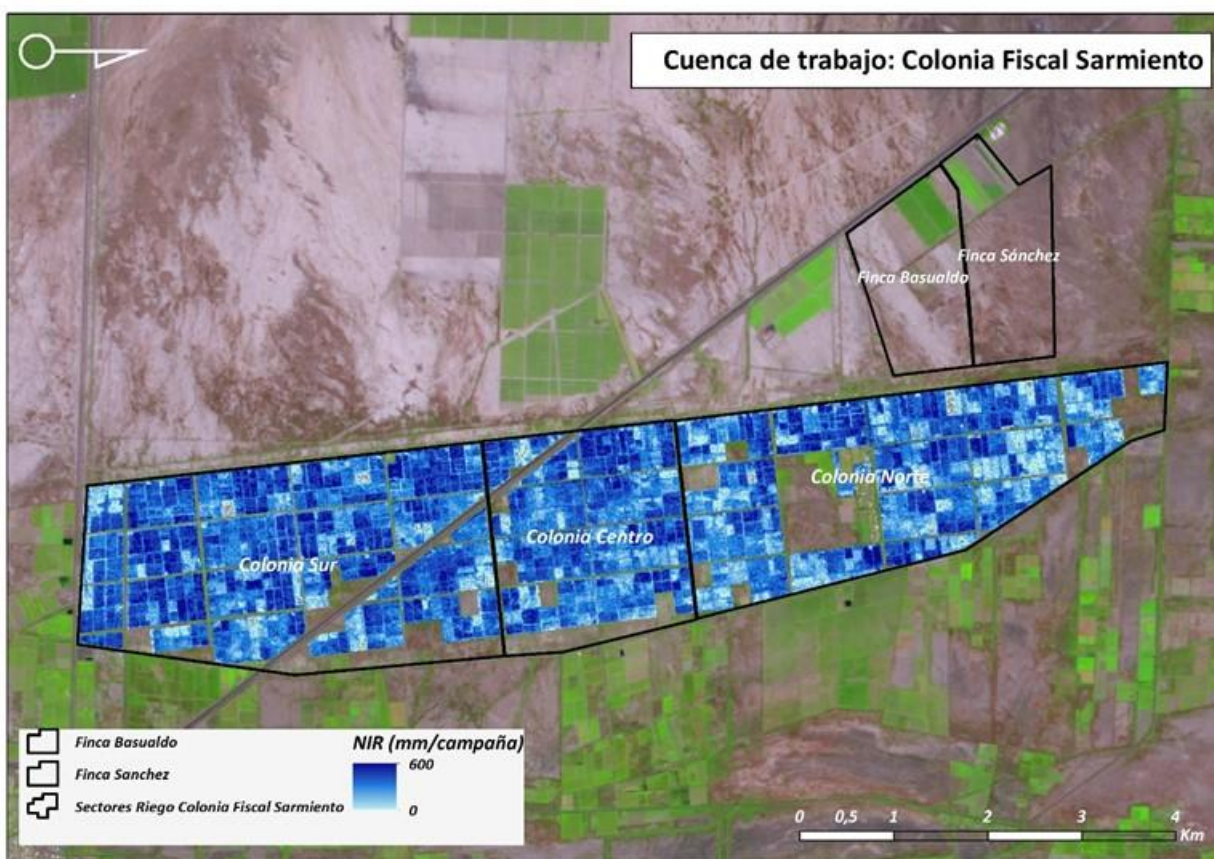


Figura 31. Cartografía temática para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección a escala anual (campaña 2020/2021) en Colonia Fiscal Sarmiento.

Arroyo del Tala. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Presentación del modelo y productos obtenidos

Tanto el modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección como los productos generados y su aplicación a la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección fueron presentados por los autores a los responsables de cuenca en varias reuniones de trabajo. Hasta la fecha y en consonancia con el responsable de la cuenca (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA – Uruguay) y la empresa gestora de los cultivos (DONISTAR S.C.) se ha decidido abordar la contabilidad de agua de riego con las siguientes características temporales, espaciales y de manejo de los recursos hídricos recogidas en la **Figura 32** y **Tabla 16**.



Figura 32. Estaciones agroclimáticas y escalas espaciales de manejo de los recursos hídricos en Arroyo del Tala.

Tabla 16. Características de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Arroyo del Tala.

Cuenca de trabajo	Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección		
	Campañas de riego consideradas	Resolución temporal	Manejo de los recursos hídricos según unidades espaciales y por cultivo
Arroyo del Tala (Salto, Uruguay)	2020/2021 2021/2022	y Anual y mensual	1. Perímetro total de la cuenca 2. Tipología de cultivo

Intercambio de información de entrada al modelo

Las entradas al modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección se dividen en:

vi. Series temporales de imágenes de satélite de índice de vegetación NDVI:

Para Arroyo del Tala fue procesado un gránulo (21JVF) del satélite Sentinel-2, S2 (gemelos S2A y S2B). La **Tabla 17** muestra las fechas seleccionadas de imágenes NDVI.

Tabla 17. Fechas de imágenes NDVI seleccionadas por campaña de riego en Arroyo del Tala.

Campaña	Fechas imágenes NDVI
2020/2021	04/01/20; 24/01/20; 03/02/20; 13/02/20; 23/02/20; 28/02/20; 04/03/20; 19/03/20; 24/03/20; 03/04/20; 08/04/20; 18/04/20; 23/04/20; 03/05/20; 08/05/20; 13/05/20; 18/05/20; 02/06/20; 27/06/20; 02/07/20; 16/08/20; 15/09/20; 20/09/20; 15/10/20; 20/10/20; 30/10/20; 19/11/20; 29/11/20; 04/12/20; 09/12/20; 14/12/20; 24/12/20; 29/12/20; 03/01/21; 13/01/21; 18/01/21; 28/01/21; 07/02/21; 17/02/21; 27/02/21; 09/03/21; 14/03/21 y 13/04/21
2021/2022	12/06/21; 17/07/21; 27/07/21; 01/08/21; 11/08/21; 16/08/21; 26/08/21; 31/08/21; 15/09/21; 05/10/21; 20/10/21; 25/10/21; 30/10/21; 09/11/21; 19/11/21; 24/11/21; 19/12/21; 24/12/21; 29/12/21; 03/01/22; 13/01/22; 02/02/22; 17/02/22; 22/02/22; 14/03/22; 29/03/22; 13/04/22; 18/04/22; 03/05/22; 08/05/22 y 23/05/22

vii. Datos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o)

Para Arroyo del Tala se obtuvo por parte de los responsables de cuenca los datos diarios de P y ET_o, así como su localización (**Figura 32**). Se enumera la estación agroclimática seleccionada: El Junco. La siguiente **Figura 33** muestra la evolución diaria de la P, la ET_o y la duración de la campaña de riego desde septiembre hasta abril (morado), mostrando un acumulado (mm/campaña) de alrededor de 1174 (2020/2021) y 1195 (2021/2022) de ET_o, y 843 (2020/2021) y 874 (2021/2022) de P.

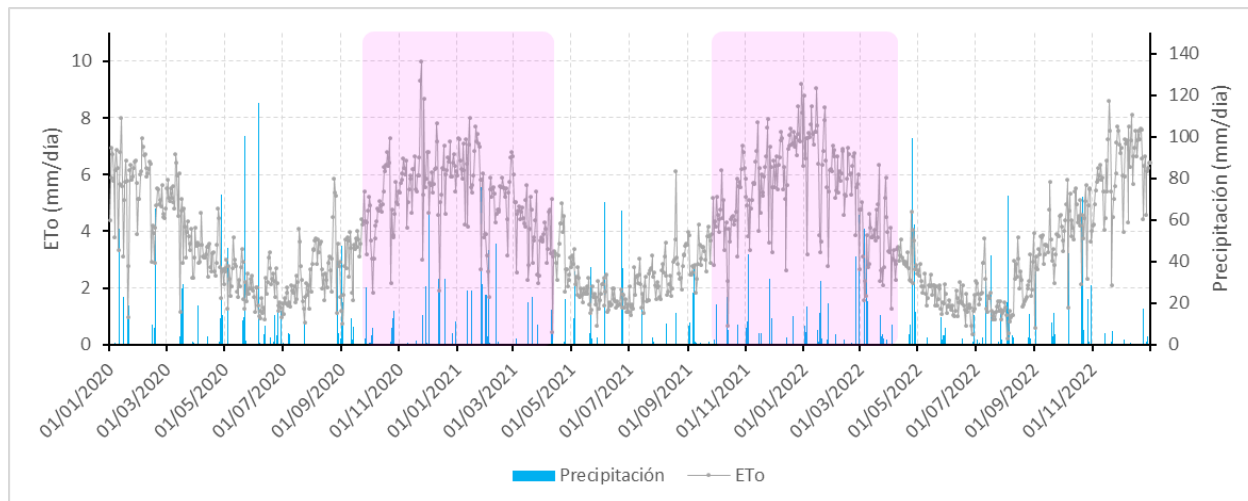


Figura 33. Evolución diaria de la Precipitación y la ET_0 para la estación *el Junco*.

viii. Mapas de tipos de suelo

Para Arroyo del Tala los responsables de cuenca entregaron el mapa de tipos de suelos con unidades texturales basada en información y estudios locales (**Figura 34**).

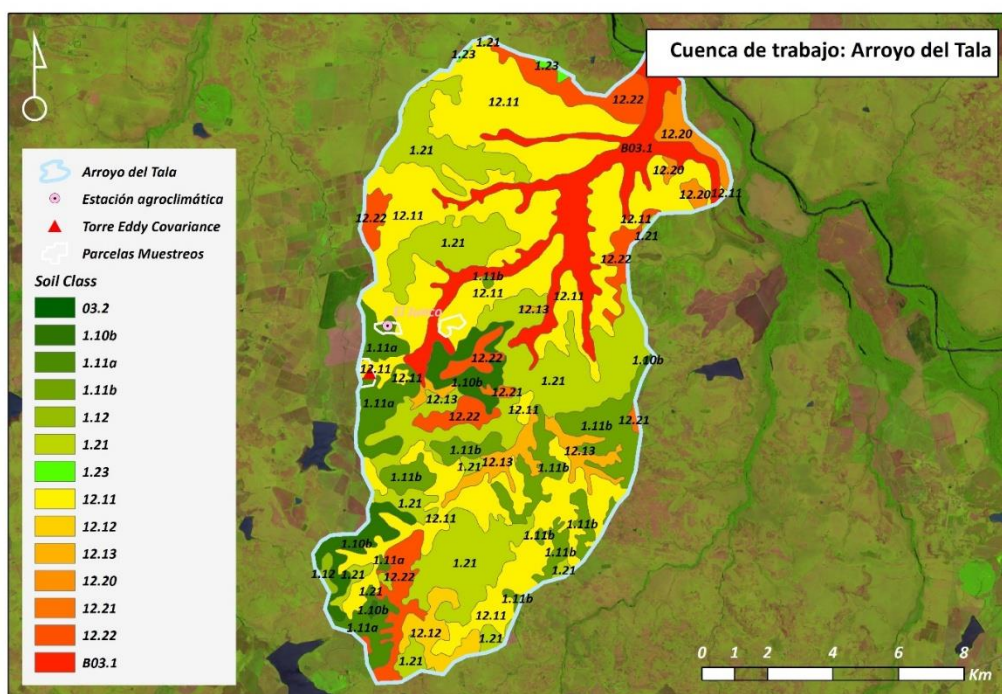


Figura 34. Tipos de suelos en Arroyo del Tala para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.

ix. Mapas con la clasificación de usos del suelo en regadío

Para Arroyo del Tala se utilizó en cada campaña de riego la clasificación de uso de suelos proporcionada por la empresa gestora. Esta clasificación cuenta con las siguientes clases de usos del suelo agrícola (**Tabla 18**): arroz, soja, sorgo, maíz, pradera (**Figura 35**).

Tabla 18. Superficie (ha) de usos del suelo cultivados en Arroyo del Tala.

Superficie (ha)	Arroz	Maíz	Soja	Sorgo	Pradera	Total
2020/2021	990	240	890	530	660	3310
2021/2022	1020	710	1360	200	250	3540

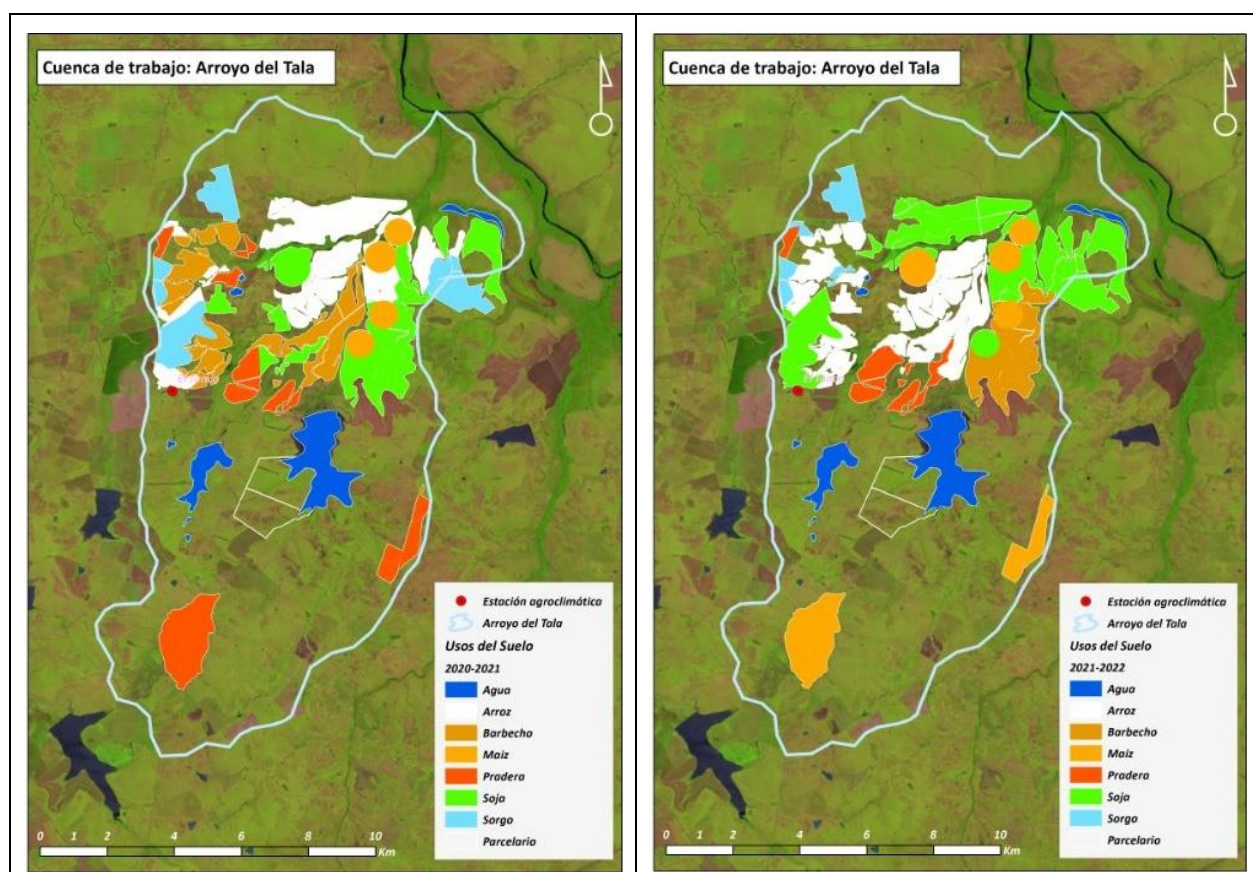


Figura 35. Mapa de usos del suelo 2020/2021 y 2021/2022 en Arroyo del Tala.

x. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados

Para Arroyo del Tala se han considerado las siguientes características de manejo y riego según los tipos de cultivos clasificados (**Tabla 19**).



Tabla 19. Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados en Arroyo del Tala.

Cultivo	Periodo de riego (dd/mm)	Tolerancia al estrés	Agotamiento permisible (p)	Dosis de riego máxima
Arroz	15/09 – 15/04	No	0,20	100 mm
Soja	01/10 – 31/05	No	0,50	12 ¹ mm
Maíz	01/10 – 31/03	No	0,55	12 ¹ mm
Pradera	15/09 – 15/09	No	0,50	100 mm

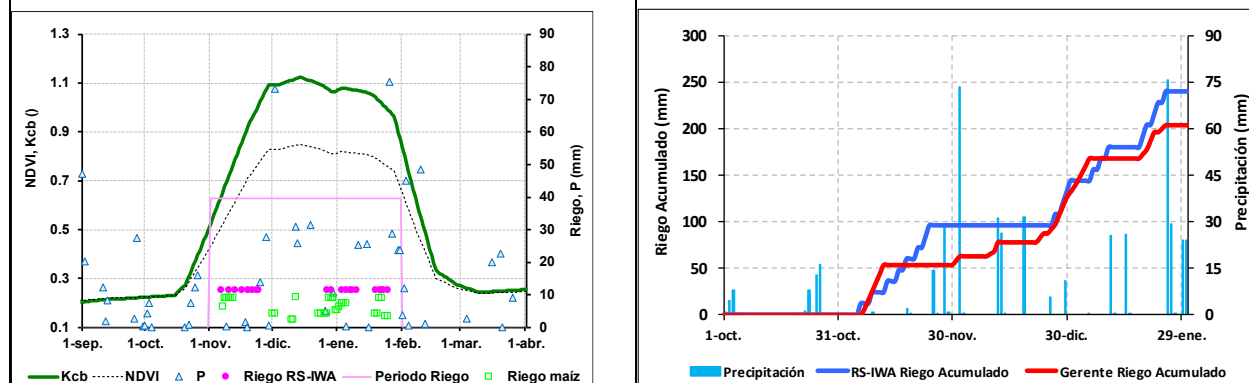
¹ 100 mm cuando se desarrolla en parcelas sin sistema de riego tipo pivot

Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Para llevar a cabo la evaluación sobre la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Arroyo del Tala se ha contado con datos sobre diferentes unidades espaciales de manejo de los recursos hídricos (**Figura 9**) sobre la campaña de riego 2020/2021 y 2021/2022. Así, a escala parcela con cultivo de maíz, soja y arroz los responsables de cuenca facilitaron los datos recogidos por los riegos aplicados durante la campaña 2020/2021. Por otro lado, y a escala cuenca de trabajo, se facilitó el agua almacenada y desembalsada por la Represa 3 Marías durante la campaña 2020/2021. A continuación, mostramos los resultados de evaluación sobre las diferentes escalas de manejo.

A escala de tipo de cultivo se empleó el calendario de riegos para mostrar a los gestores el cálculo diario del balance de agua en el suelo asistido por teledetección en parcelas de maíz y soja. La siguiente **Figura 36** (arriba-izquierda) muestra diariamente para la parcela de maíz las componentes del RS-SWB. A nivel diario y acumulado **Figura 36** (arriba-derecha) se observa cierta similitud temporal en la frecuencia de riegos a lo largo de la campaña. Si bien, las estimaciones presentan ciertas diferencias, particularmente tras los primeros riegos de establecimiento del cultivo ya que en el caso de las estimaciones se detienen aproximadamente un mes desde finales de noviembre por la presencia de agua en el suelo motivada por las abundantes lluvias (5 eventos con más de 30mm/evento). Posteriormente la similitud temporal es más fuerte, alcanzando un valor final de estimaciones de riego netas de 240mm (2400 m³/ha·campaña), frente a los 204mm (2040 m³/ha·campaña) aplicados. Esta sobre estimación es algo más al contar con una eficiencia del sistema de riego en torno al 90%.

Monitorización de parcela de Maíz



Monitorización de parcela de Soja

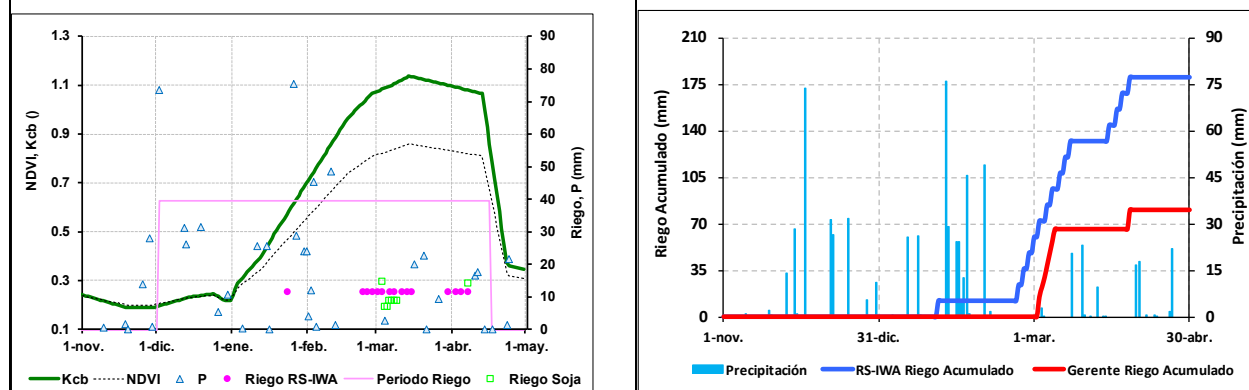


Figura 36. Monitorización en una parcela de maíz (arriba) y soja (abajo) según el píxel testigo obtenido tras el RS-SWB en ambas parcelas y su comparación frente al calendario de riego aplicado en ambas.

Sin embargo, la monitorización en parcela de soja mostrada en la **Figura 36** (abajo-izquierda y abajo-derecha) no muestra una buena similitud temporal en la frecuencia de riegos a lo largo de la campaña, presentando una fuerte sobre estimación en el total por campaña de 100 mm. Esto sugiere que futuros trabajos aborden una modelización que presente una mayor adaptación al manejo de la soja en dicha zona piloto.

En paralelo, y para una monitorización en parcela de arroz se muestra la **Figura 37** aunque sin la comparativa del calendario de riegos aplicado pues se ha contado con el acumulado anual. Dicho acumulado en el caso de las estimaciones y aplicando una eficiencia de riego en torno al 60% devuelve un riego bruto estimado de 975 mm, situándose ligeramente inferior al riego aplicado en la parcela de 1104 mm.

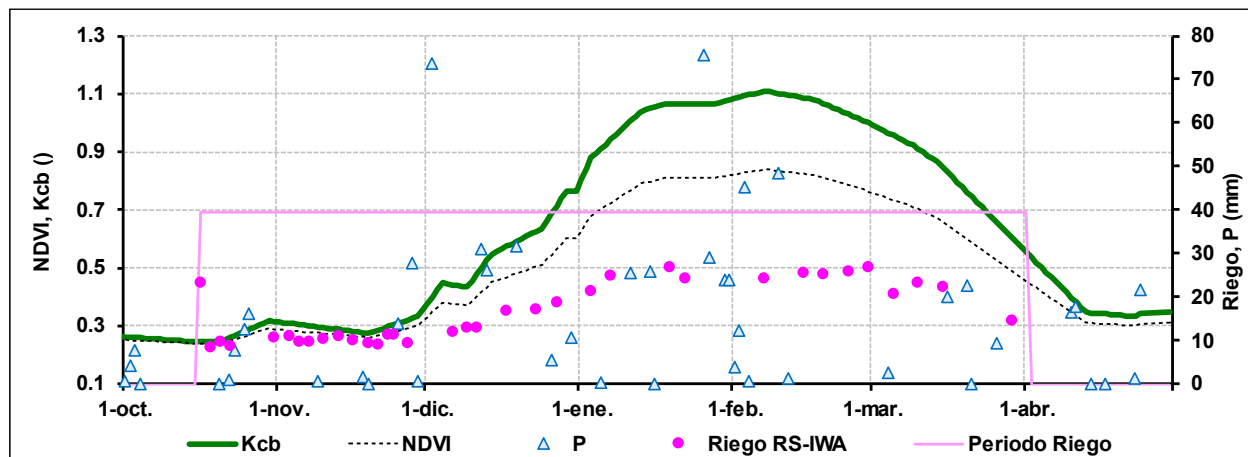


Figura 37. Monitorización en una parcela de arroz según el píxel testigo obtenido tras el RS-SWB.

Finalmente, en esta evaluación a escala de tipología de cultivo presentamos la comparación de los valores promedio por tipo de cultivo para la estimación de las necesidades netas y brutas frente a los aplicados en Arroyo del Tala durante las 2 campañas de monitorización (**Figura 38**). Tal y cómo se puede apreciar, ambos años presentan similares valores de estimación muy semejantes además a los realmente aplicados por los gestores (**Figura 38** derecha)

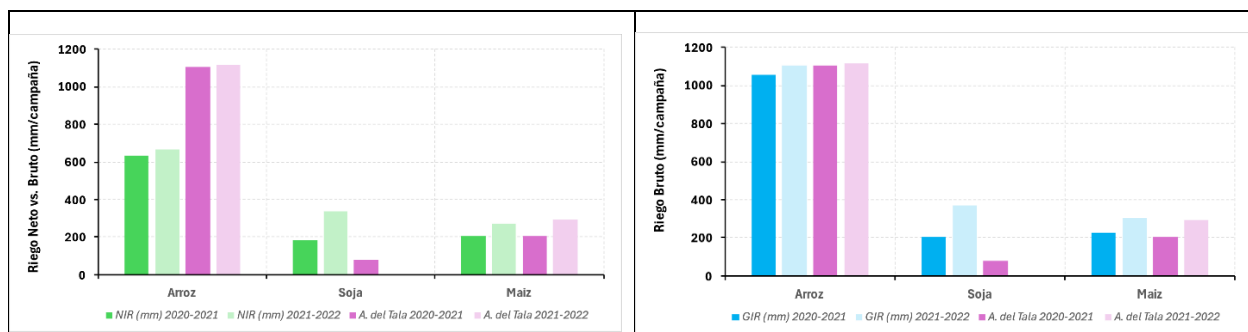


Figura 38. Comparativa del agua total aplicada por tipología de cultivo y la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA). Necesidades netas (NIR) y brutas (GIR) de agua de riego estimadas tras el RS-SWB.

En la segunda escala de manejo utilizada para evaluar la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección se emplean los valores totales del agua liberada para riego por la represa Tres Marías y el total acumulado de las estimaciones netas (NIR) y brutas (GIR) de agua de riego en la campaña 2020/2021 (**Tabla 20** y **Figura 39**). Esta comparativa muestra una baja sobre estimación del 10% al final de la campaña al comparar los casi 10 hm³ de agua liberados para riego frente a los 11 hm³ estimados de agua de riego bruta obtenida tras la RS-IWA.

Tabla 20. Evaluación de la contabilidad del agua del riego asistida por teledetección, escala cuenca, Arroyo del Tala, Salto, Uruguay.

Usos	2020/2021			Eficiencia sistema de riego	2020/2021		
	NIR (mm)	Std (mm)	GIR (mm)		Superficie regada (ha)	NIR TOTAL (hm ³)	GIR TOTAL (hm ³)
Arroz	634	52	1057	0,60	970	6,15	10,25
Soja	185	61	206	0,90	85	0,16	0,17
Maíz	205	56	228	0,90	220	0,45	0,50
Contabilidad del agua asistida por teledetección (RS-IWA)						6,73	10,93
Agua liberada por la represa, hm ³ (gestores)							9,96

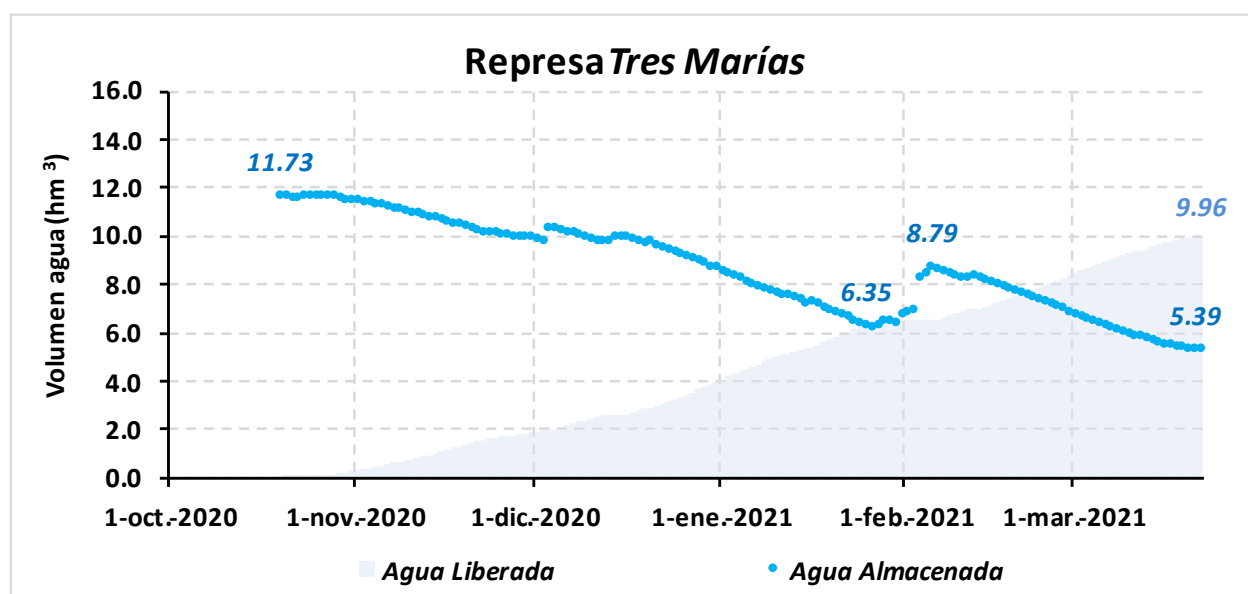


Figura 39. Evolución diaria del volumen de agua de riego almacenada y liberada por la represa Tres Marías.

Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua

Para Arroyo del Tala se ha generado en consecuencia la cartografía temática espacialmente distribuida de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA), agregando temporalmente los resultados a la escala mensual y anual. Se muestra a continuación un ejemplo

de la cartografía generada (**Figura 40**). Así mismo, se adjuntan las necesidades netas de agua de riego (NIR) estimadas (

Tabla 21).

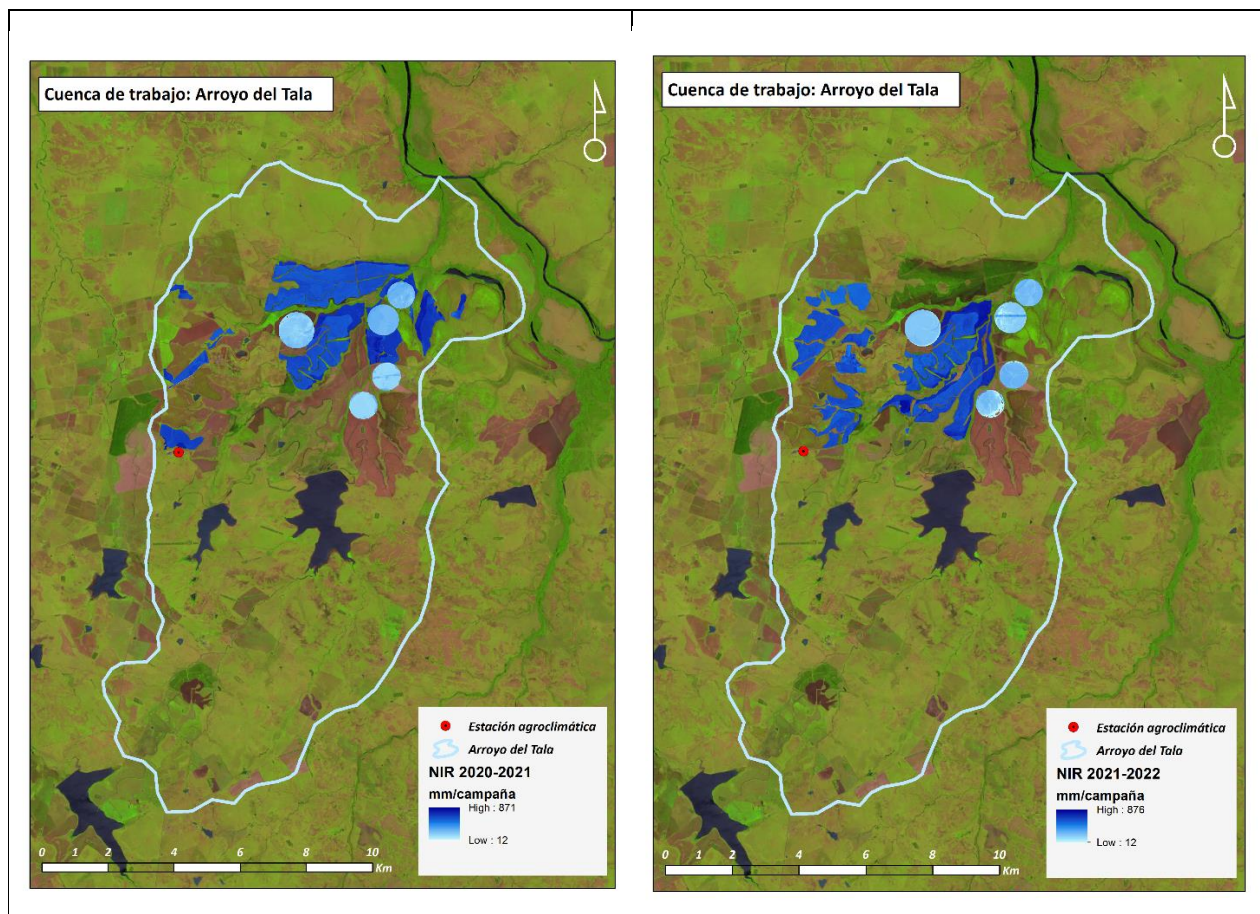


Figura 40. Cartografía temática para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección a escala anual (campana 2020/2021 y 2021/2022) en Arroyo del Tala.



Tabla 21. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en el Arroyo del Tala, Salto, Uruguay. Necesidades netas de riego, NIR (hm^3), obtenidas a escala mensual y por campaña de riego.

Periodo	Arroyo del Tala (hm^3)	Periodo	Arroyo del Tala (hm^3)
Campaña 2020/2021	6,73	Campaña 2021/2022	7,65
Oct-20	0,65	Oct-21	0,70
Nov-20	1,48	Nov-21	1,09
Dic-20	1,03	Dic-21	2,18
Ene-21	1,42	Ene-22	1,58
Feb-21	1,21	Feb-22	1,39
Mar-21	0,89	Mar-22	0,68
Abr-21	0,06	Abr-22	0,03

Distrito RUT. Contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Presentación del modelo y productos obtenidos

El modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección y su aplicación a la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección fueron presentados por los autores en varias reuniones de trabajo a los responsables de cuenca (AGROSAVIA) y la empresa gestora de los cultivos (ASORUT, Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de los Municipios de Roldanillo, La Unión y Toro). A pesar de contar con una excelente información de campo, la elevada presencia de nubes imposibilitó ejecutar el RS-SWB, con lo que en este apartado presentaremos la información de entrada suministrada pero no se incluyen la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA).

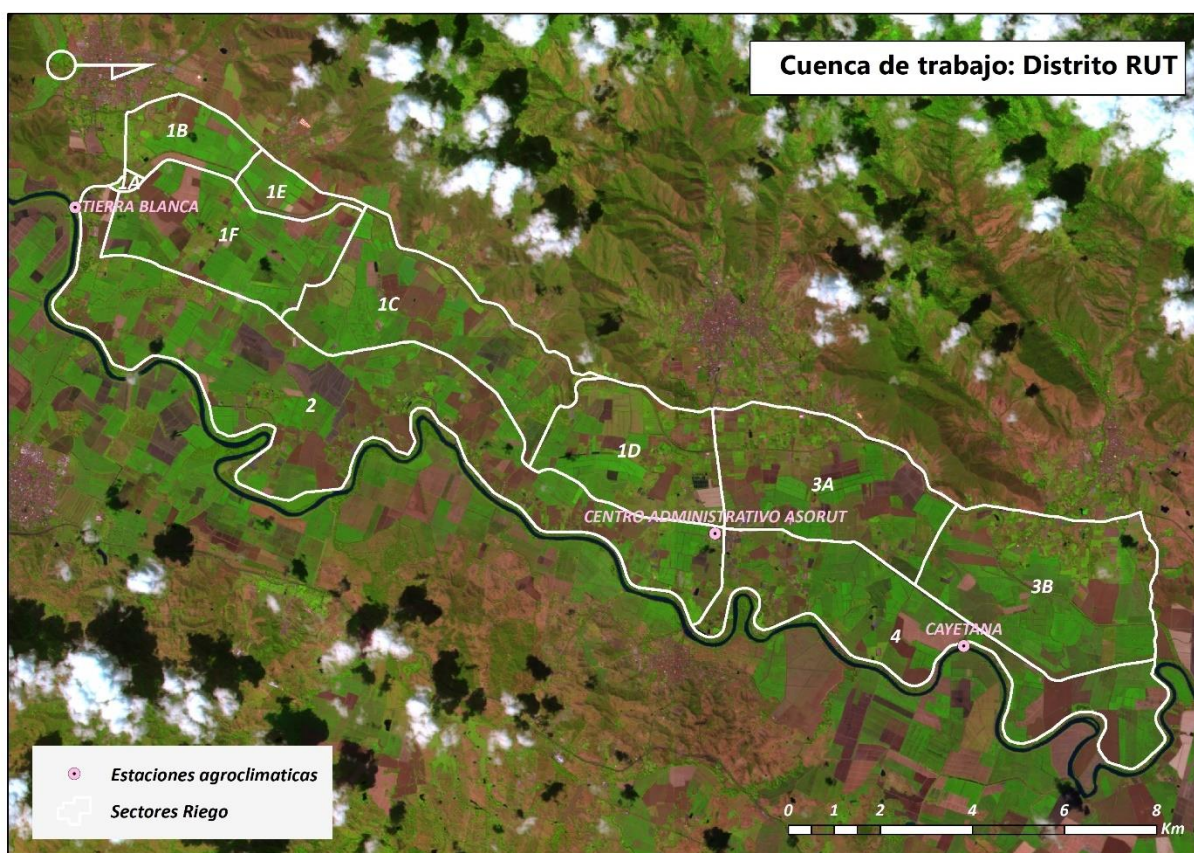


Figura 41. Estaciones agroclimáticas y escalas espaciales de manejo de los recursos hídricos en Distrito RUT para la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.

Intercambio de información de entrada al modelo

Las entradas al modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección se dividen en:

i. **Series temporales de imágenes de satélite de índice de vegetación NDVI:**

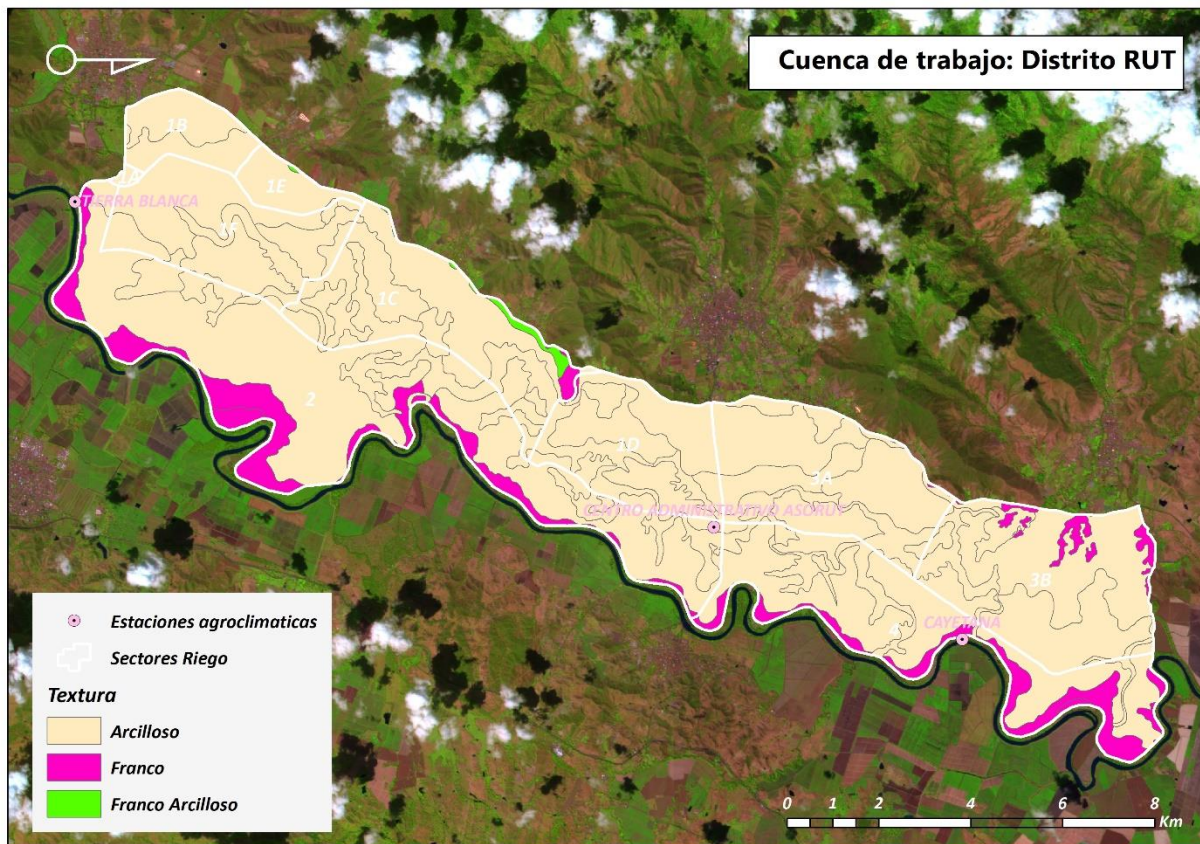
Para Distrito RUT fueron procesados dos gránulos (18NUL y 18NUK) del satélite Sentinel-2, S2 (gemelos S2A y S2B).

ii. **Datos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o)**

Para Distrito RUT se obtuvo por parte de los responsables de cuenca los datos diarios de P y ET_o, así como su localización (**Figura 41**). Se enumeran las estaciones agroclimáticas seleccionada: Tierra Blanca, Centro administrativo ASORUT y Cayetana.

iii. **Mapas de tipos de suelo**

Para Distrito RUT los responsables de cuenca entregaron el mapa de tipos de suelos con unidades texturales basada en información y estudios locales (**Figura 42**).



3. RESUMEN DE SUPERFICIES REGADAS Y NECESIDADES NETAS DE AGUA DE RIEGO ASISTIDAS POR TELEDETECCIÓN

Uno de los productos que genera el balance de agua en el suelo (RS-SWB por sus siglas en inglés de *Remote Sensing-based Soil Water Balance*) es la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA por sus siglas en inglés de *Remote Sensing-based Irrigation Water Accounting*). En este apartado y como resumen de los anteriores, mostramos la RS-IWA promedio por tipo o grupo de cultivo, así como la superficie regada asistida por teledetección. Si bien, es necesario informar a los potenciales lectores que los datos ofrecidos en las siguientes tablas no han sido contrastados por datos de campo o lecturas oficiales de los organismos responsables del agua de riego, cómo sí lo han sido los anteriores resultados de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección. Si bien, pensamos que los resultados mostrados pueden servir como información de apoyo a la toma de decisiones de los gestores encargados de las zonas regables.

Tabla 22. Superficies regadas y promedio (\bar{X}) y desviación estándar (σ) de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en el Valle del Río Elqui por campaña de riego y tipo de cultivo en regadío.

Campaña	Leñosos (cítricos)	Perennes	Leñosos caducos (viña)	Hortícolas ciclos cortos (lechuga, patata...)	Herbáceos (alfalfa)	anuales
Superficie regada (ha)						
2018/2019	3412		3476	6444	464	
2019/2020	4708		3856	5982	264	
2020/2021	3650		3486	5368	310	
Promedio (\bar{X}) y Desviación estándar (σ) de la contabilidad del agua de riego (m³/ha)						
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
2018/2019	7800	2200	7600	1900	7200	2500
2019/2020	7100	2200	7600	2100	6900	2600
2020/2021	7900	2200	7700	1900	7100	2600

Tabla 23. Superficies regadas y promedio (\bar{X}) y desviación estándar (σ) de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en el sub-distrito de riego de Villa Regina por campaña de riego y tipo de cultivo en regadío.

Campaña	Pera	Manzana	Carozo	Pastura
Superficie regada (ha)				
2020/2021	2008	1828	120	74
2021/2022	2008	1828	120	384
Promedio (\bar{X}) y Desviación estándar (σ) de la contabilidad del agua de riego (m ³ /ha)				
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
2020/2021	6900	700	6900	800
2021/2022	5600	700	5500	700

Tabla 24. Superficies regadas y promedio (\bar{X}) y desviación estándar (σ) de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en Colonia Fiscal Sarmiento por campaña de riego y tipo de cultivo en regadío.

Campaña	Alfalfa	Viñedo en producción	Viñedo viejo/abandonado
Superficie regada (ha)			
2020/2021	66	1018	686
Promedio (\bar{X}) y Desviación estándar (σ) de la contabilidad del agua de riego (m ³ /ha)			
	\bar{X}	σ	\bar{X}
2020/2021	9000	2700	7000
2021/2022	9000	2700	1300

tabla 25. Superficies regadas y promedio (\bar{X}) y desviación estándar (σ) de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección (RS-IWA) en Arroyo del Tala por campaña de riego y tipo de cultivo en regadío.

Campaña	Arroz	Soja	Maíz
Superficie regada (ha)			
2020/2021	974	96	240
2021/2022	1010	62	270
Promedio (\bar{X}) y Desviación estándar (σ) de la contabilidad del agua de riego (m ³ /ha)			
	\bar{X}	σ	\bar{X}
2020/2021	6300	500	1800
2021/2022	6600	500	2800



4. RESULTADOS DE LOS CULTIVOS DE LAS PARCELAS PILOTO POR PAÍS.

4.1 CULTIVOS DE ARGENTINA

Piloto tecnológico en cultivo de peras.

La superficie implantada de peras en Argentina se localiza en las provincias de Río Negro, Neuquén y Mendoza, siendo la región de la Norpatagonia (Río Negro y Neuquén) la que más importancia tiene en dicho cultivo. Para el año 2023, la provincia de Río Negro contaba con una superficie total de 15.521 ha (80%), la provincia de Neuquén con 2.000 Ha (10%) y según el último dato de la provincia de Mendoza, esta contaba con 2.064 Ha (10%). Se estima que en la actualidad dicha superficie es menor. De este modo, la Norpatagonia, y específicamente la provincia de Río Negro es la que mayor superficie posee de dicho cultivo, siendo la más importante productora de peras en Argentina. Según datos oficiales (SENASA 2023), en ambas provincias patagónicas la cantidad de pera para exportación, mercado interno y para industria fue de 653.840 Ton, el rendimiento promedio alcanzado fue de 37 ton/ha.

En Villa Regina, que se ubica en el departamento de General Roca de la provincia de Río Negro, la superficie cultivada con pera es aproximadamente de 1966 ha, incluye variedades como Williams (mayoritaria), Packham's Triumph, Beurre D'anjou, Abate Fetel entre otras, por lo que aproximadamente el 13% de las peras cultivadas en la Norpatagonia se encuentran en dicha localidad.

El clima de la zona es árido, es decir, que la evapotranspiración es mucho mayor que las precipitaciones, por lo que para producir cualquier cultivo es necesario regar y el aporte de agua por riego es fundamental para alcanzar niveles productivos adecuados. Según investigaciones de distintas instituciones, las necesidades de riego se encuentran alrededor de los 1000 mm anuales, existiendo un amplio rango de variación que depende de distintas características del agrosistema. Por ejemplo, la cercanía del nivel freático a la superficie puede ajustar notablemente dicho valor, Mañueco et al, (2018) midió en tres años un aporte de entre el 40 y el 60 % de la ETc del cultivo de pera.

Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de pera permitirá aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital con objeto de validar su uso en el cultivo de pera.

METODOLOGÍA Y MATERIALES

Parcela objeto de estudio

Los trabajos se desarrollaron en una parcela de peras de la variedad Williams en Villa Regina, departamento General Roca de la provincia de Río Negro, en la Patagonia argentina. Se destaca por ser un importante centro de producción frutícola en el Alto Valle del Río Negro, siendo la manzana y la pera sus principales cultivos (Figura 44). La región se caracteriza por sus suelos aluvionales y coluvionales, con bajos niveles de salinidad y sodicidad, y forma parte de una zona de desarrollo propuesta por el Plan Nacional Agua. El relieve es predominantemente llano, con pendientes inferiores al 0,5%, excepto en áreas cercanas a las bardas. El clima se distingue por una evapotranspiración de referencia anual (ET_o) de 1500 mm, un período libre de heladas de 200 días y precipitaciones anuales entre 250 y 300 mm.

La variedad de pera utilizada fue Williams, cultivada en una superficie de cinco hectáreas, el desarrollo del monitoreo del cultivo ocurrió entre las temporadas 2021-2022 y 2022-2023. La preparación del suelo, la siembra y establecimiento del cultivo fue similar a las prácticas habituales de los productores de pera de la localidad. El aporte del riego se realizó a través del método tradicional por inundación o gravedad, a través de canales de la red de distribución consorcial que conducen el agua hasta la chacra.

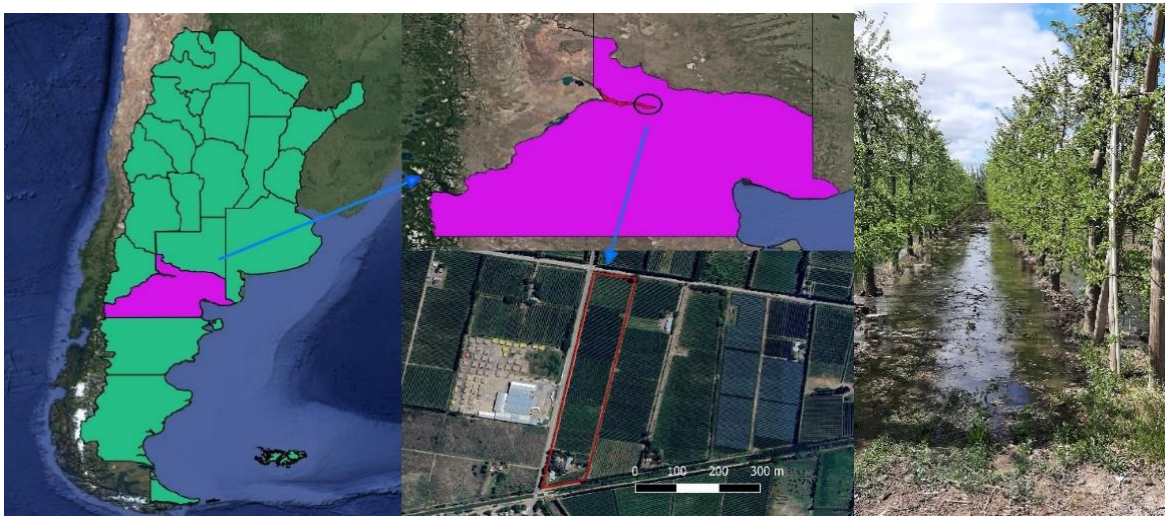


Figura 44. Localización y vista en planta de la parcela objeto de estudio en la provincia de Río Negro en el Consorcio de riego de Villa Regina, en el Norte de la Patagonia Argentina.

Metodología para estimar las necesidades de agua

Las necesidades de agua, y las necesidades de agua de riego, se determinan para la parcela objeto de estudio utilizando la metodología “coeficiente de cultivo, K_c - evapotranspiración de referencia, ET_o” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998). En esta metodología las demandas de agua coinciden con la evapotranspiración del cultivo ET_c y las demandas de agua de riego se estiman en un balance simplificado de las demandas de agua ET_c menos la Precipitación.

La determinación de la evapotranspiración del cultivo se realiza multiplicando el valor diario del coeficiente de cultivo K_c por el valor de la ET_o y sumando a lo largo del ciclo de desarrollo.

Coeficiente de cultivo (K_c) satelital de la parcela de pera

Para estimar el coeficiente de cultivo K_c , se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo y obtener, a través del valor del NDVI el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) como mejor estimador del coeficiente de cultivo K_c .

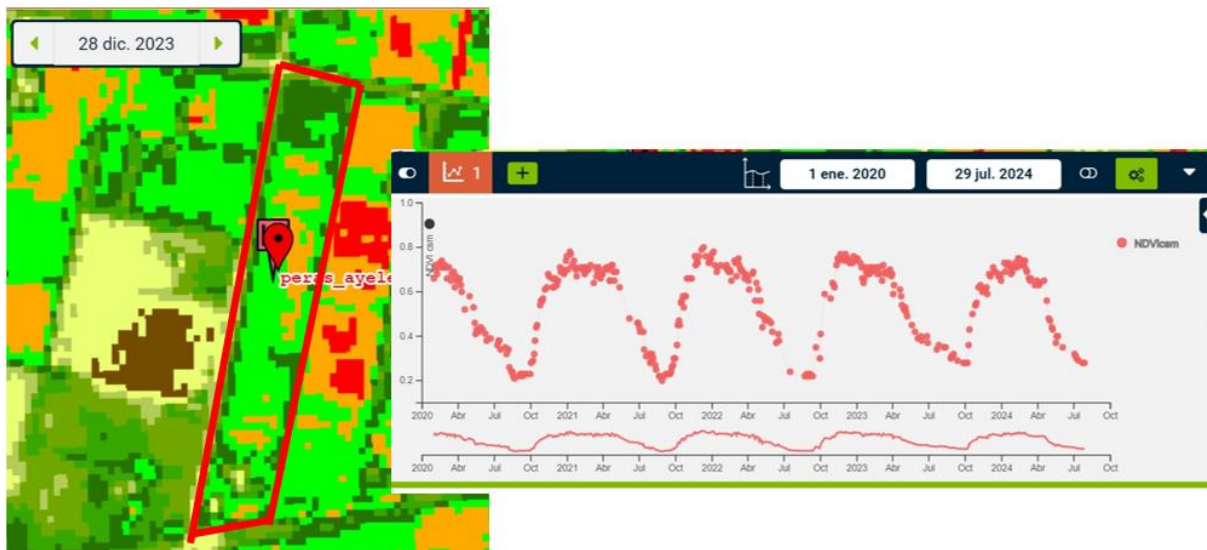


Figura 45. Variabilidad anual del NDVI en un pixel de la parcela de peras monitoreada, extraído del Portal web de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO.

En la Figura 45 se observa la variabilidad espacial y temporal del NDVI que se obtuvo de la plataforma. Tal y como se muestra en dicha figura, las curvas de NDVI siguen un claro patrón anual, que responde al ciclo del cultivo de pera. En invierno los valores son bajos, aproximadamente alrededor de 0,2, que corresponden a suelo desnudo. A partir de octubre los valores de NDVI comienzan a ascender describiendo el crecimiento del dosel vegetal del cultivo y de la vegetación en el suelo, hasta llegar a un máximo en los meses de verano de 0,7-0,8 aproximadamente, para luego, a partir de agosto descender por la pérdida de hojas y llegar nuevamente a valores bajos en la época de reposo o endodormancia de la pera.

Evapotranspiración de referencia y Precipitación

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir del parámetro evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en el consorcio de Villa Regina, a una latitud de 39° 7'56.25"S y Longitud de 67° 6'21.21"O. Los valores diarios registrados por dicha estación en los años considerados se pueden ver en la Figura 46.

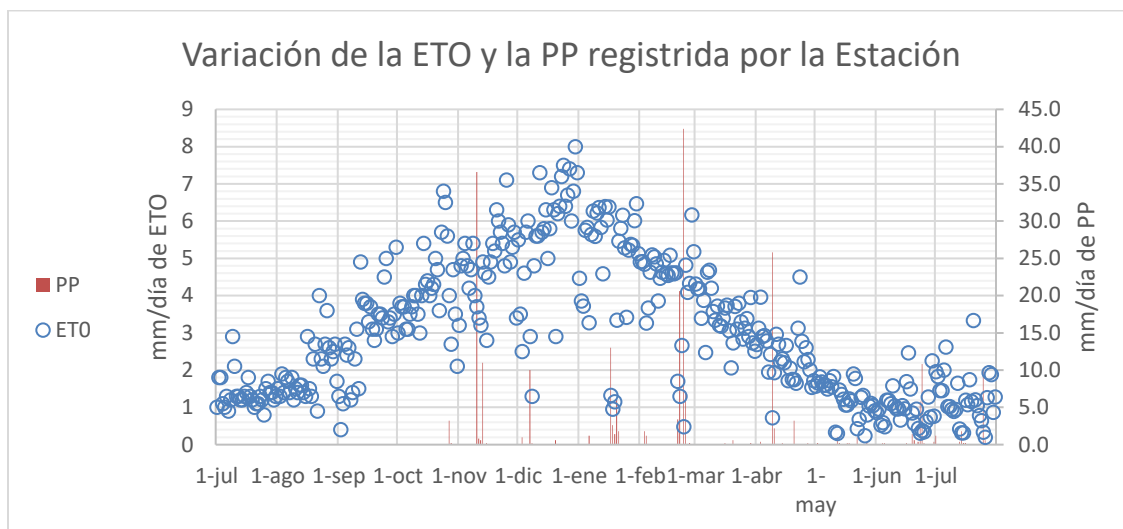


Figura 46. Evapotranspiración Potencial y Precipitación obtenida de la Estación Davis en el periodo bajo estudio.

Los valores medidos de ETo más elevados en cada año se encuentran alrededor de los 7-8 mm diarios en los meses de verano (diciembre, enero y febrero), y los valores más bajos se encuentran cerca de 1 mm en los meses de invierno (julio-agosto), en cuanto a los valores anuales medidos por la estación David, señalar un valor de ETo_anual de 1145 mm y una precipitación anual de 200 mm, considerando el ciclo del cultivo, la ETo fue de 992 mm y la precipitación de 146 mm.

Sondas de humedad y Aforos

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, los instantes de riego y los volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con sondas de humedad (enterradas a 20, 40, 60 y 80 cm) y un molinete hidrométrico respectivamente (Figura 47).



Figura 47. Instrumental de monitoreo de los partes de riego.

RESULTADOS

En la plataforma PLAS se realizó la extracción de los valores de NDVI, estos se calculan a partir de las imágenes Sentinel 2; de dicho set de datos se eliminaron los valores calculados con escenas de nubes. Con este conjunto de datos se calcula el coeficiente de cultivo (Figura 48), utilizando la metodología de Campos et al, 2010, y seguidamente la ETc satelital de la siguiente manera: $K_{c,sat} * ETo$.

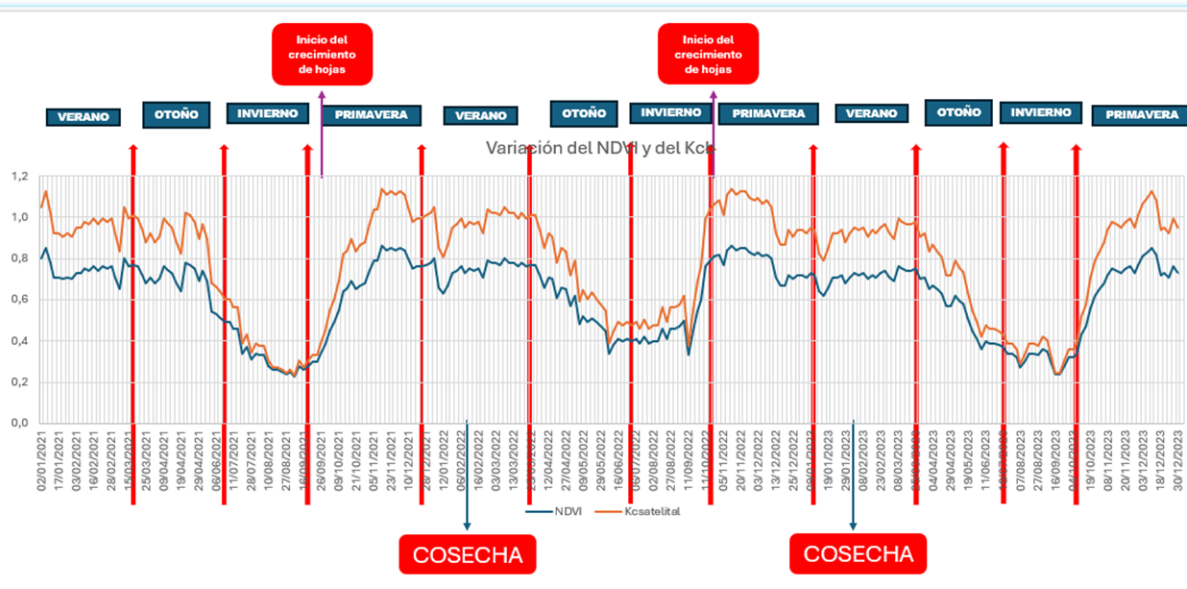


Figura 48. Evolución del NDVI y Kc satelital del 2021 al 2023.

La evolución de los valores del NDVI a lo largo de las campañas 2021-2022 y 2022-23 muestra un patrón temporal típico bien definido. El crecimiento del NDVI que se observa en primavera refleja la brotación y crecimiento del dosel vegetal tanto del cultivo como de las hierbas en el suelo, estabilizándose sobre un valor estándar de NDVI de 0,8 ($Kc = 1$), que corresponde bien con una cubierta completa, probablemente como consecuencia del manejo. Este valor del NDVI se mantiene estable después de la cosecha, la cual se produce en enero. Finalmente, con la llegada del otoño, a partir de abril, el valor del NDVI disminuye rápidamente reflejando el amarillamiento y pérdida de hojas. Las caídas de los valores de NDVI en algunos momentos de la primavera y del verano se deben a las labores culturales del productor relacionadas al manejo de la vegetación de los interfilares en el suelo.

La Figura 49 muestra la curva de Kc satelital y la curva obtenida de tabla de FAO 56 (Allen et al, 2006) de los frutales, esta última se adaptó a valores mensuales ya que son los utilizados por los agricultores de la región. La diferencia entre ambas muestra como la curva de Kc satelital ajusta al desarrollo concreto de la parcela de estudio, aunque ambas presentan una gran semejanza una vez en la parte central.

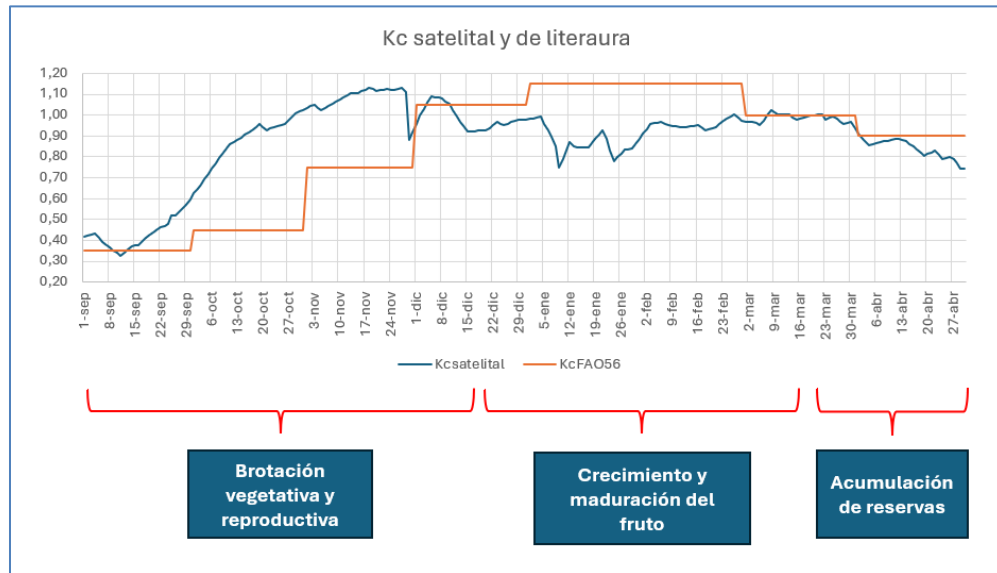


Figura 49. Comparación de la variación de Kc satelital y el de literatura (Allen, 2006).

La Figura 50 muestra los valores diarios de Evapotranspiración de la cubierta, esto es $ET_c = K_c ETo$, utilizando ambos Kc (satelital y tabla). Dicha figura muestra la correspondencia entre la ET_c satelital y la ET_c Tabla, Los valores acumulados a lo largo del ciclo de cultivo se sitúan entre 900 para la ET_c satelital y 1000 mm para la ET_c Tabla.

Dichos valores de ET_c corresponden con las demandas de agua del cultivo e indican un buen acuerdo entre sí. La información satelital permite ajustar la curva al desarrollo de la cubierta vegetal de la parcela objeto de estudio, tanto en la fase de desarrollo como en la fase de mediados de temporada que va de la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo del amarillamiento o senescencia de las hojas y su posterior caída de las hojas.

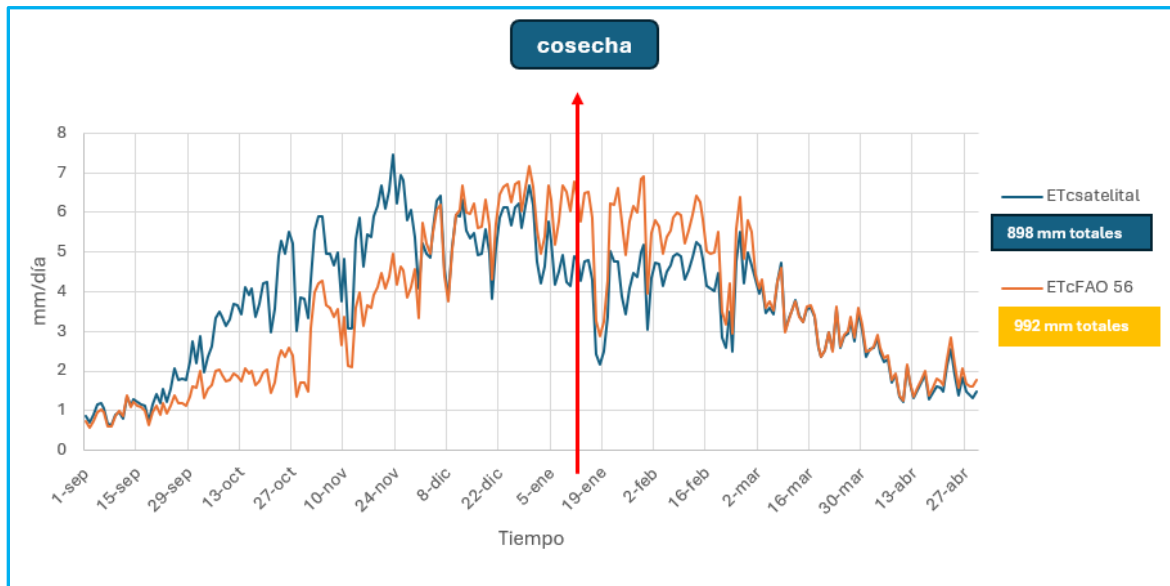


Figura 50. Evapotranspiración de cultivo calculada con los Kc de la literatura (EtcFAO56) y con PLAS (ETcsatelite).

MONITOREO DE LA HUMEDAD

La Figura 51 muestra la variación del promedio de humedad del perfil, es importante resaltar que, a excepción del inicio, a partir del mes de octubre hasta fines de abril el suelo mantiene una humedad elevada, que se registra por encima del 50 % del agua fácilmente aprovechable. Al inicio de la temporada la humedad inicial es muy baja, cercana al PMP, con el primer riego se recupera y se mantiene muy elevada en toda la temporada, cada pico del gráfico indica el riego realizado, los picos menos pronunciados son lluvias que humedecen aún más el perfil, pero no se contemplan en el manejo del riego, salvo que sean eventos muy extremos que hayan causado en la región inundaciones, pero en dicho monitoreo no sucedieron.

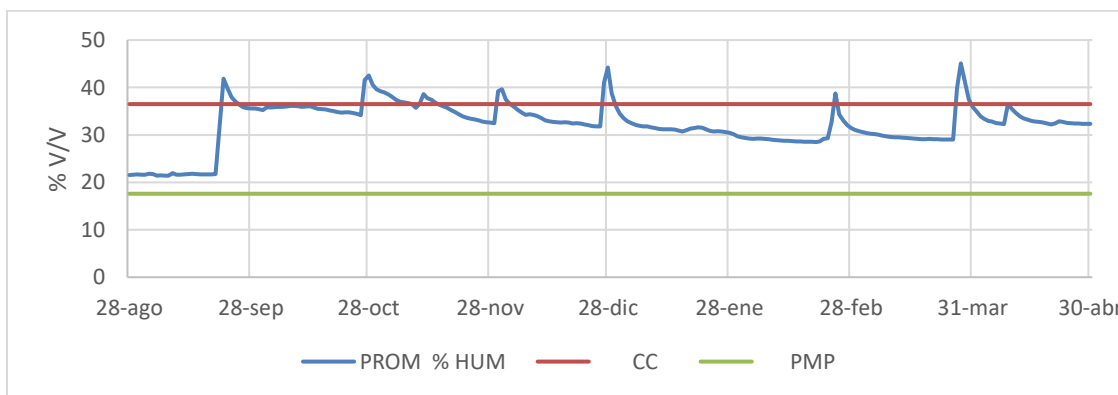


Figura 51. Variación promedio de la humedad en el perfil del suelo. Fuente: Elaboración propia, 2024.

A continuación, en la Figura 52 se observa la variación de humedad del suelo a distintas profundidades, a diferencia de la Figura 51, se observan las variaciones en las cuatro profundidades monitoreadas por los sensores instalados.

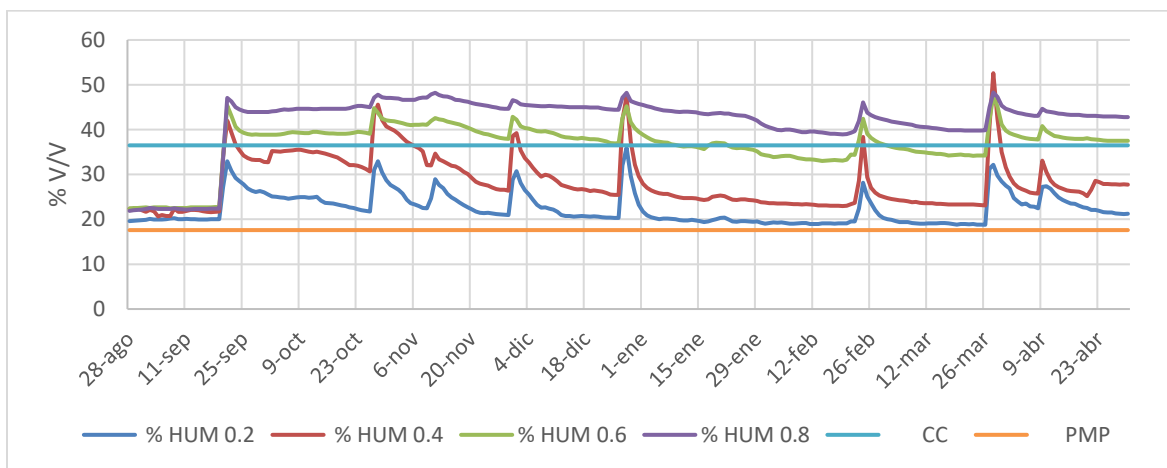


Figura 52. Variación de la humedad a distintas profundidades en el suelo. Fuente: Elaboración propia, 2024.

La línea gris muestra la humedad a 60 cm de profundidad y la línea amarilla a 80 cm de profundidad, estas profundidades son muy cercanas a la napa freática como se explicó anteriormente, donde la condición del agrosistema está regida por un acuífero freático poco profundo, lo que se produce una vez que se ha dado el primer riego.

La humedad constante por encima de Capacidad de Campo en las dos sondas más profundas corrobora dicha afirmación, denotando que en profundidades superiores como a 40 cm (línea naranja) y a 20 cm (línea azul) en los mismos momentos la humedad es menor, esto quiere decir que el aporte hídrico puede provenir por ascenso capilar desde la napa. Se puede afirmar, que el cultivo no se encuentra bajo estrés hídrico por falta de agua.

MANEJO DEL RIEGO

El aporte del riego se realizó en 6 momentos a lo largo de la temporada, con una lámina aplicada de 150 mm y 120 minutos de duración aproximada, la lámina total aplicada fue de 930 mm. La elección del momento dependió del turnado asignado al productor por parte del consorcio de riego, no por la demanda del cultivo. Los valores obtenidos de lámina aplicada, la ETc estimada por FAO y por satélite fueron muy similares.

El riego inicial permite que la brotación del cultivo se produzca en condiciones favorables por las adecuadas condiciones de humedad de un suelo que se encuentra relativamente seco, como señalan los sensores mostrados en la Figura 52. La cantidad de agua entregada corresponde muy aproximadamente con la cantidad extraída por la cubierta vegetal. Todo ello indicaría un buen



ajuste entre la aportación de agua de riego y las demandas de agua del cultivo.

En este sentido, el uso de información satelital para estimar la ETc y ajustar el riego se presenta como una herramienta valiosa, especialmente en situaciones donde las mediciones in situ son difíciles o costosas de realizar. La precisión de los datos satelitales puede variar dependiendo de la calidad de la imagen y de las condiciones climáticas, pero su facilidad de acceso y su capacidad para cubrir grandes áreas los convierten en una herramienta complementaria útil para la toma de decisiones en el riego agrícola.

RENDIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

El rendimiento del cuadro de pera monitoreado fue de 38 tn/ha, dicho valor se encuentra por encima del valor medio regional en la variedad analizada. Los riegos no fueron aplicados en función a la demanda del cultivo, si no en función al turnado de riego, esto influye directamente en los cálculos de la eficiencia de riego y productividad agronómica del agua, a continuación, en la Tabla 26. Productividad del agua en base a lo obtenido por teledetección y lo aplicado por el agricultor. se calculó la productividad del agua en función a las condiciones reales (lámina aplicada) y lo calculado según la metodología asistida por teledetección (ETc satelital).

Tabla 26. Productividad del agua en base a lo obtenido por teledetección y lo aplicado por el agricultor.

	Rendimiento (kg/ha)	Riego (m3)	Productividad del agua (kg / m3 agua)
ETc satelital	38000	8980	4,23
Lámina Aplicada	38000	9300	4,09

Los resultados reflejan la diferencia en la productividad del agua que se obtiene utilizando información satelital, esta podría ser mejorada en campo incorporando el manejo del riego asistido por teledetección, utilizando más de 100 litros menos de agua para producir un kilo de peras.

CONCLUSIONES

El monitoreo satelital del cultivo de pera Williams en Villa Regina, utilizando la plataforma PLAS FONTAGRO, es una herramienta valiosa para estimar las necesidades hídricas del cultivo y optimizar el riego.

La metodología FAO 56, asistida por información satelital, permitió calcular con precisión la evapotranspiración del cultivo (ETc) a lo largo de la temporada. Los resultados obtenidos con el Kc satelital mostraron una alta correspondencia con los valores de ETc calculados con los coeficientes de cultivo de tabla, utilizados actualmente por los productores, validando la eficacia del enfoque satelital.

El análisis de la variación temporal del NDVI y el Kc proporcionó información relevante sobre el desarrollo del cultivo y su respuesta al riego, y como estos parámetros responden a dichos comportamientos.

El rendimiento obtenido en el cuadro de pera evaluado (38 tn/ha) superó el promedio regional, lo que sugiere que, a pesar de las limitaciones en el manejo del riego, el cultivo logró un buen desempeño productivo.

La ETc satelital muestra un buen acuerdo con el agua de riego entregada. Aunque la ETc y el aporte de agua de riego van desfasados, el almacenamiento de agua en suelo y el propio sistema radicular de los árboles permite una gestión eficiente del agua aportada.

En conclusión, el uso de información satelital y la metodología FAO 56 ofrecen una oportunidad para mejorar la gestión del riego en el cultivo de pera en Villa Regina. La implementación de estrategias de riego basadas en las necesidades reales del cultivo, estimadas a partir de datos satelitales, podría optimizar el uso del agua, ahorrando un volumen muy importante del recurso, siendo fundamental aumentar la eficiencia del riego y, potencialmente, mejorar aún más la productividad.



Figura 53. Peras Williams del cuadro monitoreado luego de la Cosecha. Fotografía tomada por Mariela Martinotti.



Piloto tecnológico en cultivo de maíz.

Dentro de la cuenca del Río Negro, Argentina, la superficie cultivada con maíz es aproximadamente 25.000 ha, con una producción de 275.000 Ton, lo cual, si bien representa una participación menos del 1% a nivel nacional, es una región donde la superficie cultivada va en continuo aumento y es una opción estratégica como insumo para la producción de carne en la Patagonia argentina. El rendimiento promedio se sitúa en los 11.000 kg/ha. Al igual que todos los cultivos en esta región, la producción de maíz requiere el aporte de riego para alcanzar producción (la producción es nula sin riego). Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de maíz permitirá aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital con objeto de validar su uso en el cultivo de maíz.

Materiales

En los valles del norte de la Patagonia argentina el método de riego predominante es el gravitacional. Hay más de 150.000 ha regadas, asociadas a distritos colectivos de riego (FAO, 2015). A partir del desarrollo del riego en proximidades de los ríos de la región, aumentó la superficie de equipos de pivote central. La superficie regada por pivote en la cuenca del río Negro en el año 2014 era superior a las 5000 ha (Zelmer et al. 2015), mientras que desde este grupo de investigación se estimó para el año 2024 una superficie superior a las 9000 ha con la identificación de 140 círculos de riego. Durante las campañas 2020/21 y 2021/22 se realizó un seguimiento del riego, de acuerdo al manejo del productor, en un cultivo de maíz sobre la margen norte del río Negro en el Partido de Patagones, provincia de Buenos Aires (Figura 54). En la campaña 2023/24 se sumaron equipos dentro del Departamento de General Conesa en la provincia de Río Negro. La parcela piloto se encuentra sobre suelos de origen aluvional y coluvional. Los pivotes se ubican sobre suelos poco desarrollados con contenido de materia orgánica entre 1 y 1,5%, sin mayores problemas de salinidad ni sodicidad. La ETo anual es del orden de los 1300 mm, con un período libre de heladas de entre 170 y 199 días y precipitación anual entre los 200 y 380 mm. Por las características mencionadas de precipitación y ETo el riego es integral (prácticamente no se considera el aporte del agua de lluvia). Como consecuencia, la lámina anual a aplicar con riego es alta lo que se corresponde con una alta demanda de energía, lo que lleva a una incidencia muy importante del agua de riego en los costos de producción.

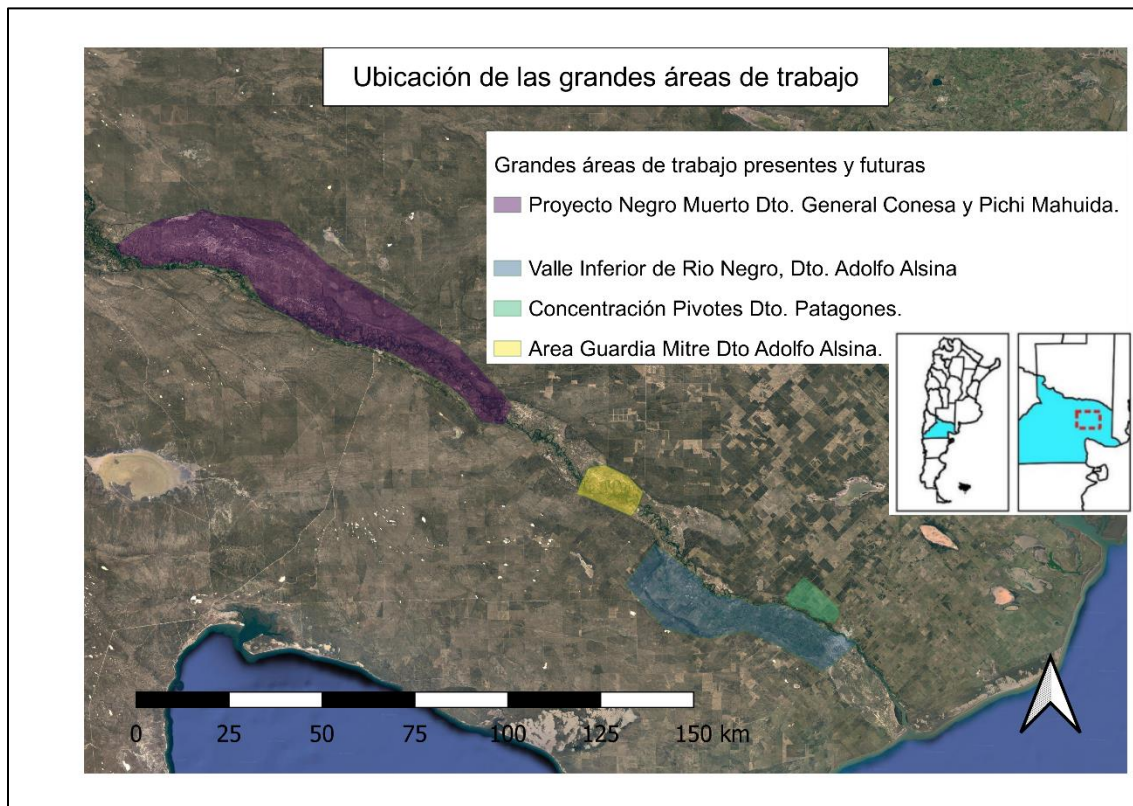


Figura 54. Ubicación de los valles de Negro Muerto, Guardia Mitre y zona de riego del partido de Patagones.

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo fueron determinados utilizando la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998).

Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO (agrisatwebgis.com), mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo, establecer el coeficiente de cultivo (Kcb) como se muestra en la **Figura 55**.



Figura 55. Portal web de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO (agrisatwebgis.com).

El agrupamiento de los valores del índice NDVI en rangos, permitió identificar y diferenciar niveles de desarrollo del cultivo, tal como se señala en la **Figura 56** **Figura 89**.



Figura 56. Imágenes del índice de vegetación en distintos equipos de pivote central y su distribución espacial donde se diferencian valores de NDVI de maíz, papa, soja y barbecho de trigo.

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se calculó con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada dentro del establecimiento. Los valores diarios acumulados durante un año son mostrados en la **Figura 57**, mientras que en la **Figura 58** se muestra parte del equipamiento usado.

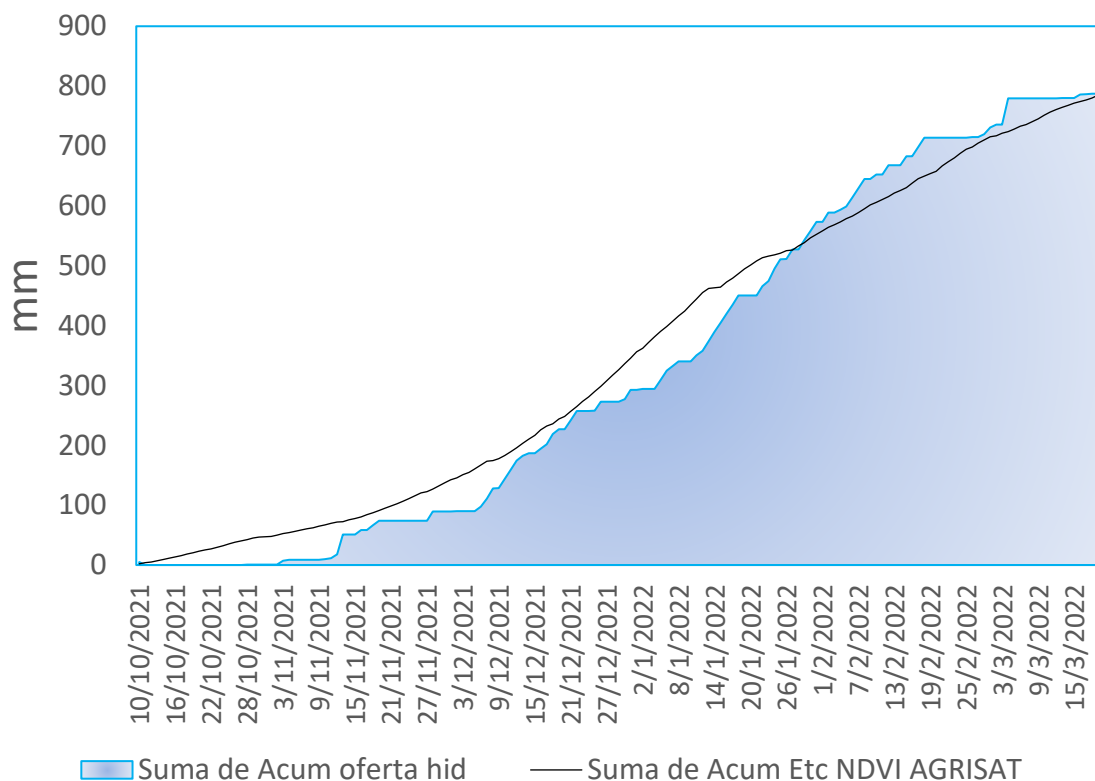


Figura 57. Oferta hídrica acumulada frente a necesidades hídricas en la campaña 2020/21.



Figura 58. Instrumental de monitoreo de los componentes de riego. Mediciones de caudal del equipo, registro de los datos, y sensores de medición del contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades.

Resultados

Durante la campaña 2023/24 se estuvo trabajando sobre cultivo de semilla de maíz (Figura 59). Es de destacar que en la curva de kc del maíz se observa una caída de valores en el momento en que se produce el corte de la flor masculina debido al manejo programado de acuerdo al proceso

y protocolos para la obtención de semillas híbridas. En este caso se trabajó realizando seguimiento y generando una planilla semanal de asesoramiento de riego para el productor (Tabla 27)

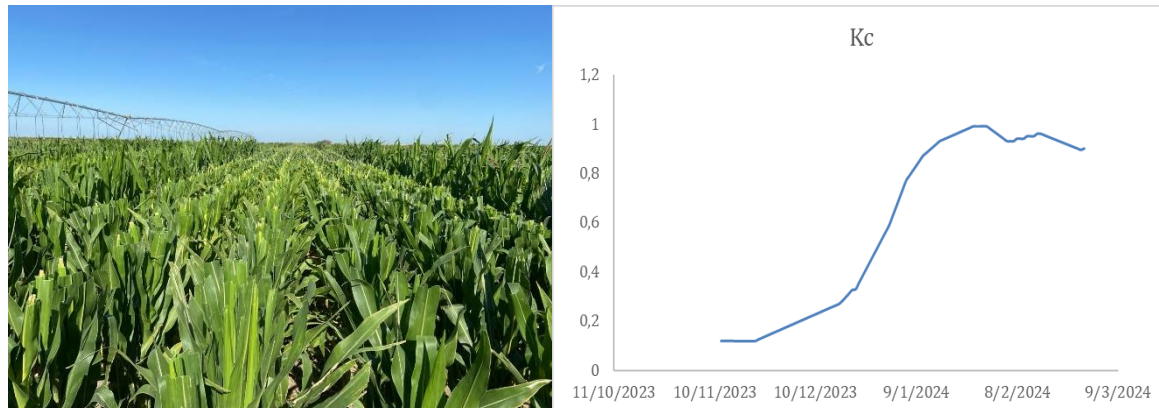


Figura 59. Vista del cultivo de maíz para semilla y evolución de la curva estimada de Kc para el desarrollo del cultivo, obtenido con datos de la plataforma PlasFontagro.

Tabla 27. Modelo de tabla presentada para el asesoramiento del riego a aplicar durante la semana del 1 al 7 de enero de 2024.

Fecha	Kc	ETo (mm)	ETc (mm)
1/1/2024	0.71	7.1	5.06
2/1/2024	0.74	5.4	3.97
3/1/2024	0.77	6.3	4.88
4/1/2024	0.80	5.6	4.46
5/1/2024	0.83	6.5	5.43
6/1/2024	0.86	8.0	6.84
7/1/2024	0.90	6.6	5.98
Total ETc			36.62
Lámina bruta considerando 0.85 de EA			43.08

El monitoreo con información satelital permitió caracterizar la duración de los periodos de desarrollo del cultivo: establecimiento (Kcb inicial), desarrollo (crecimiento vegetativo), sin desarrollo vegetativo (Kc medio) y senescencia (Kc fin). No solo se identificaron los estados de desarrollo del cultivo, sino que se estableció su magnitud (máximos) y duración de las etapas, lo que mejoró la definición precisa de los volúmenes de riego y la oportunidad de aporte.

Manejo del riego

En cuanto a la dinámica del agua en el suelo se puede observar en una primera instancia que hubo una disminución de la humedad volumétrica a distintas profundidades (**Figura 60**), hasta que ésta se incrementó por un riego hasta capacidad de campo aplicado el 11/1. Posteriormente hubo una nueva disminución del contenido de agua del suelo, apareciendo extracciones de agua en capas más profundas) También se observa que en los últimos días medidos hubo un aumento de la humedad con picos principalmente en sensores ubicados cerca de la superficie. En la **Tabla 28** se muestra la contabilidad de agua aplicada y ETc durante esos meses

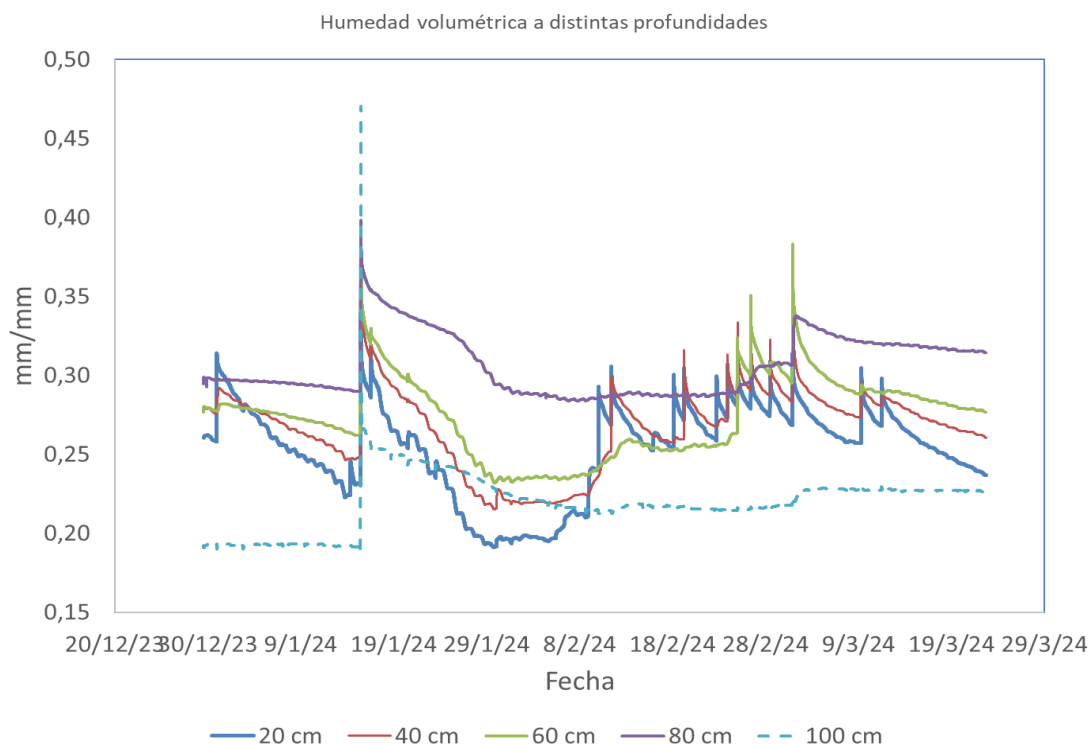


Figura 60. Dinámica del agua en el suelo, contenido volumétrico de agua (HV, mm/mm) en el cultivo de maíz a distintas profundidades.

Tabla 28. Agua aplicada y ETc durante los meses de noviembre a febrero.

mes	Agua aplicada (mm)	ETc (mm)
noviembre	45	25
diciembre	72	41
enero	135	190
febrero	192	161
marzo	72	82
total	516	499
Considerando un 85% de EA	439	

No se presentan datos de rendimiento debido a que hubo incompatibilidad entre las líneas parentales del lote en estudio, afectando la polinización y por lo tanto con rendimiento muy bajo.

Durante la campaña 2023/24, también se instalaron sensores en equipos de pivote central en el departamento de General Conesa en la provincia de Río Negro (**Figura 61**).



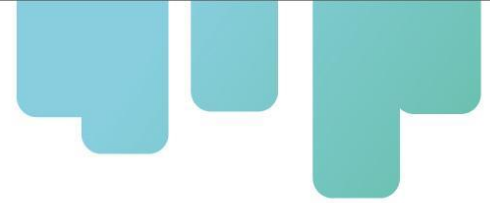
Figura 61. Instalación de sensores FDR (contenido de agua del suelo) en los cultivos en General Conesa, Río Negro.

En la **Tabla 29** se presentan los riegos aplicados, donde se destaca que se acumularon 78 vueltas completas del equipo, con velocidades de avance del 40 al 90% lo que llevó a que se aplicaran durante toda la campaña 860 mm.



Tabla 29. Fecha de inicio y fin de cada evento de riego, velocidad del equipo, vueltas totales recorridas en cada riego y lámina aplicada en el pivot.

Inicio de riego	Fin de riego	Avance %	Vueltas	mm
27/10/2023	29/10/2023	80	4	30
13/11/2023	14/11/2023	80	3	23
14/11/2023	17/11/2023	60	5	50
26/11/2023	28/11/2023	60	1	30
28/11/2023	29/11/2023	40	1	15
07/12/2023	08/12/2023	80	2	15
08/12/2023	09/12/2023	60	1	10
09/12/2023	10/12/2023	80	2	15
28/12/2023	29/12/2023	90	1	7
29/12/2023	30/12/2023	60	1	10
30/12/2024	30/12/2023	80	1	8
09/01/2024	10/01/2024	80	2	15
10/01/2024	20/01/2024	60	10	102
20/01/2024	27/01/2024	60	5	51
27/01/2024	05/02/2024	50	7	85
05/02/2024	15/02/2024	50	5	67
15/02/2024	25/02/2024	50	8	99
25/02/2024	05/03/2024	50	8	99
05/03/2024	15/03/2024	50	8	99



15/03/2024	17/03/2024	50	3	30
TOTAL			78	860

Si consideramos a partir del cuadro anterior la cantidad de agua aplicada mensualmente y la relacionamos con la ETc del cultivo, se puede observar que la aplicación fue un 137% de las necesidades con un mayor porcentaje aplicado en los primeros dos meses que sirvió para aportar agua al perfil del suelo (**Tabla 30***Error! No se encuentra el origen de la referencia.*).

Tabla 30. *Relación entre lamina aplicada y ETc-PLAS para los distintos meses de desarrollo del cultivo.*

Mes	Lámina aplicada	ETc (mm)-PLAS	Relación entre satélite y aplicado
octubre	30	5	635%
noviembre	118	37	323%
diciembre	65	74	87%
enero	211	210	101%
febrero	258	178	145%
marzo	179	126	142%
Total	860	629	137%

En este caso se destaca en la **Figura 62** una aplicación de agua suficiente e incluso superior a las necesidades de manera que hubo una acumulación en la ubicación de los sensores a mayor profundidad.

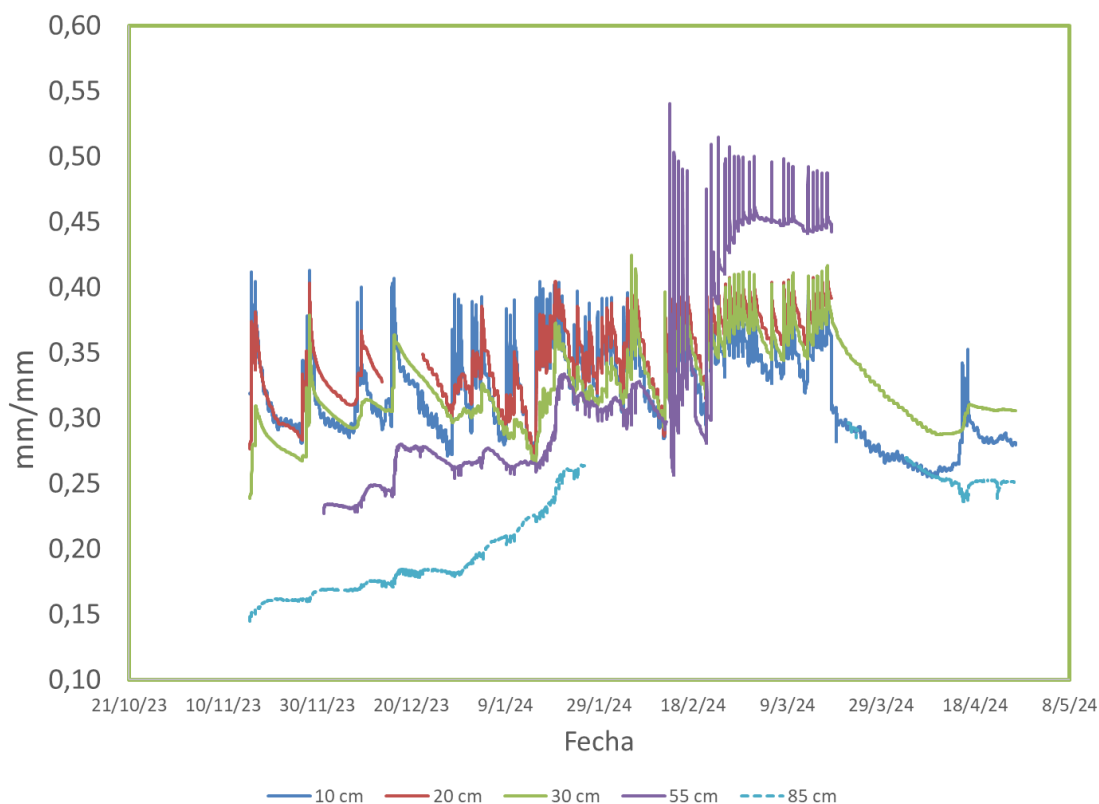


Figura 62. *Dinámica del contenido de agua en el suelo (Hv) a distintas profundidades en cultivo de maíz en lote General Conesa.*

Comparando los datos de NDVI del equipo con los resultados de la distribución espacial de la pluviometría realizado durante evaluaciones de riego, se observa que en las torres o sector donde el agua aplicada fue menor (por causas a mejorar del equipo de riego) se corresponden con valores de NDVI también menores (**Figura 63**).

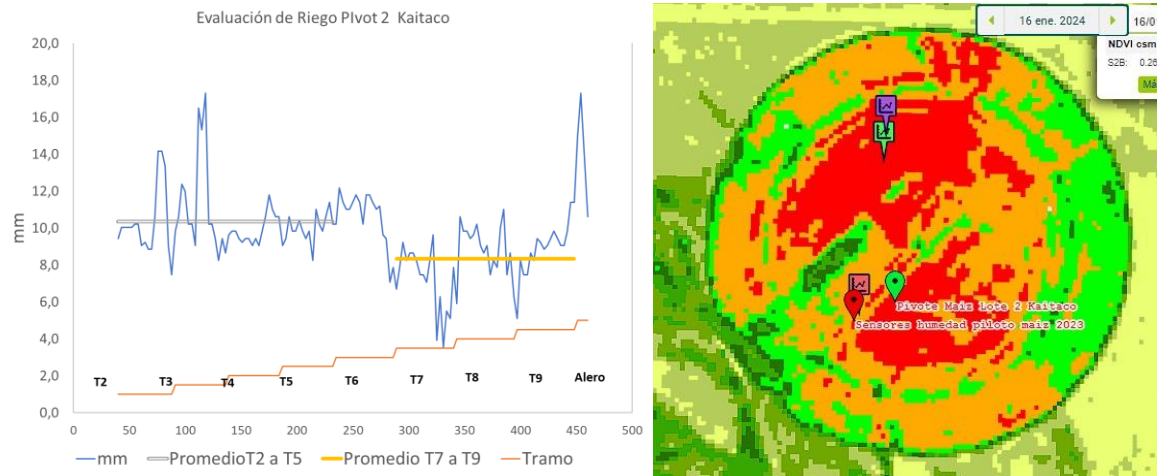


Figura 63. Comportamiento de las láminas aplicadas por el equipo de riego y distribución del índice de NDVI en momento estadio de desarrollo previo al estado fenológico VT.

Rendimiento:

Se tomaron 17 muestras de rendimiento dentro del círculo de riego. Las mismas se representan en los puntos marcados en la **Figura 64**.

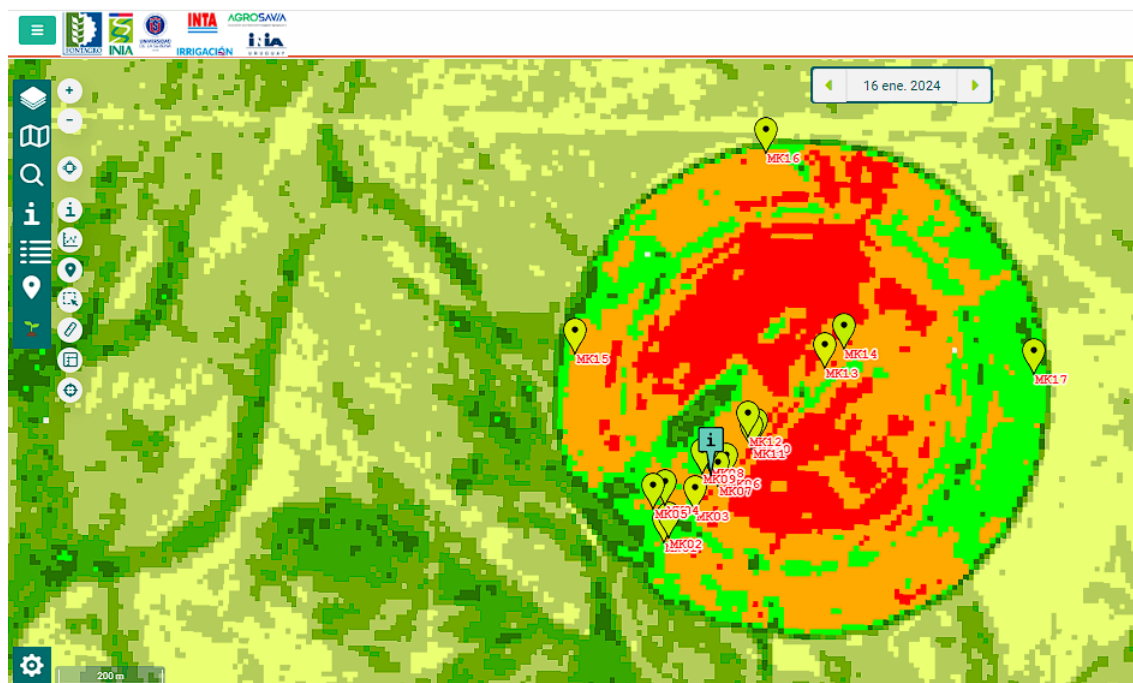


Figura 64. Ubicación de las distintas muestras de rendimiento tomadas dentro del pivote central en el cultivo de maíz.

Las muestras de mazorcas recolectadas corresponden a parcelas de 2 hileras de siembra por 2 metros de largo, lo que corresponde a una superficie de 2,8 m² cada una. Se contó el número de plantas y número de espigas, se obtuvieron los granos, se determinó humedad de grano y se calculó el rendimiento para una humedad de grano del 14%.

En los muestreos se determinó un promedio de 9,7 plantas por m². Los rendimientos medidos en promedio fueron en promedio de 15.400 kg/ha. En la **Figura 65** se observa la relación de rendimientos frente a valores de NDVI observados el día 16/01/2024.

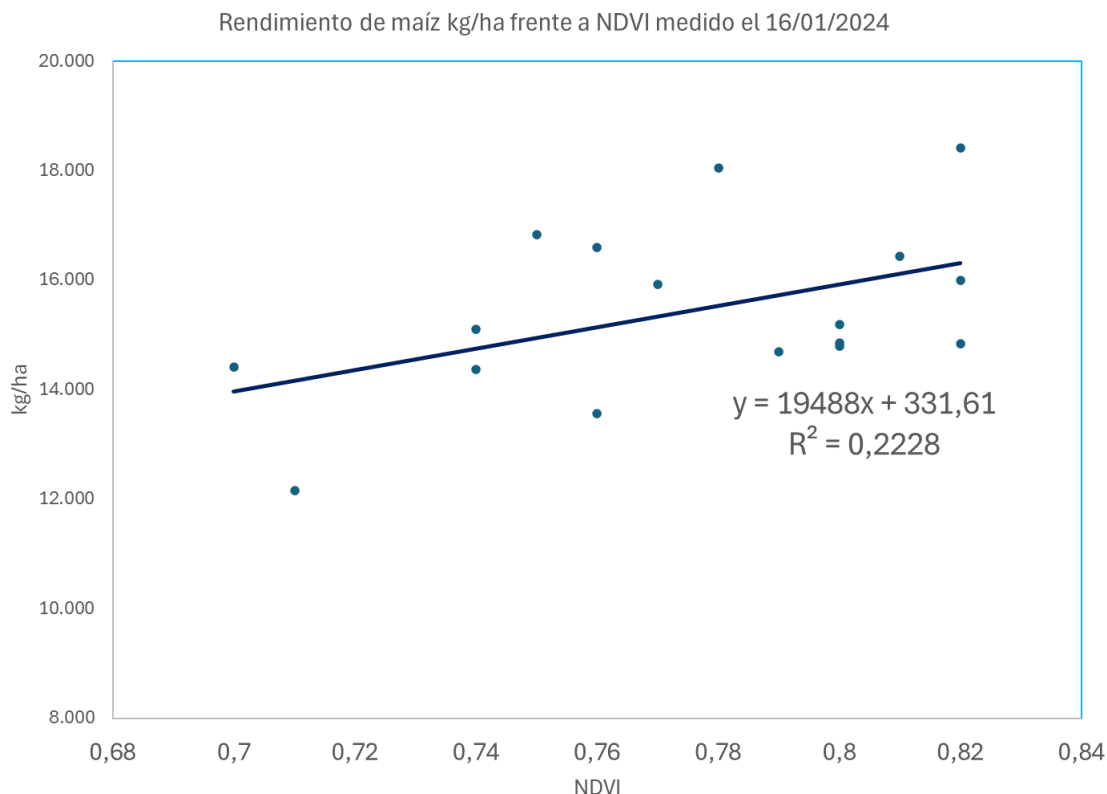


Figura 65. Relación del rendimiento final de grano y el valor de NDVI del 16 de enero de 2024.

En la

Tabla 31 se presenta un resumen de los rendimientos y la productividad del agua alcanzados dentro del pivot trabajado de acuerdo al proyecto (PLAS), se compara con las medias conocidas de acuerdo a encuestas y expertise de referentes (control) y con un lote dentro del mismo pivote central en esa campaña donde se realizó un ensayo de fertilización y se consideró sin limitantes por macro y micronutrientes (P1), No se hacen comparaciones, como en algunas otras regiones, con un maíz de secano porque en esta región el rendimiento es nulo.



Tabla 31. *Parámetros productivos evaluados en cosecha.*

Parámetro	Proyecto-PLAS	control	P1
Rendimiento (kg/ha)	15.400	12.000	20.000
Lámina de agua aplicada (mm)	860	750	860
Productividad del agua (kg/m ³)	1.8	1.6	2.3

Conclusiones

Se está trabajando en difusión y capacitaciones sobre la plataforma.

La plataforma tiene una respuesta muy positiva de técnicos, productores y encargados de las explotaciones.

Se facilita trabajo de campo frente a distintas fechas de siembra y distintos cultivos o manejos de cultivos.

Hay una disponibilidad de información dentro del ciclo del cultivo que aporta a la toma de decisiones y al control del manejo.

Estas actividades también promueven el uso de otras plataformas con el mismo fin y el uso del balance hídrico para la programación de riego por parte de los productores.

Los resultados mostraron en los dos primeros años un aporte a la explicación de la dinámica del agua y aporte a los balances hídricos teóricos. En ambos años hubo problema en momentos específicos con déficits hídricos por problemas estructurales que afectaron los rendimientos potenciales de los cultivos.

En la campaña 2023/2024 se trabajó con cultivos para semilla híbrida, lo que fue un desafío por considerar valores de Kc no conocidos. No se evaluó rendimiento comercial por un inconveniente de compatibilidad entre las líneas parentales, pero los encargados de la producción consideran de interés continuar con estos seguimientos para estos cultivos donde el producto es diferenciado.

En el cultivo de maíz para grano en esta campaña, se realizó un seguimiento con sensores de humedad que indicaron la situación del manejo del riego, mostrando un riego ajustado a las necesidades en las primeras etapas y láminas mayores a partir de floración donde se observan incrementos notables de humedad volumétrica a los 55 y 85 cm de profundidad y una mayor



actividad a los 30 cm. Los rendimientos del orden de los 15000 kg/ha se consideran adecuados para lograr un margen bruto positivo en las explotaciones de la zona.

Respecto a las condiciones climáticas, la de altas temperaturas en la época de floración podrían haber afectado significativamente los niveles de producción obtenidos dependiendo del ciclo evaluado.

La estimación de la ET_c a través de la utilización de imágenes satelitales desde la plataforma AgrisatWEBgis fue más precisa respecto de la estimación a través de la metodología tradicional por valores tabulados de K_c , demostrando la utilidad de la primera para el cálculo de las necesidades netas de riego en condiciones sitio específicas.

En forma complementaria, y considerando que el agua de riego utilizada si presenta un contenido relativamente bajo de sales ($0,2 \text{ dS m}^{-1}$) debe contemplarse el seguimiento de los niveles de sales y relación de adsorción de sodio (RAS) en el perfil de suelo para evaluar la necesidad de efectuar manejos de riego adecuados, en caso de que estos alcancen un nivel crítico que pueda comprometer la producción. Previo a estos ensayos, en estos establecimientos se hicieron seguimientos y no se observaron problemas (Quichán et al., 2016)

Como principal conclusión a partir de los resultados obtenidos, podríamos considerar que el manejo del riego, apoyado en la metodología de cálculo de K_c y K_{cb} , evaluada en esta parcela, proporciona una estimación confiable de las necesidades netas de riego por parte del cultivo.



Piloto tecnológico en cultivo de vid.

En el departamento de Junín, Mendoza, Argentina, la superficie cultivada con vides es aproximadamente 11.000 ha, con una producción de 72.309 Ton, lo cual representa una participación del 5% a nivel nacional. El rendimiento promedio se sitúa en los 6.500 kg/ha. Al igual que todos los cultivos en la región árida de Mendoza, la producción de vides requiere el aporte de riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de vides permitirá aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital a través de la plataforma PLAS con objeto de validar su uso en el cultivo de vides.

Materiales

Los trabajos se desarrollaron en una propiedad de vid cv. Moscatel de más de 30 años de edad, ubicado en el departamento de Junín, Mendoza, Argentina. Las condiciones de suelo y clima son representativas en las que se desarrolla la producción de vides en esta parte de la región (**Figura 66**). El suelo predominante en la zona es Entisol Torrifluvent típico con texturas medias a gruesas, profundos sin presencia de napas freáticas cercanas. El clima de la zona de estudio es desértico, con precipitaciones anuales medias del orden de los 240 mm, concentradas principalmente en la época estival (régimen monzónico).

La variedad de vid utilizada fue moscatel, cultivada en una superficie de 2,4 ha. El estudio se realizó en las temporadas 2021-22, 2022-23 y 2023-24. El aporte del riego fue por surcos superficiales. El desempeño del riego (eficiencias de aplicación, almacenaje y distribución del agua) fue evaluado a través de la metodología propuesta por Walker y Skogerboe (1987). Así también se modeló el desempeño del riego a través del software WinSRFR (USDA, 2010).



Figura 66. Ubicación piloto tecnológico Junín-Mendoza.

Definición necesidades de riego

Para determinar las necesidades de riego del cultivo se utilizó la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998). Para esto, se utilizó la información disponible en la Plataforma Satelital PLAS, mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo y establecer el coeficiente de cultivo basal (Kcb), tal como se muestra en la **Figura 67**.



Figura 67. Viñedo piloto y su visualización en la Plataforma Satelital PLAS.

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir del parámetro

evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada a 2,8 km desde el punto en estudio. Los valores diarios durante un año son mostrados en la **Figura 68**.

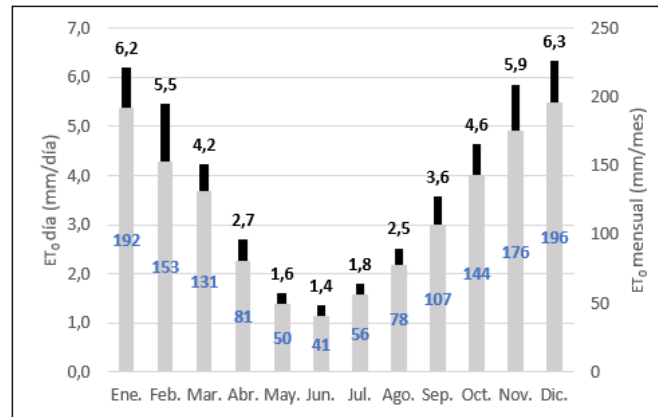


Figura 68. Distribución de la evapotranspiración de referencia (ET_o) promedio diario y acumulado mensual para el año 2021 en Junín, Mendoza.

Por su parte, la estimación de la lámina de riego aportada en cada evento de riego se realizó a través del aforo del caudal en la acequia regadora. Paralelamente, se realizó el monitoreo del contenido de humedad en suelo mediante el uso de sensores de humedad (Mod. 10HS, Decagon Dev., USA) ubicados a profundidades de 30, 60, 90 y 120 cm (**Figura 69**). Así también, en momentos específicos del cultivo para algunos ciclos, y al inicio y final de cada uno de los ciclos evaluados, se realizaron muestreos de suelo para determinar el contenido gravimétrico de agua, con el fin de obtener los balances de agua en el suelo correspondientes.



Figura 69. Instrumental de monitoreo de humedad de suelo y caudales de riego. a) método de riego; b) Calicata para instalación de las sondas a distintas profundidades; c) muestreos para determinar contenido gravimétrico de agua; d) Aforador de cresta ancha.

Los valores del coeficiente de evaporación (ke) fueron estimados a partir de la metodología propuesta por FAO 56 (Allen et al. 1998).

Dada la imposibilidad de manejar el riego según las necesidades del cultivo interesó conocer el estado hídrico de las plantas antes de recibir el próximo riego (i.e. mínimo estado hídrico). Para

ello se utilizó la cámara de presión (Modelo 4, Bio Control, Argentina) para medir el potencial hídrico de tallo (PHT) y potencial hídrico de hoja (PHH) alrededor del mediodía solar (13:40 hora local) según la metodología propuesta por Shackel et al. (1997).

Resultados

En la **Figura 70**, se muestra el desarrollo del cultivo de vides, obtenido a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI (disponible en la Plataforma PLAS Fontagro). A partir de estos valores se establecieron los valores del coeficiente de cultivo basal (Kcb), utilizados para la determinar las necesidades de riego semanal del cultivo. El monitoreo con información satelital permite caracterizar la duración de los periodos de desarrollo del cultivo: brotación (Kcb inicial), desarrollo (crecimiento vegetativo), sin desarrollo vegetativo (Kc medio) y senescencia (Kc fin). No solo se identifican los estados de desarrollo del cultivo, sino que permite establecer valores máximos de desarrollo, duración de las etapas, lo que mejora la definición precisa de las necesidades de riego y la oportunidad del aporte.

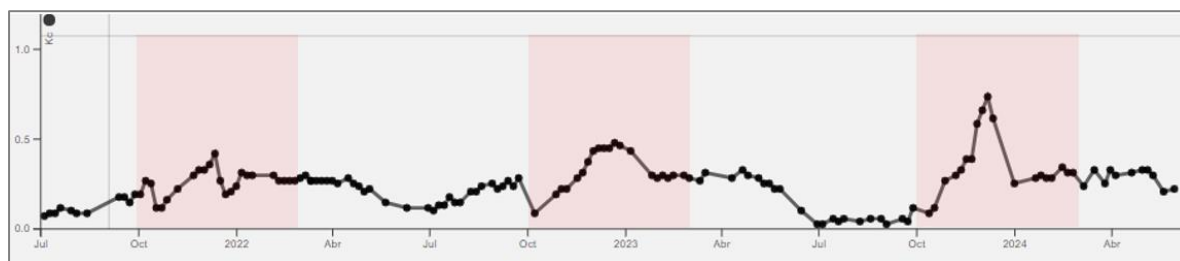


Figura 70. Curva de desarrollo del cultivo de vides descrita a partir del coeficiente de cultivo basal (Kcb) durante las temporadas 2021/22, 22/23, 23/24.

De acuerdo a los valores del coeficiente de cultivo observados (promedio de Kcb = 0,3), se puede indicar que corresponden a plantas con bajo desarrollo de la vegetación sobre el suelo, debido principalmente al sistema de conducción en “espaldero” que favorece el desarrollo de la vegetación en un plano vertical principalmente (Fig. 1a) además de un vigor medio dada la edad de las plantas.

Manejo del riego

En la parcela piloto el riego fue aportado de manera tradicional, sin considerar la metodología FAO 56 propuesta en el proyecto y por tanto corresponde a una línea base. En este sentido, el manejo del riego en estas localidades depende totalmente de la disponibilidad de agua a partir del sistema de turnado de la inspección de cauce local. Los riegos aportados fueron láminas de 62 mm, esto se determinó utilizando los valores obtenidos durante la evaluación del desempeño del riego considerando la tasa de infiltración de agua en el suelo y los tiempos de oportunidad o presencia de agua libre durante el evento. Esos valores, luego fueron ajustados por el volumen de agua ingresado medida a través de un aforador de “cresta ancha” y la superficie de la parcela. El desempeño del riego superficial fue caracterizado por medio de evaluación de parámetros como la eficiencia de aplicación, almacenaje y distribución del agua, a través de la metodología

propuesta por Walker y Skogerboe (1987) y con el software WinSRFR (USDA, 2010) (**Figura 71**).

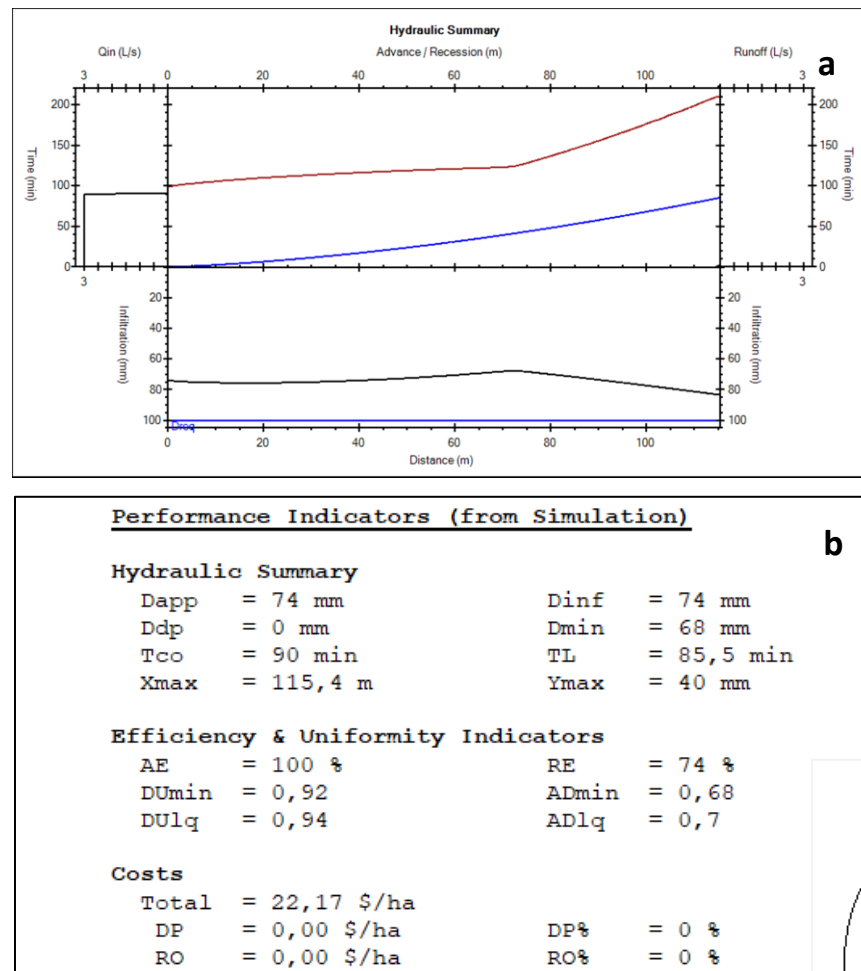


Figura 71. Desempeño del riego y valores asociados de eficiencia para el evento de riego evaluado según el modelo WinSRFR. a) Lámina de riego; b) Indicadores de desempeño.

A partir de la modelación, en la **Figura 71a** se muestra el resumen hidráulico del evento del riego con las dimensiones de la parcela, caudal ingresado y los tiempos de aplicación, avance y receso del agua en la parcela. En la Fig. 6 b se puede observar que la eficiencia de aplicación (AE) fue del 100%. Sin embargo, la eficiencia de almacenaje (RE) fue cercana al 70% en las condiciones de manejo del riego por parte del productor. Esto demuestra que, si bien no existieron pérdidas de agua por desagüe al pie del surco ni percolación profunda, no se repuso la totalidad de agua almacenable en el suelo al momento del riego (i.e. lámina aplicada < lámina requerida).

Por su parte, los registros del contenido volumétrico de humedad en el suelo se señalan en la **Figura 72**, la cual ilustra la dinámica de la lámina de agua estimada en el suelo a lo largo de cada temporada.

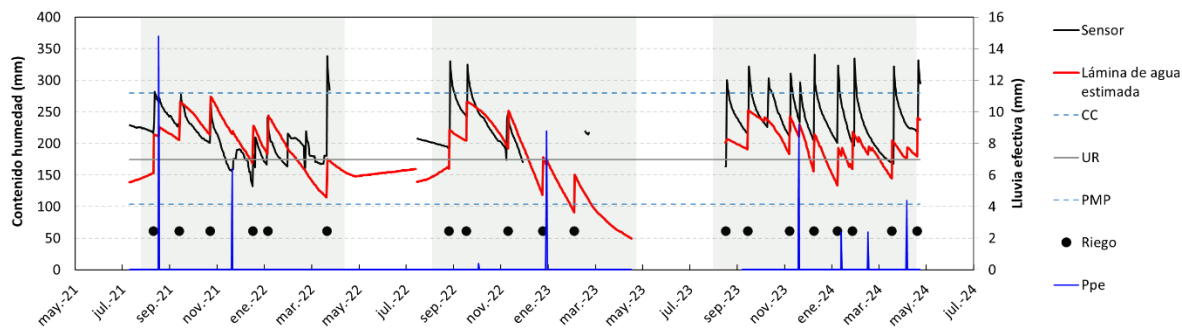


Figura 72. Contenido de humedad en el suelo medido con sensor (línea negra), lámina de agua estimada (línea roja), riegos (círculos negros), precipitaciones efectivas (barras azules) y parámetros de contenido de humedad en el suelo teóricos (CC: capacidad de campo, UR: umbral de riego y PMP: punto de marchitez permanente) en la parcela de vides para los ciclos de cultivo 21-22, 22-23 y 23-24.

Como se puede observar en la **Figura 72**, la cantidad de riegos en la parcela varió significativamente entre las temporadas del ensayo, con 6 y 5 eventos en los dos primeros ciclos y 8 eventos en el último ciclo evaluado. El periodo de tiempo entre turnos de riegos varió entre 19 a 76 días en el caso más crítico. La cantidad de agua aplicada en cada riego (círculos negros en la Fig. 7) elevó el contenido de agua en el suelo a niveles cercanos a capacidad de campo del suelo solo en la última temporada, mientras que en las dos primeras la disponibilidad disminuyó llegando incluso a valores cercanos a PMP. Finalmente, las precipitaciones efectivas se calcularon mediante la ecuación recomendada para zonas áridas (Chambouleyron 2005), la cual considera que la lámina de agua aportada es el 80 % de precipitaciones mayores a 12 mm, lluvias inferiores a dicha cantidad no son consideradas. Las mismas alcanzaron 21,2 mm, 9,2 mm, 18,4 mm, para cada temporada.

Por otro lado, en la **Tabla 32** se presenta un resumen de los rendimientos del cultivo y la productividad del agua alcanzada durante las tres temporadas de análisis.

Tabla 32. Parámetros productivos evaluados en cosecha.

	Temp. 21-22	Temp. 22-23	Temp. 23-24
Rendimiento (kg/ha)	13.700	27.700	18.900
Lámina de riego aportada (mm)	393	319	514
Productividad del agua (kg/m ³)	3,5	8,7	3,7

Comparación del agua suministrada con las demandas de agua calculadas desde la plataforma PLAS

De acuerdo a los registros de la demanda ambiental del sitio y los valores del coeficiente de cultivo estimados a partir del índice de vegetación satelital, la ET del cultivo fue de 504, 558 y 671 mm, en las temporadas 21-22, 22-23 y 23-24, respectivamente. Los datos de las condiciones ambientales, el coeficiente de cultivo y la evapotranspiración de cultivo se señalan en la **Tabla 33**.

Tabla 33. Estimación de las demandas de agua (mm) para satisfacer la evapotranspiración (ETc) de la cubierta vegetal de la viña calculada desde el sistema PLAS. Campañas 2021/22, 22/23, 23/24 (desde 1 de agosto hasta 30 de abril del siguiente año).

Temporada	ET _o	T (K _{cb} *ET _o)	E (k _e x ET _o)	ET _c (T + E)	P _{pe}	Riego (lámina infiltrada)	Riego + P _{pe}	(Riego + P _{pe}) / ET _c
Mm								
21-22	1346	406	98	504	21	372	393	78%
22-23	1264	456	102	558	9	310	319	57%
23-24	1407	525	158	683	18	496	514	75%

E: evaporación; T: transpiración; P_{pe}: Precipitación efectiva; Riego: n° eventos x lámina infiltrada y ajustada por evento⁻¹

Estado hídrico del viñedo

Al evaluar la relación entre los aportes de riego y las necesidades del cultivo pudo observarse que existió un déficit hídrico en distintos periodos de cultivo pudiendo generar algún tipo de estrés a nivel de planta.

En este sentido, se han sugerido valores umbrales de PHT y PHH, según el estado fenológico del cultivo, que permitirían discernir entre estados hídricos sin estrés y estrés hídrico moderado (**Figura 73**). Al compararse los valores obtenidos se puede observar que las plantas evaluadas no presentaron estrés hídrico alguno para los momentos evaluados.

Algunas recomendaciones de riego para vides blancas de vinificar sugieren que luego de que las bayas hayan alcanzado el tamaño de arveja podría reducirse el aporte de agua a un 70% de las necesidades estimadas.

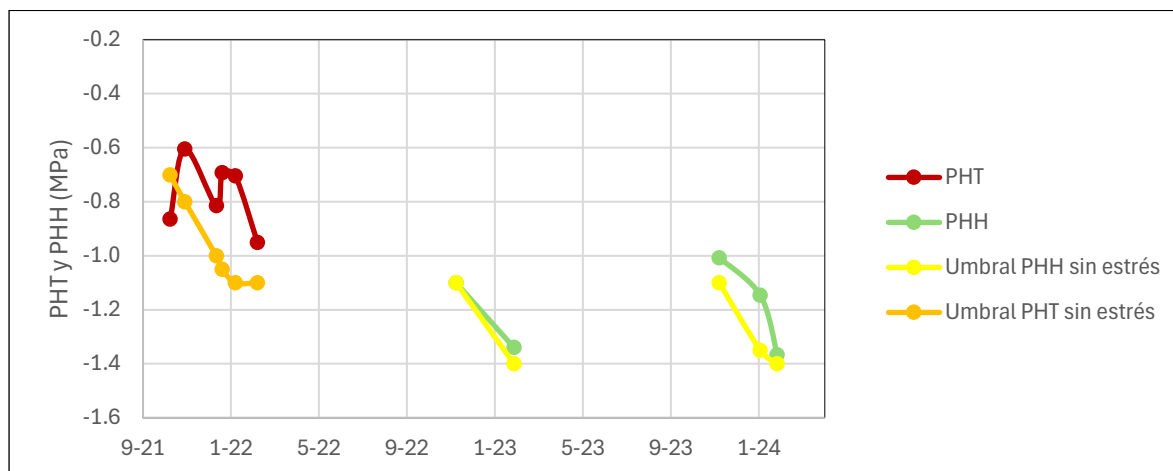


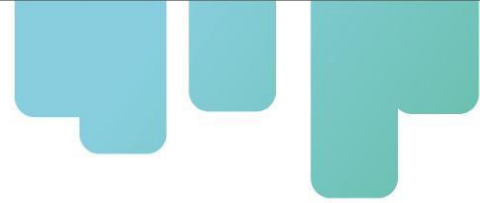
Figura 73. Evolución de potencial hídrico de tallo (PHT) y potencial hídrico de hoja (PHH) en distintos momentos de cultivo y valores umbrales para los ciclos de cultivo 21-22, 22-23 y 23-24.

Según Ojeda (2007) para un viñedo cuyo objetivo es un vino blanco aromático una estrategia interesante sería producir una restricción hídrica ligera y progresiva hacia el final del período comprendido entre envero y madurez. Un estrés severo podría provocar una pérdida de compuestos aromáticos y sería desaconsejable para vinos blancos donde se busca privilegiar el aroma de la uva.

Conclusiones

Los valores del índice de vegetación observados en la parcela piloto son bajos e indicarían bajo desarrollo vegetativo durante las tres temporadas analizadas. En función del análisis del manejo del riego en la parcela y la comparación con las demandas de riego estimadas con la metodología FAO 56 asistida con información satelital, se puede indicar que en las tres temporadas el cultivo recibió una menor dotación de agua. Esto se debió a que la entrega se planifica en función de la oferta del recurso hídrico a nivel de cuenca y no en función de la demanda estricta del cultivo. En este sentido, el aporte de agua por riego y precipitación efectiva respecto del agua evapotranspirada representó un 78%, 57% y 75%, para las tres temporadas cronológicamente. La disponibilidad hídrica en el suelo modelada y monitoreada con sondas muestran disminución del contenido de humedad a valores cercanos a PMP. El principal motivo de este déficit se puede deber a la baja frecuencia del riego aportado, que en algunos casos alcanzó 55 a 76 días entre riegos. A pesar de ello, el cultivo no estuvo sometido a estrés hídrico moderado o severo que pudiese afectar sus rendimientos.

A partir de los resultados obtenidos, se puede considerar que el manejo del riego asistido con la metodología de cálculo propuesta, proporciona un seguimiento a la disponibilidad hídrica en el suelo y permite estimación confiable de las necesidades netas de riego por parte del cultivo.



Piloto tecnológico en cultivo de tomates.

Argentina produce anualmente unas 600.000 ton de tomate para industria en un área implantada de 7.331 ha, con un rendimiento promedio de unas 80.000 ton/ha. La provincia de San Juan ocupa un lugar destacado en este esquema, con el 32% del área nacional y el 42% de la producción, esto debido a que el rendimiento promedio es superior a la media nacional, alcanzando los 107 ton/ha. El departamento de Pocito, en esa provincia, es el epicentro de la producción a ese nivel, concentrando el 48% de área cultivada a nivel provincial, de las cuales el 95 % se realiza con riego por goteo. Al igual que todos los cultivos en la región árida de Argentina, la producción de tomate requiere el aporte de riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de tomates permitirá aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital con objeto de validar su uso en el riego del cultivo de tomate.

Materiales

Los trabajos de validación se desarrollaron durante la temporada 2021/22 en una parcela comercial de tomate para industria ubicada en el campo experimental de la propia EEA San Juan de INTA, en el departamento Pocito, con una parcela “testigo” (sin intervención del proyecto) y una parcela “control” (con recomendaciones de riego del proyecto). Más tarde en la temporada 2023/24, se realizó una experiencia piloto también a escala comercial, con parcela testigo y control, en una finca perteneciente al productor Alfredo Archilla, asociado a Tomate 2000, ubicada a 2 km de la anterior, en el mismo departamento. En ambos casos el tipo de suelo es somero y de gran permeabilidad, no creando encharcamiento en las zonas de menor desarrollo de cultivo, infiltrando rápidamente el exceso de riego. El clima es seco con precipitaciones anuales medias del orden de los 90 mm, concentradas principalmente en la época estival (régimen monzónico). El tomate cultivado es para industria, híbrido Harris Moran 7883. La preparación del suelo, la siembra y establecimiento del cultivo fueron siguiendo las prácticas habituales de los productores pertenecientes a la Asociación Tomate 2000, con riego por goteo por medio de cintas con un marco de 1.5 x 0.3 m y emisores de 1 l/h.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos una vez validada la tecnología, es decir los de la parcela control del productor Alfredo Archilla en la temporada 2023/4 (**Figura 74**). Cabe mencionar que la misma semana del trasplante ocurrió un fuerte viento disecante denominado Zonda, que afectó el desarrollo del cultivo sobre todo en la zona suroeste de la parcela, lo cual tuvo consecuencias negativas en el rendimiento obtenido.

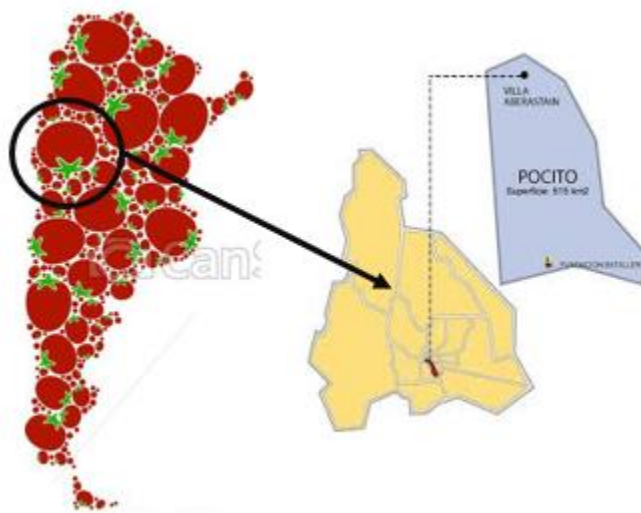


Figura 74. Ubicación piloto tecnológico en el departamento de Pocito, (San Juan).

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo fueron determinados utilizando la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998).

Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO (agrisatwebgis.com), mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal y establecer los coeficientes de cultivo (Kcb) a partir de los índices NDVI.

El agrupamiento de los valores del índice NDVI en rangos, permitió identificar y diferenciar niveles de desarrollo del cultivo, tal como se señala en la **Figura 75**.



Figura 75. Imágenes de los índices NDVI y su distribución espacial sobre la parcela piloto.

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir del parámetro evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en la misma EEA San Juan de INTA, a 2.000 metros de la parcela piloto.

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, los momentos y volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con sondas de humedad (enterradas a 30 y 50 cm) y caudalímetros (**Figura 76**).



Figura 76. Instrumental de monitoreo de los partes de riego.

Resultados

El monitoreo con información satelital permitió caracterizar los Kcb medios semanales y vincularlos a la fenología del cultivo. Estos Kcb, afectados por las ETo correspondientes, determinaron las ETc o necesidades netas de riego (Nnr). Y en función de la evaluación de la eficiencia de aplicación del equipo, sus necesidades brutas (Nbr). Por último, estos valores se compararon con la lámina de riego aplicada, determinando el grado de cobertura o el exceso de riego respecto a la demanda calculada.

En la **Figura 77** se muestra el desarrollo del cultivo de tomate en la parcela control durante sus 16 semanas del ciclo en la temporada 2023/4, obtenidos a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI (disponible en la Plataforma PLAS FONTAGRO). Como se puede apreciar la cantidad de imágenes satelitales permite definir claramente las diferentes fases de desarrollo del cultivo durante toda la temporada. A partir de estos datos se establecieron los valores del coeficiente de cultivo basal (Kcb), utilizados para la determinación semanal de las necesidades de riego del cultivo.

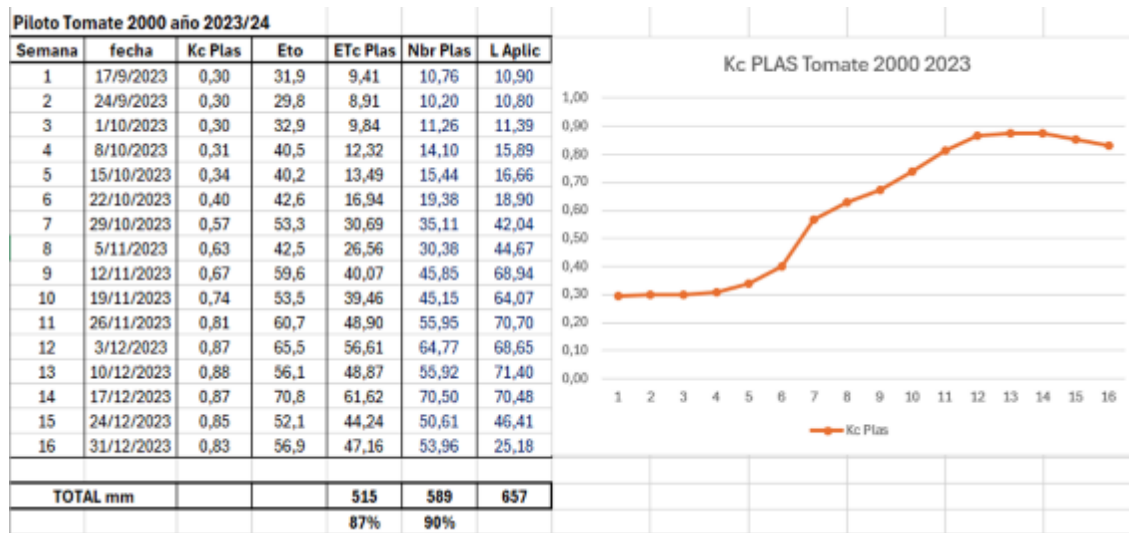


Figura 77. Evolución del Kcb semanal, ETo y láminas de riego, tanto calculadas como aplicadas.

Manejo del riego

Debido a la alta demanda ambiental y los suelos someros de 40 cm de profundidad, se llegó a regar hasta 5 veces por día, para mantener la humedad adecuada en la zona de raíces. La información de pluviómetro de cubeta, el cual se instaló debajo de un gotero y cuya lámina de aplicación fue calibrada con el uso de un caudalímetro tipo domiciliario, permitió llevar una contabilidad ajustada de manera diaria, comparando las láminas aplicadas por el productor con las láminas requeridas de los cálculos de la plataforma. Esto fue muy importante para comprobar si el productor regaba de acuerdo las recomendaciones. En una primera etapa del cultivo, en el mes de octubre, donde se regaba generalmente dos veces por día, esto fue así, como lo muestra la **Figura 78**.



Figura 78. Eventos de riego vs necesidades determinadas por la Plataforma en octubre.

Mientras tanto el productor comparaba su cultivo no con la parcela testigo sino con la de un vecino que no había sido afectada en trasplante por el viento Zonda, y viendo que el suyo venía retrasado en crecimiento, decidió regar un poco por encima de las recomendaciones, en un acto guiado por cierto nerviosismo propio de esa circunstancia (Figura 79).

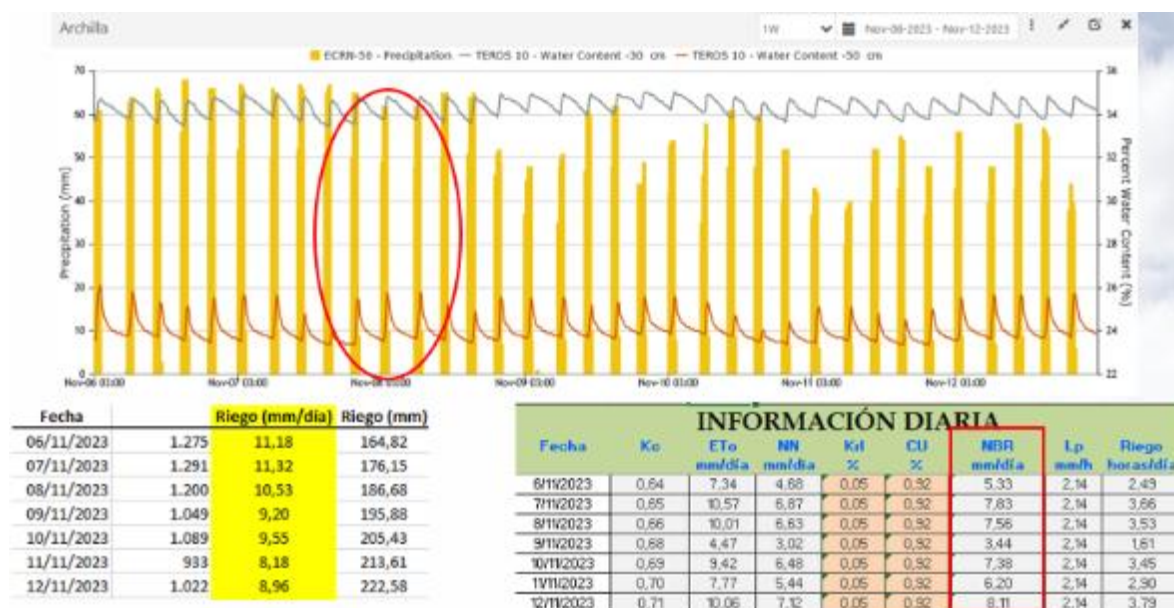


Figura 79. Eventos de riego vs necesidades determinadas por la Plataforma en el mes de noviembre.

De la misma manera, las comparativas entre lo regado y las recomendaciones según la plataforma muestra que al final del ciclo del cultivo el productor va vaciando de humedad el suelo. Esto es así porque el tomate se cosecha de manera mecánica en un sola pasada y, por tanto, se busca una alta uniformidad en la maduración de la fruta (**Figura 80**).

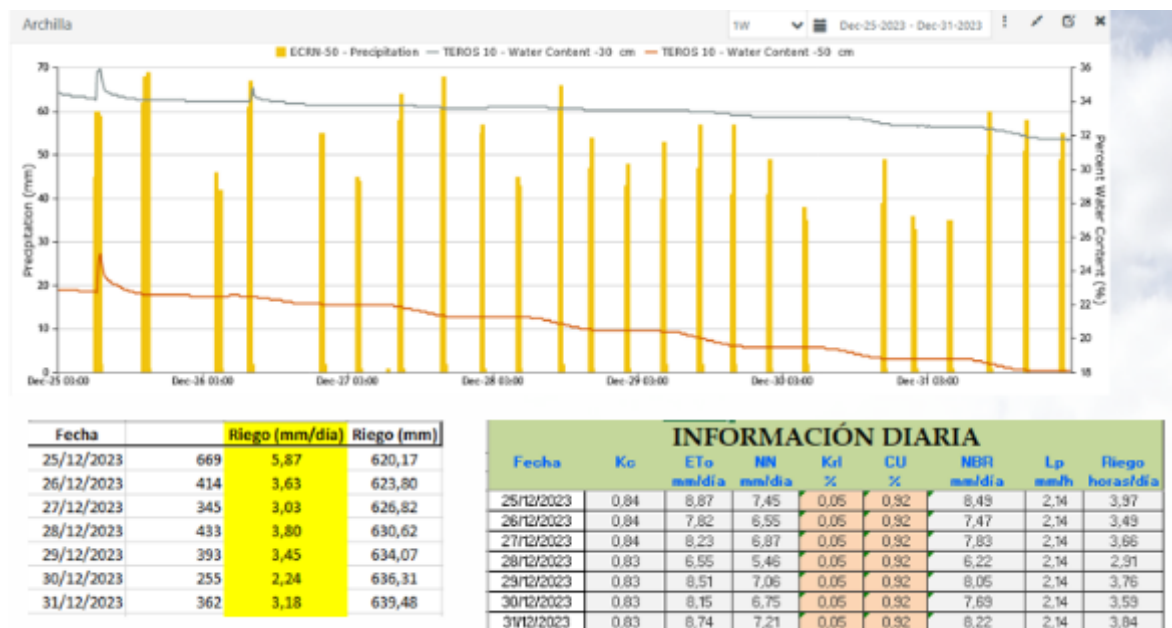


Figura 80. Eventos de riego vs necesidades determinadas por la Plataforma al final del cultivo.

Para finalizar esta sección mostramos en la **Figura 81** la relación durante todo el cultivo de la cantidad de agua aportada por semana con respecto a la requerida según la plataforma. Esto muestra que las prácticas de manejo del cultivo hay veces que se apartan de las recomendaciones por diferentes motivos. Por ejemplo, a mitad del ciclo debido a la decisión del productor de ver su cultivo con menor crecimiento al del vecino o al final del cultivo para conseguir una mayor uniformidad en la maduración de la fruta. Lo importante para destacar de la experiencia es contar con la información y que partir de ahí el productor tome sus decisiones, a veces acertadas y otras no tanto. Esto formará parte del aprendizaje empírico y la ganancia de confianza respecto a la utilidad de estas herramientas.

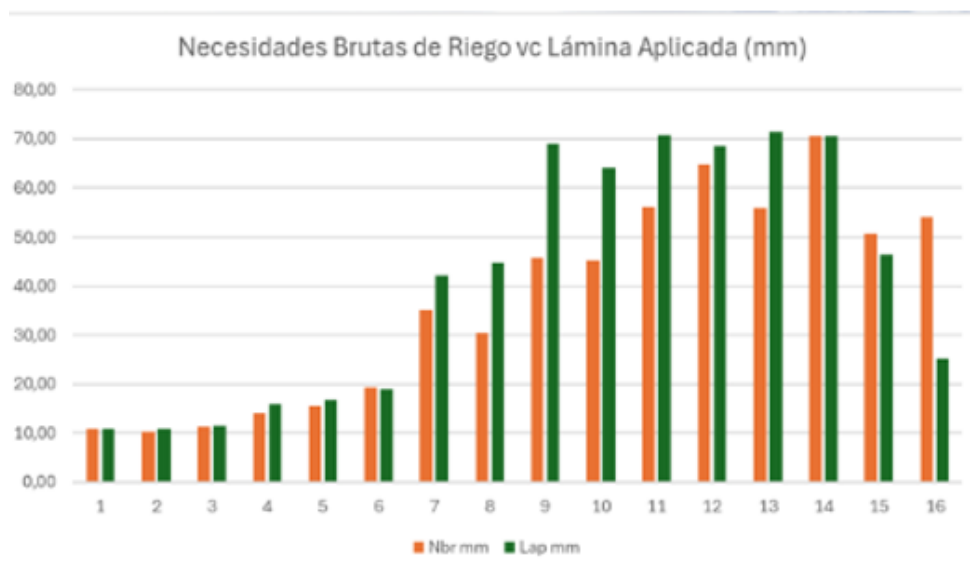


Figura 81. Necesidades brutas de riego determinadas por PLAS vs Lámina Aplicada por el productor.

Rendimiento

A continuación, se presentan los parámetros productivos evaluados para ambas campañas tanto en las parcelas testigo como control (**Tabla 34**).

Tabla 34. Parámetros productivos evaluados en cosecha.

Temporada	Rendimiento (kg/ha)	Lámina Aplicada (mm)	Productividad (kg/m ³)
2021/22			
Testigo	105.000	977	10,74
Control-PLAS	98.000	677	14,47
2023/24			
Testigo	110.000	1.026	10,72
Control-PLAS	75.000	657	11,42

En la temporada 2021/22, caracterizada por condiciones climáticas favorables, el Control-PLAS mostró una mayor eficiencia en el uso del agua, logrando una productividad de 14.47 kg/m³,



superior a los 10.74 kg/m³ del Testigo. En la temporada 2023/24, marcada por eventos climáticos adversos como el viento Zonda que impactó en el rendimiento de ambos tratamientos, el control mostró una productividad del agua de 11.42 kg/m³, a pesar de la disminución en el rendimiento. Esta eficiencia en el uso del agua es un logro significativo, considerando las condiciones desafiantes de la temporada.

Conclusiones

La experiencia muestra la gran utilidad de estas herramientas para el seguimiento del riego y otros factores de la producción en el cultivo de tomate para industria en San Juan, específicamente bajo el modelo de producción de la Asociación Tomate 2000.

Alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica en el manejo del riego de los cultivos frente a escenarios de limitantes en la disponibilidad hídrica, requiere el uso de marcos conceptuales robustos y tecnologías de fácil uso. En este trabajo se ha expuesto el uso de una metodología estandarizada y validada para el riego de los cultivos sugerida por FAO en su Manual N°56, asistida con información satelital. Los insumos para su implementación hoy en día están disponibles de manera gratuita y de fácil acceso en internet. Se ha mostrado que los índices de vegetación satelitales permiten el monitoreo in situ del estado de desarrollo del cultivo y una vez convertidos en coeficiente de cultivo, permiten estimar las necesidades de riego del cultivo y alcanzar altos niveles productivos y rentabilidad económica. La mayor virtud de la metodología expuesta es su facilidad de uso y que representa las condiciones en las cuales se desarrolla el cultivo y no el uso de tablas generalistas para el manejo del riego.

4.2 CULTIVOS DE CHILE

Piloto tecnológico en cultivo de lechuga.

Introducción

En la región de Coquimbo, el cultivo de lechuga es la especie hortícola con mayor superficie ya que presenta en promedio 2.100 ha al año, variando entre 1.145 ha a 3.285 ha. Esta superficie representa el 30% de la superficie nacional con lechugas y ubica a la región como la segunda región productoras de la especie. Según cifras de Odepa (2024), se estima que la mayor proporción de lechugas corresponde al tipo iceberg, seguidos por el tipo milanesa y la productividad oscila entre 35.000 y 45.000 unidades/ha, valores por sobre la media nacional (25.000 - 30.000 unidades/ha)

La producción de lechugas requiere, además de manejos especiales y fertilización, un aporte continuo de riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Esta condición es compleja ya que la realidad regional indica una disminución en la disponibilidad de agua para riego. Por este motivo, así como para otros hortícolas, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua (WP). En este sentido, la modernización, así como la estandarización del cálculo de las necesidades de riego para el cultivo de lechugas, permitirá aumentar la eficiencia en el uso de insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se valida el uso de la metodología FAO 56 asistida con información satelital, con objeto de validar su uso en el riego rutinario del cultivo de lechugas.

Materiales

El ensayo se realizó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar, ubicada en la comuna de Coquimbo (30° 4'26.89"S 71°14'23.74"O), donde el clima presenta influencia marítima y una demanda ambiental anual de 950 mm. El suelo de la parcela se ubica en posición de piedmont y corresponde a la serie Quebrada de Martínez, miembro de la familia franca esqueletal, mixta, térmica Duric Torriorthent (Entisol). Es delgado y textura superficial franco arenosa, color pardo oscuro y en profundidad textura arcillosa y color rojo débil en matriz 2.5 YR (CIREN, 2005).

El cultivo se estableció por trasplante manual el 15 de abril y estuvo hasta julio del año 2021. La superficie cultivada fue 1 ha, con la variedad Desert Storm y una densidad de siembra de 44.000 plantas/ha. La preparación del suelo, trasplante y establecimiento del cultivo fue similar a las prácticas habituales de los productores de lechuga de la localidad. El aporte del riego fue realizado de manera localizada (goteo), utilizando cintas con emisores cada 0,2 m y precipitación de 5,5 L/hora.

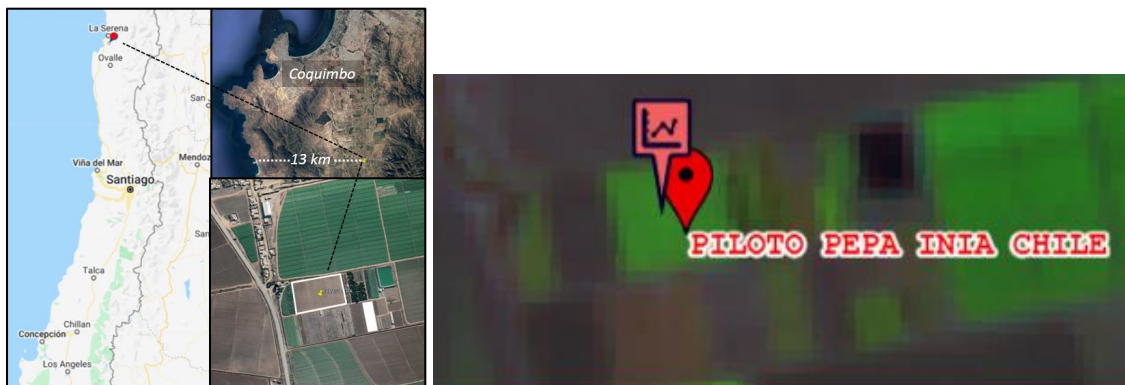


Figura 82. Ubicación parcela hortícola y vista general cultivo de lechugas (Parcela Experimental Pan de Azúcar, Coquimbo).

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo fueron determinados utilizando la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación del uso de series temporales de imágenes NDVI satelital. Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO, mediante la cual fue posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo y establecer el coeficiente de cultivo basal (Kcb) como se muestra en la **Figura 84**.

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en el mismo predio, perteneciente a la red agrometeorologia.cl.

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, instantes de riego y los volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con sondas de humedad (enterradas a 20 y 40 cm) y caudalímetros conectados a un datalogger (**Figura 83**).



Figura 83. Monitoreo manejo del riego en el cultivo de lechuga en la parcela piloto Pan de Azúcar.

Resultados

En la **Figura 84** se muestra el desarrollo del cultivo de lechugas, obtenido a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI, disponibles en la Plataforma PLAS Fontagro. Como se puede apreciar la cantidad de imágenes del NDVI permitió monitorear el desarrollo del cultivo e identificar y diferenciar etapas y niveles de desarrollo del cultivo. A partir de estos datos se establecieron los valores del coeficiente de cultivo basal (Kcb), utilizados para la determinación semanal de las necesidades de riego del cultivo.

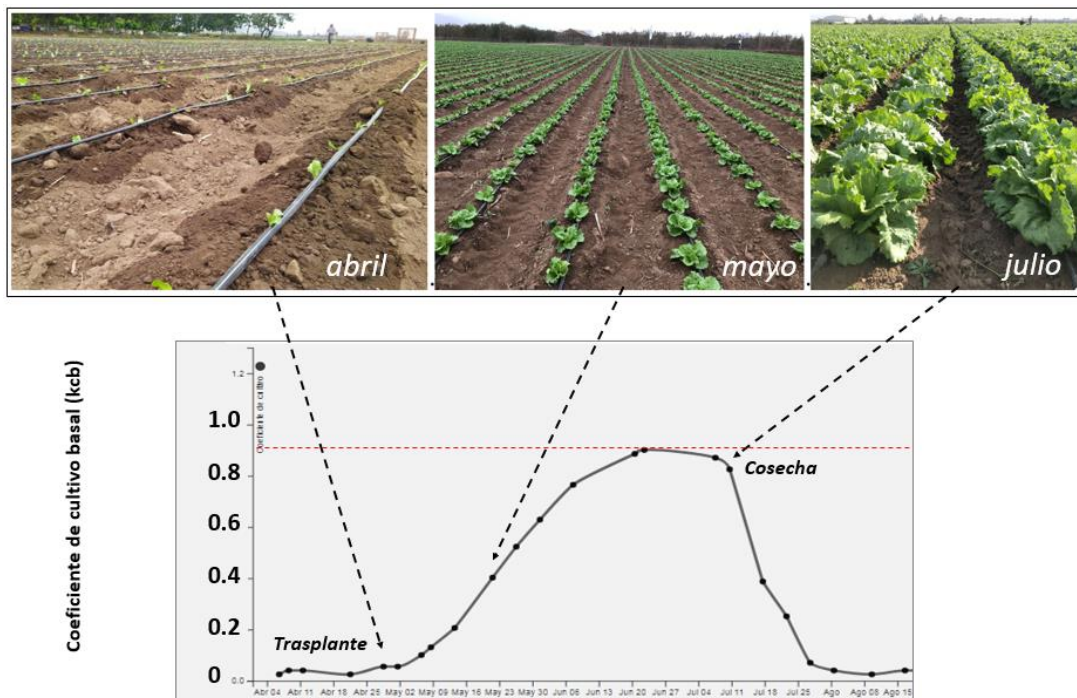


Figura 84. Monitoreo del desarrollo vegetativo del cultivo de lechuga con información satelital, señalando instantes de trasplante (abril), época de crecimiento vegetativo exponencial (mayo) y cosecha (julio).

El monitoreo con información satelital permitió caracterizar la duración de los periodos de desarrollo del cultivo: establecimiento (Kcb inicial), desarrollo (crecimiento vegetativo), sin desarrollo vegetativo (Kc medio). No solo se identificaron los estados de desarrollo del cultivo, sino que se estableció su magnitud (máximos) y duración de las etapas, lo que mejoró la definición precisa de los volúmenes de riego y la oportunidad de aporte.

Manejo del riego

Durante el periodo del cultivo, el coeficiente de cultivo basal (Kcb) alcanzó valores máximos de 0,9 mientras que la demanda ambiental (ETo) tuvo un valor medio diario de ETo cercano a 1,7 mm y una ETo acumulada de 134,4 mm.

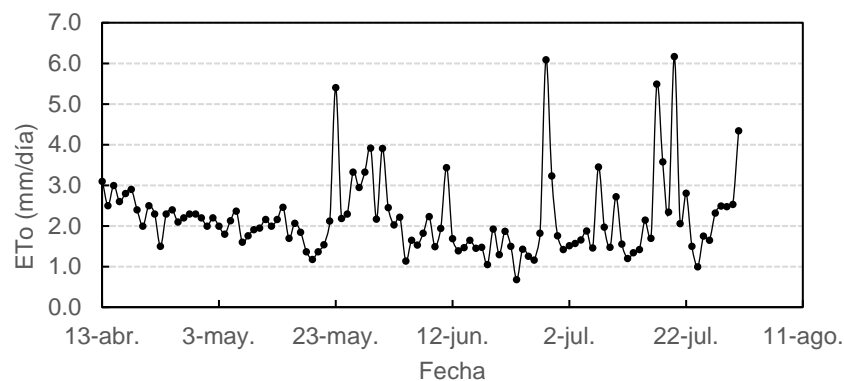


Figura 85. Evapotranspiración de referencia (ETo) diaria durante el periodo de desarrollo del cultivo de lechuga en parcela experimental Pan de Azúcar.

De este modo, durante el ciclo completo de desarrollo del cultivo se aportaron 15 riegos, con mayor duración en pre y post trasplante, con el fin de asegurar el establecimiento del cultivo. Los tiempos de riego variaron entre 41 a 100 minutos por evento, obteniendo un volumen total de riego para la temporada de 839 m³/ha (83,9 mm). En la **Tabla 35** se muestra un resumen del manejo del riego efectuado en la parcela.

Tabla 35. Antecedentes de riego aplicados en el ensayo.

Período cultivo (días después de trasplante)	Riegos (numero)	Tiempo riego (minutos)	Riego (m ³ /ha)
1 a 14	4	100	314,5
15 a 28	2	54	97,6
29 a 42	4	41	129,2
43 a 56	2	90	162,9
>56	3	52	134,8
Total	15	337	839.0

Para una situación de riego control o sin tomar en cuenta el balance hídrico con la información satelital, el riego por ciclo de cultivo fue de 1.250 m³/ha.

La disponibilidad hídrica en el suelo fue mantenida en un umbral de agotamiento aproximado al 50% de la humedad aprovechable. En la **Figura 86** se señala el contenido de humedad volumétrico

a dos profundidades.

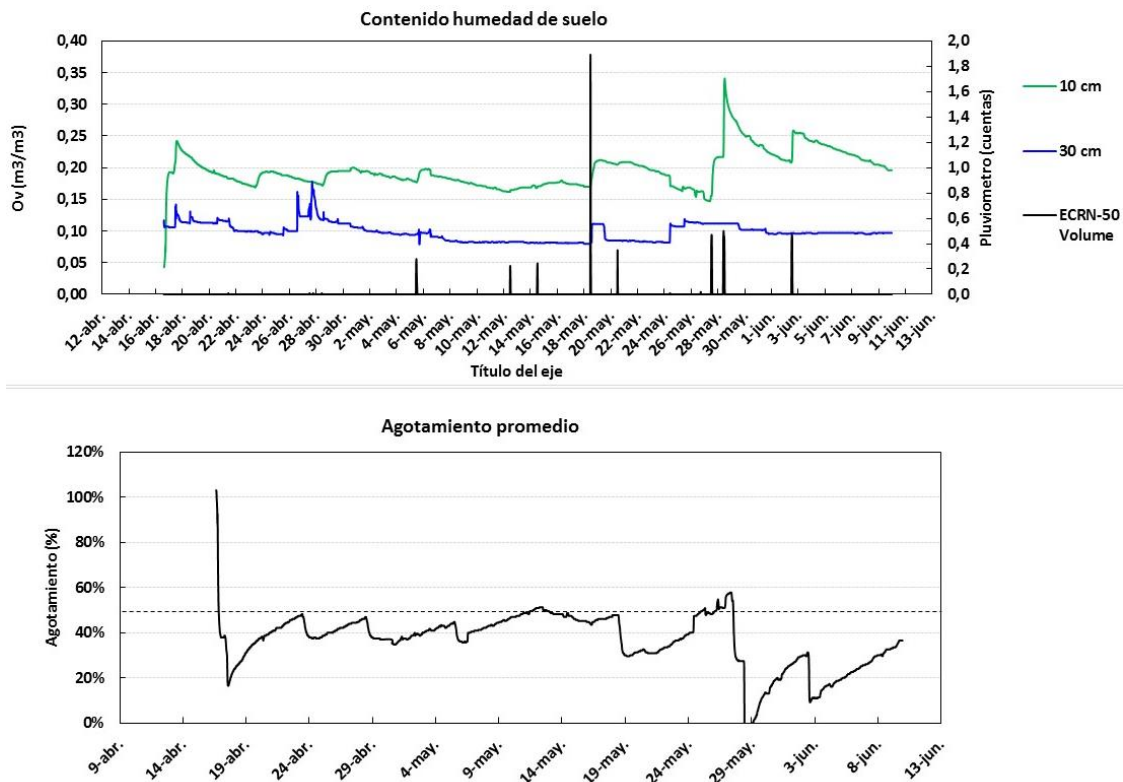


Figura 86. Registro del contenido volumétrico de humedad en el suelo y su agotamiento en parcela experimental.

Rendimiento

El rendimiento fue evaluado en tres sectores de la parcela de manera de recoger posibles diferencias (variabilidad espacial) en el desarrollo de las plantas. En este sentido, no se encontraron diferencias entre los tres sectores cosechados. En la **Tabla 36** se presenta un resumen de los rendimientos obtenidos, así como la productividad del agua alcanzada.

Tabla 36. Parámetros productivos evaluados en la cosecha de la lechuga.

Cultivo	Producción	Riego	Productividad del agua
Lechuga	(unidades/ha)	(m³/ha)	(unidades/m³ agua)
Plataforma PLAS	30.540	839	36
Control (sin tecnología)	35.000	1.250	28



Como se puede ver en el cuadro anterior, durante el periodo de riego del cultivo analizado se aportaron 450 m³/ha menos de agua (un 33%) que en el riego tradicional o control. Esto conlleva a una productividad del agua de riego 30% mayor. Este resultado positivo subraya el impacto de la tecnología en la optimización del uso de los recursos hídricos, un factor clave para la sostenibilidad y rentabilidad del cultivo.

Conclusiones

El uso de información satelital permitió identificar y diferenciar los niveles de desarrollo del cultivo de lechuga, estableciendo valores de coeficiente de cultivo basal para determinar sus necesidades de riego. El monitoreo con información satelital también permitió caracterizar la duración de los periodos de desarrollo del cultivo, lo que mejoró la definición precisa de los volúmenes de riego y la oportunidad de aporte. Además, se logró una mayor productividad del agua de riego con el uso de tecnología, lo que subraya su impacto en la optimización del uso de los recursos hídricos en zonas áridas.

En resumen, el uso de una metodología estandarizada y validada para el riego como es FAO 56, ahora asistida con información satelital, permite alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica en el manejo del riego de los cultivos, ya que permite estimar las necesidades de riego de manera precisa, logrando altos niveles productivos y rentabilidad económica. La simplicidad del marco teórico y el acceso a los insumos necesarios para su implementación, hacen que esta metodología sea una herramienta valiosa para enfrentar escenarios de limitantes en la disponibilidad hídrica, como las que están sufriendo en las regiones del norte de Chile.

Piloto tecnológico en cultivo de habas

En la región de Coquimbo la superficie cultivada con habas es aproximadamente 100 ha, con una producción de 5 ton/ha, lo cual representa una participación del 5% a nivel nacional. Al igual que todos los cultivos en la región árida de Coquimbo, la producción de habas requiere el aporte de riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de habas permitirá aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital con objeto de validar su uso en el cultivo de habas.

Materiales

El ensayo se realizó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA-Intihuasi (19 J 30° 4'26.89"S 71°14'23.74"O) Coquimbo, durante los meses de septiembre y xx 2021, se cultivó una superficie de 1 ha de lechuga, variedad Dorado. La siembra se realizó el 3 de abril, en forma manual (**Figura 87**). El clima tiene influencia marítima y la demanda ambiental es de 950 mm/año. La preparación del suelo, la siembra y establecimiento del cultivo fue similar a las prácticas habituales de los productores de maíz de la localidad. El aporte del riego fue localizado (goteo) por medio de cintas, con emisores cada 0,2 m (precipitación 5,5 L/hora metro).

El suelo de los ensayos corresponde a la serie Quebrada de Martínez y se caracteriza por ser miembro de la Familia franca esquelética, mixta, térmica Duric Torriorthent (Entisol). Suelo piedmont, delgado, de textura superficial franco arenosa y color pardo oscuro; de textura arcillosa y color rojo débil en matriz 2.5 YR en profundidad (CIREN, 2005).



Figura 87. Ubicación parcela hortícola y vista general cultivo de habas (Parcela Pan de Azúcar, Coquimbo).

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo, fueron determinados utilizando la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998).

Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO (agrisatwebgis.com), mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo, establecer el coeficiente de cultivo (Kcb) como se muestra en la **Figura 88**.



Figura 88. Portal web de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO (agrisatwebgis.com).

El agrupamiento de los valores del índice NDVI en rangos, permitió identificar y diferenciar niveles de desarrollo del cultivo, tal como se señala en la **Figura 89**.

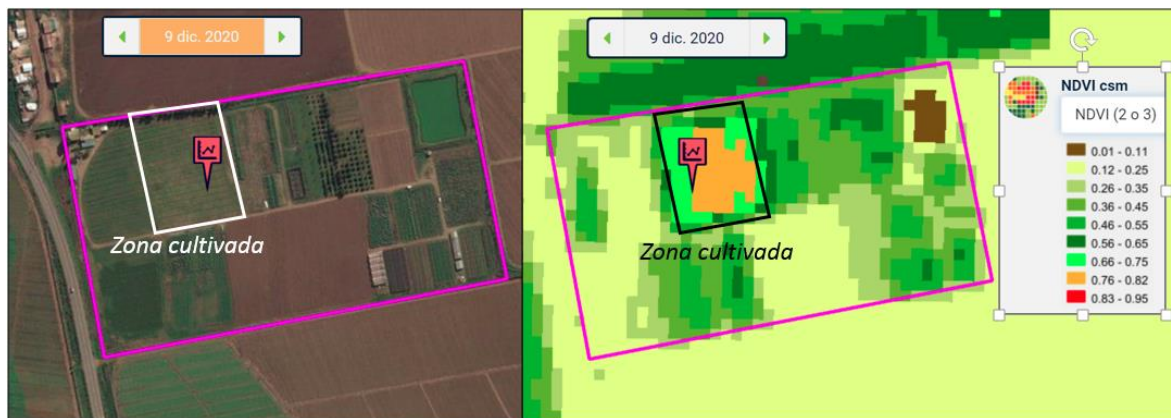


Figura 89. Imágenes del índice de vegetación en habas y su distribución espacial sobre la parcela experimental.

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir del parámetro *evapotranspiración de referencia (ET_o)*, la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en la parcela experimental y se encuentra disponible en el sitio web agrometeorologia.cl. Los valores diarios durante son mostrados en la **Figura 90**.

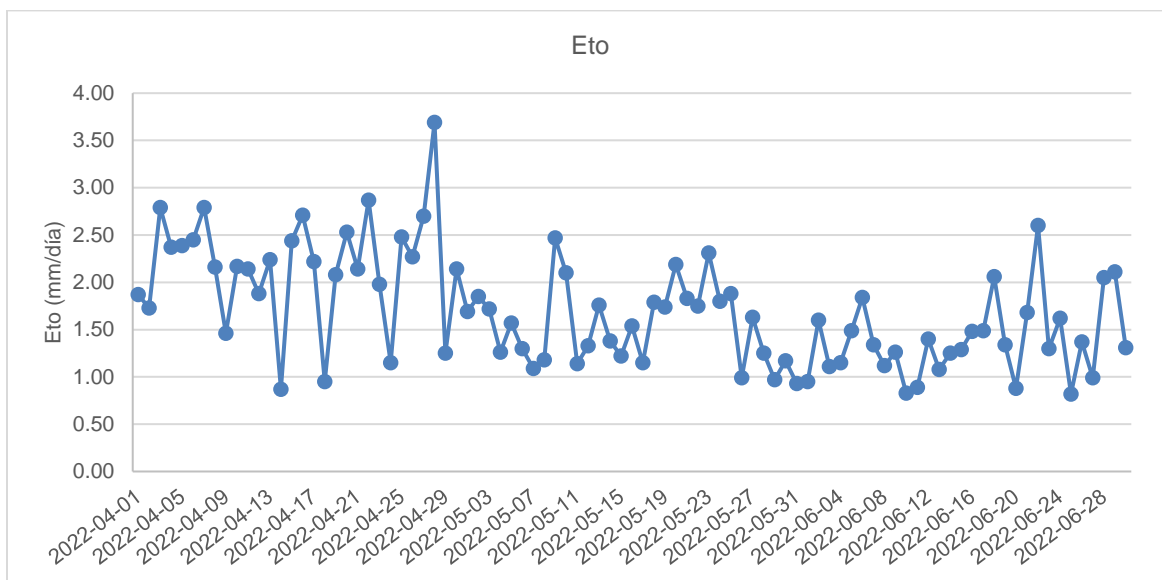


Figura 90. Evapotranspiración registrada en el sitio para el ciclo del cultivo

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, los instantes de riego y los volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con sondas de humedad marca Decagon modelo GS1 (enterradas a 10, 30 y 50 cm) y caudalímetros (Figura 90).



Figura 91. Instrumental de monitoreo de los partes de riego.

Resultados

En la **Figura 92** se muestra el desarrollo del cultivo de habas, obtenido a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI (disponible en la Plataforma PLAS Fontagro). Como se puede apreciar la cantidad de imágenes satelitales permite definir claramente las diferentes fases de desarrollo del cultivo durante toda la temporada de desarrollo del cultivo. A partir de estos valores se establecieron los valores del coeficiente de cultivo basal (Kcb), utilizados para la determinación semanal de las necesidades de riego del cultivo.

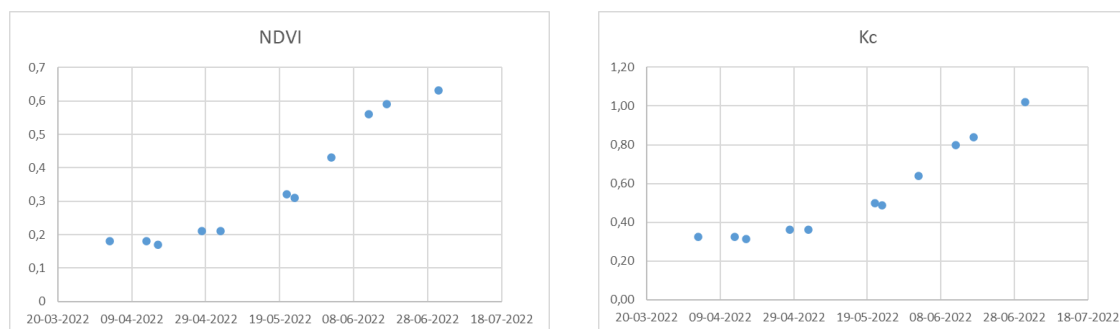


Figura 92. Curva de desarrollo del cultivo de habas descrita a partir del índice de vegetación satelital NDVI y valores de los coeficientes de cultivo basal (Kcb) estimado.

El monitoreo con información satelital permitió caracterizar la duración de los periodos de desarrollo del cultivo: establecimiento (Kcb inicial), desarrollo (crecimiento vegetativo), sin desarrollo vegetativo (Kc medio) y senescencia (Kc fin). No solo se identificaron los estados de desarrollo del cultivo, sino que se estableció su magnitud (máximos) y duración de las etapas, lo que mejoró la definición precisa de los volúmenes de riego y la oportunidad de aporte.

Manejo del riego

Durante el periodo del cultivo, el coeficiente de cultivo basal (Kcb) alcanzó valores máximos de 1,15 mientras que la demanda ambiental (ETo) alcanzó en promedio 3,9 mm/día y acumulado de 437 mm. De este modo, el aporte de riego se efectuó en 15 oportunidades, considerando mayor frecuencia post siembra, con el fin de asegurar la germinación y establecimiento del cultivo. El tiempo por riego varió entre 31 a 126 minutos por evento, obteniendo un volumen total de riego para la temporada de 608 m³/ha (60.8 mm). En la **Tabla 37** se muestra un resumen del manejo del riego efectuado en la parcela.

Tabla 37. Antecedentes de riego aplicados en el ensayo.

Período cultivo (días)	Riegos (numero)	Tiempo riego (minutos)	Riego (m ³ /ha)
1 a 30	4	36	32
31 a 60	4	31	90
60 a 90	4	121	214
> 90	3	126	272
Total	15	314	608

A partir del manejo del riego indicado, el contenido de humedad en el suelo permaneció sobre el 40% de agotamiento de la humedad aprovechable, lo cual fue comprobado a partir de la información registrada con las sondas de humedad (**Figura 93**).



Figura 93. Registro continuo de la humedad volumétrico (v/v) en el suelo de la parcela por medio de sondas.

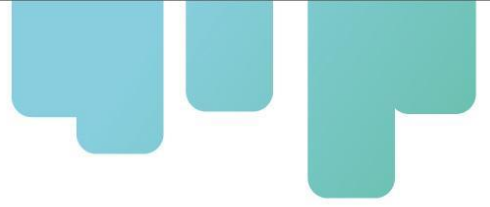
Rendimiento

Los rendimientos alcanzados en la parcela fueron evaluados en tres sectores de manera de recoger posibles diferencias debido a cambios en el desarrollo de las plantas. En este sentido no se encontraron diferencias entre los tres sectores cosechados. En la **Tabla 38** se presenta un resumen de los rendimientos alcanzados y la productividad del agua.

Tabla 38. Parámetros productivos evaluados en cosecha.

Cultivo	Producción	Riego	Productividad del agua (WP)
Habas	(kg/ha)	(m ³ /ha)	(kg/m ³ agua)
Con tecnología	14.273	608	23.5
Sin tecnología	16.174	1.290	12.5

Se presentan los resultados de producción y productividad del agua en dos escenarios: con y sin tecnología. La implementación de tecnología en el cultivo resultó en una disminución del 11.75% en la producción, pasando de 16174 kg/ha a 14273 kg/ha. Sin embargo, se logró una reducción significativa del 52.87% en el riego por año, pasando de 1290 m³/ha a 608 m³/ha. Este menor consumo de agua, junto con el aumento de la producción, se tradujo en un incremento del 88% en la productividad del agua, alcanzando los 23.5 kg/m³ de agua con tecnología, en comparación con los 12.5 kg/m³ de agua sin tecnología. Estos resultados resaltan el impacto positivo de la tecnología en la mejora de la eficiencia del uso del agua, aunque se produjo una ligera disminución en la producción.



Conclusiones

Alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica en el manejo del riego de los cultivos frente a escenarios de limitantes en la disponibilidad hídrica, requiere el uso de marcos conceptuales robustos y tecnologías de fácil uso. En este trabajo se ha expuesto el uso de una metodología estandarizada y validada para el riego de los cultivos sugerida por FAO en su Manual N°56, asistida con información satelital. Los insumos para su implementación hoy en día están disponibles de manera gratuita y de fácil acceso en internet. Se ha mostrado que los índices de vegetación satelitales permiten el monitoreo *in situ* del estado de desarrollo del cultivo y una vez convertidos en coeficiente de cultivo, permiten estimar las necesidades de riego del cultivo y alcanzar altos niveles productivos y rentabilidad económica. La mayor virtud de la metodología expuesta es su facilidad de uso y que representa las condiciones en las cuales se desarrolla el cultivo y no el uso de tablas generalistas para el manejo del riego.

Piloto tecnológico en cultivo de papas.

Introducción

En la región de Coquimbo, la superficie cultivada con papas es en promedio de 2.300 ha, con valores mínimos de 1.100 ha a 3.500 ha desde la temporada 2006/07 a la 2023/24 (**Figura 94**). La producción regional es de aproximadamente 75.000 Ton lo cual representa una participación del 9% a nivel nacional. El rendimiento promedio se sitúa en las 25 Ton/ha (fluctúa entre 17 a 38 Ton/ha), superior al promedio nacional.

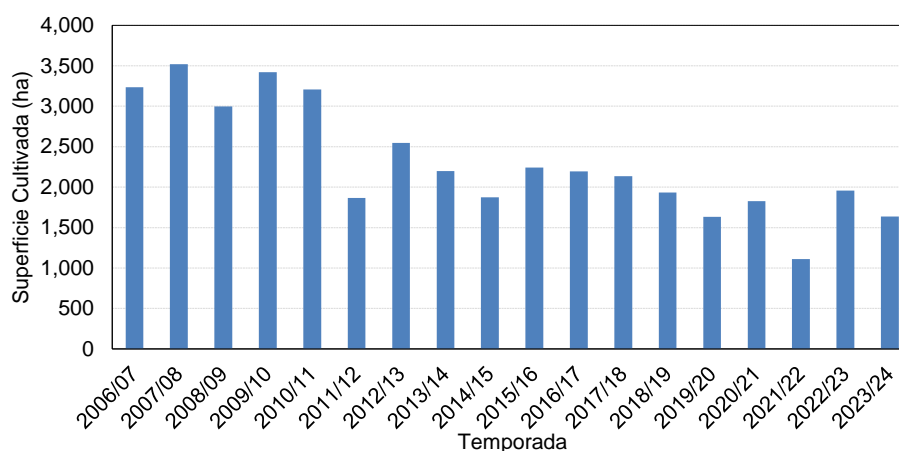


Figura 94. Variación de la productividad de papas en la región de Coquimbo desde el año 2006 al 2023. Fuente: Elaboración propia con datos de Odepa (2024).

Al igual que todos los cultivos en la región árida de Coquimbo, la producción de papas requiere el aporte de riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, producto del cambio climático o competencia con otros cultivos o sectores económicos, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de papas permitirá aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología FAO 56, con la innovación del uso de información satelital, con objeto de validar su uso en el cultivo de papas.

Materiales

El ensayo se realizó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA-Intihuasi (30° 4'26.89"S 71°14'23.74"O) Coquimbo (**Figura 95**). En la parcela experimental el suelo del sitio es franco, profundo, sin presencia de sales ni limitantes para el desarrollo de las raíces. El clima tiene influencia marítima, la demanda ambiental (ETo) alcanza los 950 mm/año y las precipitaciones se sitúan en torno a los 80 mm/año.

La variedad de papas utilizada en el ensayo fue Cardinal (semilla hija), cultivada en una superficie de 1,3 ha. El desarrollo del cultivo ocurrió entre los meses de octubre y febrero, durante la temporada 2020-2021. La preparación del suelo, la siembra y establecimiento del cultivo fue similar a las prácticas habituales de los productores de papas de la localidad. El aporte del riego fue localizado, utilizando cintas con goteros distanciados cada 0,2 m, lo cual determina una precipitación del equipo de 5,5 L/hora por metro lineal.



Figura 95. Ubicación parcela hortícola y vista general cultivo de papas (Parcela Pan de Azúcar, Coquimbo).

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo, fueron determinados utilizando la metodología conocida como “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), asistida con información satelital para la definición del coeficiente de cultivo basal (Kcb). Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO, mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo y establecer el coeficiente de cultivo (Kcb) como se muestra en la **Figura 96**. Como se puede ver el agrupamiento de los valores del índice NDVI en rangos, permite identificar y diferenciar niveles de desarrollo del cultivo.

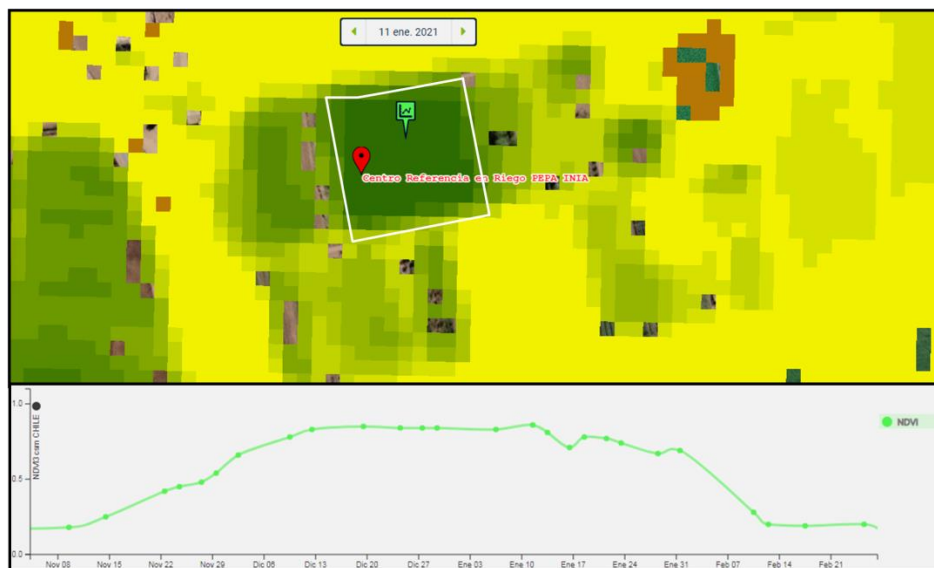


Figura 96. Portal web Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO mostrando la curva de desarrollo del cultivo de papas monitoreado así como los rangos los valores del NDVI en la parcela experimental Pan de Azúcar.

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir del parámetro evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en el mismo predio y se encuentra disponible en el sitio web agrometeorologia.cl.

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, los instantes de riego y los volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con sondas de humedad (enterradas a 20 y 40 cm) y caudalímetros (**Figura 97**).



Figura 97. Instrumental de monitoreo de los partes de riego.

Resultados

En la **Figura 98** se muestra el desarrollo del cultivo de papas, obtenido a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI (disponible en la Plataforma PLAS Fontagro). Como se puede apreciar la cantidad de imágenes satelitales permite definir claramente las diferentes fases de desarrollo del cultivo durante toda la temporada de desarrollo del cultivo. A partir de estos valores se establecieron los valores del coeficiente de cultivo basal (Kcb), utilizados para la determinación semanal de las necesidades de riego del cultivo.

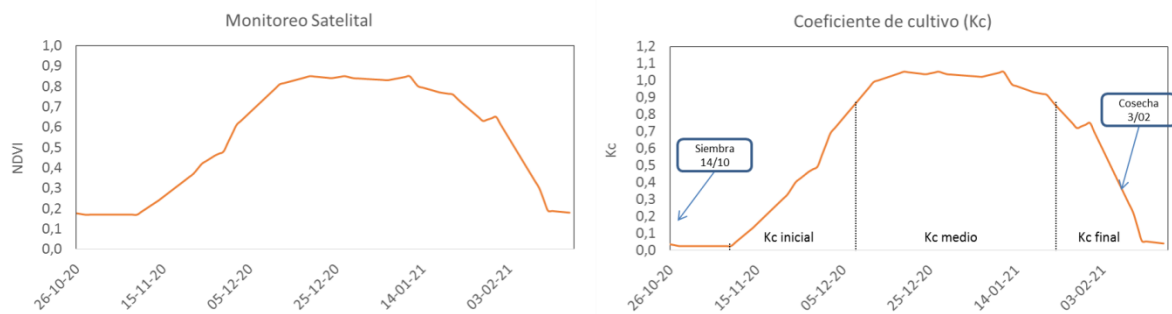


Figura 98. Curva de desarrollo del cultivo de papas descrita a partir del índice de vegetación satelital NDVI y valores de los coeficientes de cultivo basal (Kcb) estimado.

El monitoreo con información satelital permitió caracterizar la duración de los periodos de desarrollo del cultivo: establecimiento (Kcb inicial), desarrollo (crecimiento vegetativo), sin desarrollo vegetativo (Kc medio) y senescencia (Kc fin). No solo se identificaron los estados de desarrollo del cultivo, sino que se estableció su magnitud (máximos) y duración de las etapas, lo que mejoró la definición precisa de los volúmenes de riego y la oportunidad de aporte.

Manejo del riego

Durante el periodo del cultivo, el coeficiente de cultivo basal (Kcb) alcanzó valores máximos de 1,15 mientras que la demanda ambiental (ET_o) alcanzó en promedio 3,9 mm/día y acumulado de 437 mm.

Los valores diarios durante un año son mostrados en la **Figura 99**.

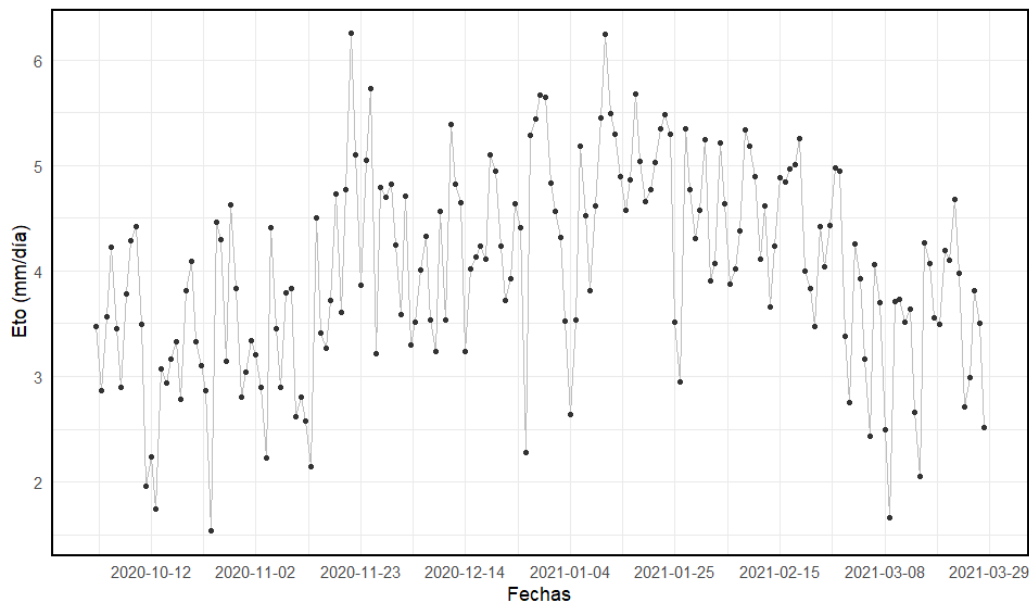


Figura 99. Evapotranspiración de referencia para el periodo del cultivo de papas en la Estación Experimental Pan de Azúcar, Chile.

De este modo, el aporte de riego se efectuó en 34 oportunidades, considerando mayor duración post siembra, con el fin de asegurar la germinación y establecimiento del cultivo. El tiempo por riego varió entre 76 a 116 minutos por evento, obteniendo un volumen total de riego para la temporada de 3.416 m³/ha (341,6 mm). En la **Tabla 39** se muestra un resumen del manejo del riego efectuado en la parcela.

Tabla 39. Antecedentes de riego aplicados en el ensayo.

Período cultivo (días)	Riegos (numero)	Tiempo riego (minutos)	Riego (m ³ /ha)
1 a 30	4	104	432
31 a 60	11	80	917
60 a 90	13	116	1.604
> 90	6	76	463
Total	34	376	3.416

A partir del manejo del riego indicado, el contenido de humedad en el suelo permaneció sobre el 40% de agotamiento de la humedad aprovechable, lo cual fue comprobado a partir de la información registrada con las sondas de humedad (**Figura 100Figura 72.**).

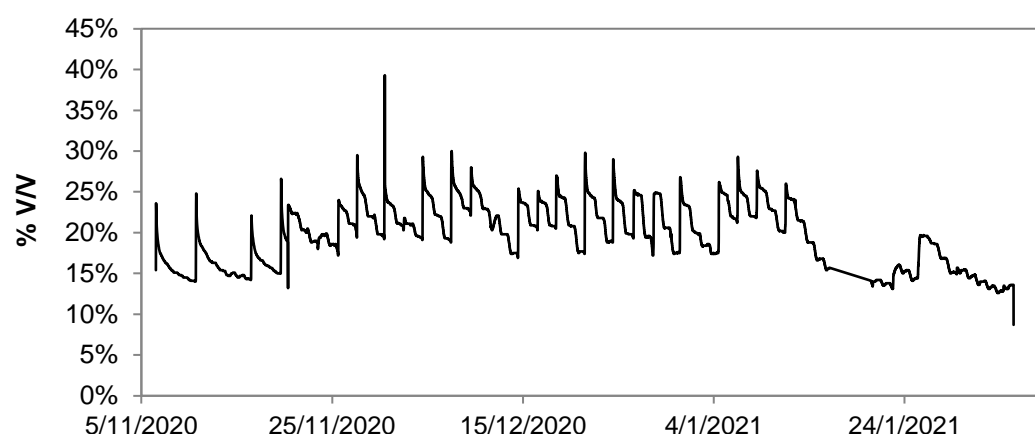


Figura 100. Registro continuo del contenido volumétrico de agua en el suelo de la parcela.

Rendimiento

Los rendimientos alcanzados en la parcela fueron evaluados en tres sectores de manera de recoger posibles diferencias debido a cambios en el desarrollo de las plantas. En este sentido no se encontraron diferencias entre los tres sectores cosechados. En la **Tabla 40** se presenta un resumen de los rendimientos alcanzados y la productividad del agua.

Tabla 40. Parámetros productivos evaluados en cosecha.

Sector	Producción Total (Ton/ha)	Producción comercial (Ton/ha)	Productividad del agua en fresco (kg fresco/m ³ agua)	Productividad del agua en seco (kg materia seca de tubérculo/m ³ agua)
1	54,3 ± 8,9	51,1 ± 8,2	15,9 ± 2,6	3,6 ± 0,8
2	56,8 ± 1,7	54,4 ± 2,4	16,3 ± 0,5	3,7 ± 0,1
3	60 ± 12,0	57,3 ± 9,8	17,3 ± 3,0	4,3 ± 0,9
Media	57 ± 7,9	54,2 ± 7,1	16,5 ± 2,1	3,9 ± 0,7

Como se puede observar los valores de rendimiento alcanzados fueron altos para la especie y por lo tanto muy satisfactorios en términos económicos para el productor. En comparación a valores de rendimiento nacional y regional de papas (24,9 Ton/ha y 23,5 Ton/ha, respectivamente) se puede indicar que se duplicaron dichos niveles y que son comparables con un esquema productivo con alto nivel tecnológico.

Por su parte, los valores de productividad agronómica del agua, expresada como cantidad de producto versus agua de riego aportada, los valores se sitúan entre 16 y 17 kg de papa por metro cúbico de agua de riego utilizado, cifra mucho mayor a lo reportado en otras publicaciones del

riego en el cultivo de papas.

Conclusiones

Alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica en el manejo del riego de los cultivos frente a escenarios de limitantes en la disponibilidad hídrica, requiere el uso de marcos conceptuales robustos y tecnologías de fácil uso. En este trabajo se ha expuesto el uso de una metodología estandarizada y validada para el riego de los cultivos sugerida por FAO en su Manual N°56, asistida con información satelital.

El monitoreo con información satelital permitió definir claramente las diferentes fases de desarrollo del cultivo de papas, estableciendo los valores del coeficiente de cultivo basal para determinar las necesidades de riego. El manejo adecuado del riego resultó en altos rendimientos y una productividad del agua significativamente mayor que los valores promedio, demostrando un éxito económico y tecnológico en la producción de papas.



***Figura 101.** Cosecha del ensayo de papas*

Piloto tecnológico en cultivo de poroto verde

La superficie con poroto verde en la región de Coquimbo oscila entre 618 y 980 ha, ocupando el tercer lugar a nivel país con este cultivo (**Figura 102**). El rendimiento promedio se encuentra entre 8 y 9 t/ha, con un potencial de 22 t/ha (Saavedra et al., 2023).

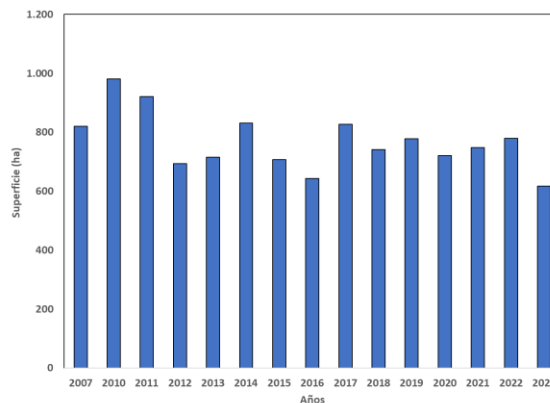


Figura 102. Superficie cultivada con poroto verde en la región de Coquimbo período 2007 a 2023. Fuente: Elaboración propia con datos de Odepa.

La creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región de Coquimbo hace imprescindible implementar medidas que mejoren la eficiencia en el uso de los recursos hídricos con el objetivo de maximizar la productividad del agua. La estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de poroto verde contribuirá a optimizar el uso de insumos productivos como el agua y los fertilizantes. En este estudio se emplea la metodología conocida como FAO 56 (Allen et al., 1998) asistida con información satelital y se valida su aplicación en el manejo del riego del cultivo de poroto verde.

Materiales

El ensayo se realizó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA-Intihuasi (19°J 30' 4'26.89"S 71°14'23.74"O) Coquimbo, desde septiembre a diciembre del año 2021. La superficie cultivada fue 1 ha y se utilizó la variedad Venus de poroto verde. La siembra se realizó el 3 de septiembre, en forma manual (**Figura 103**). El clima en esta zona está influenciado por el mar y la demanda ambiental es de 950 mm/año. Para la preparación del suelo, la siembra y el establecimiento del cultivo, se siguieron las prácticas habituales de los agricultores de porotos verde de la zona. Se utilizó riego localizado mediante cintas de goteo, con emisores cada 0,2 m, lo que equivale a una precipitación de 5,5 L/hora metro. El suelo de los ensayos corresponde a la serie Quebrada de Martínez y se caracteriza por ser miembro de la Familia franca esqueletal, mixta, térmica Duric Torriorthent (Entisol) el cual es un piedmont, delgado, de textura superficial franco arenosa y color pardo oscuro, con textura arcillosa y color rojo débil en matriz 2.5 YR en profundidad (CIREN, 2005).



Figura 103. Ubicación parcela hortícola y vista general cultivo de poroto verde (Parcela Pan de Azúcar, Coquimbo).

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo, fueron determinados utilizando la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998). Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO, mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo, establecer el coeficiente de cultivo (Kc) como se muestra en la **Figura 104**.



Figura 104. Portal web de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO (agrisatwebgis.com).

El agrupamiento de los valores del índice NDVI en rangos, permitió identificar y diferenciar niveles de desarrollo del cultivo, tal como se observa en la **Figura 105**.

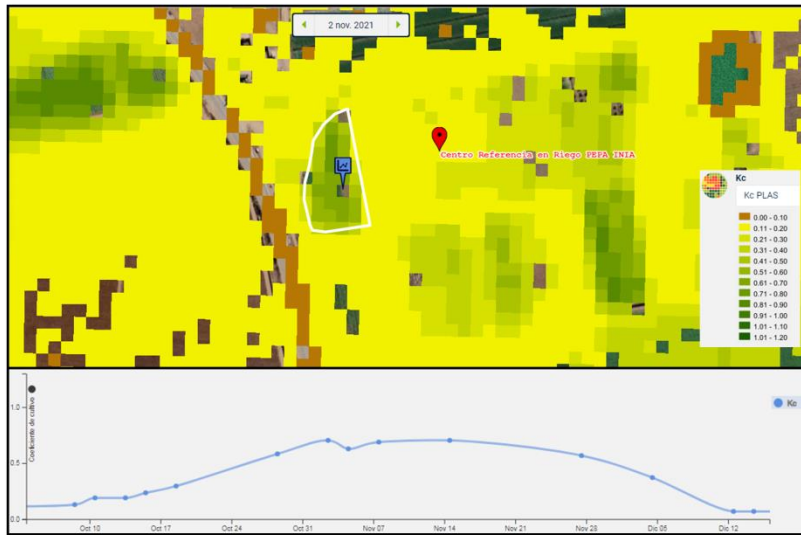


Figura 105. Coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) en poroto verde y su distribución espacial sobre la parcela experimental.

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir del parámetro evapotranspiración de referencia (ETo), la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en el predio y se encuentra disponible en el sitio web agrometeorologia.cl.

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, los instantes de riego y los volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con sondas de humedad marca Decagon modelo GS1 (enterradas a 10, 30 y 50 cm) y caudalímetros (**Figura 106**).



Figura 106. Instrumental de monitoreo de los partes de riego.

Resultados

En la **Figura 70**, se presenta el progreso del cultivo de poroto verde, obtenido a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI (disponible en la Plataforma PLAS Fontagro). Se puede observar que la cantidad de imágenes satelitales permite identificar

claramente las diferentes etapas de desarrollo del cultivo a lo largo de toda la temporada. Estos valores se utilizaron para establecer los coeficientes de cultivo basal (K_{cb}), los cuales se emplean semanalmente para determinar las necesidades de riego del cultivo.

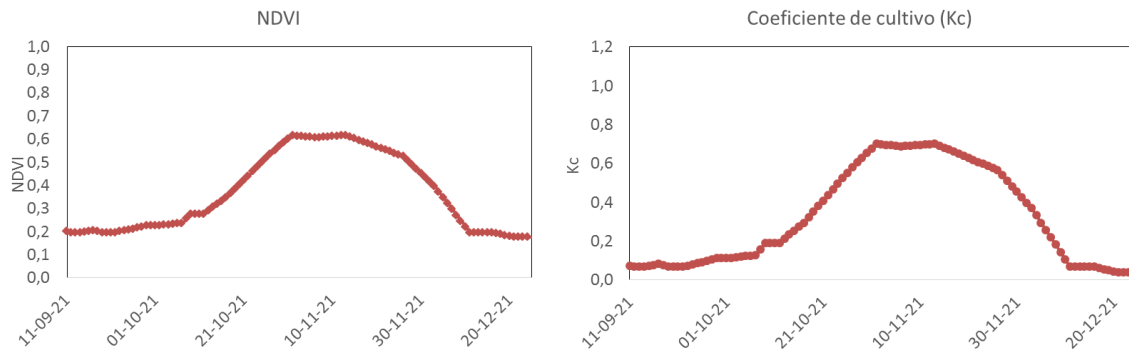


Figura 107. Curva de desarrollo del cultivo de poroto verde descrita a partir del índice de vegetación satelital NDVI y valores de los coeficientes de cultivo basal (K_c) estimado.

Manejo del riego

Durante el periodo del cultivo, el coeficiente de cultivo basal (K_c) alcanzó valores máximos de 0,75 mientras que la demanda ambiental (ETo) alcanzó en promedio 3,56 mm/día y acumulado de 373 mm. Los valores diarios son mostrados en la **Figura 108**.

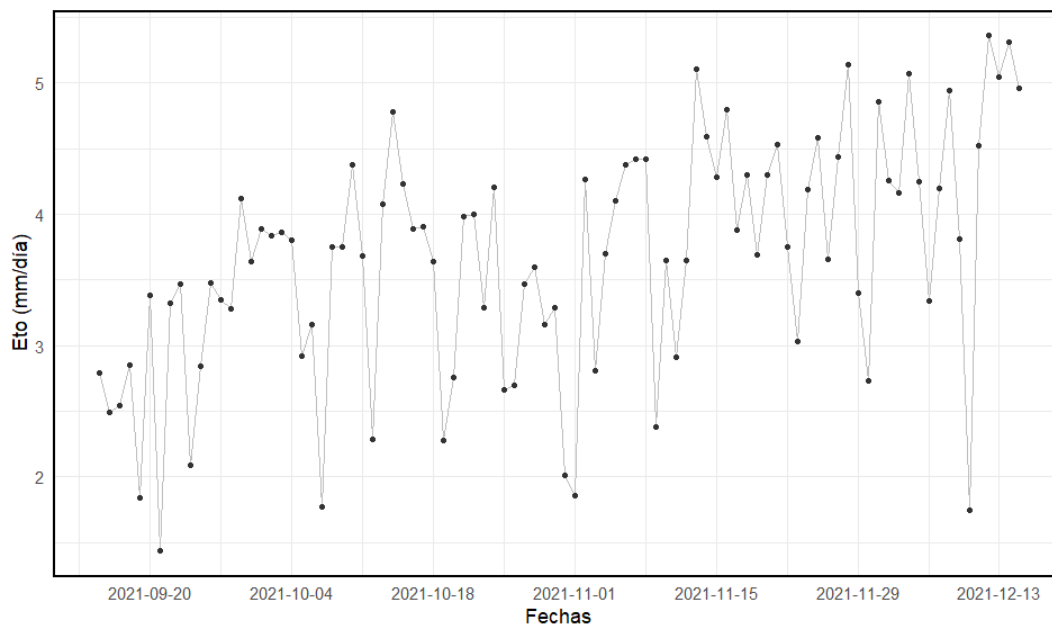


Figura 108. Evapotranspiración registrada en el sitio para el ciclo del cultivo.

El aporte de riego se efectuó en 24 oportunidades, considerando mayor duración post siembra, con el fin de asegurar la germinación y establecimiento del cultivo. El tiempo por riego varió entre 41 a 138 minutos por evento, obteniendo un volumen total de riego para la temporada de 2120 m³/ha (212 mm). En la **Tabla 41** se muestra un resumen del manejo del riego efectuado en la parcela.

Tabla 41. Antecedentes de riego aplicados en el ensayo.

Período cultivo (días)	Riegos (numero)	Tiempo riego (minutos)	Riego (m ³ /ha)
0 a 20	3	81	269
20 a 40	2	61	140
40 a 60	2	75	165
60 a 80	3	138	473
80 a 100	8	92	816
100 a 105	6	41	255
Total	24		2120

A partir del manejo del riego indicado, el contenido de humedad en el suelo permaneció entre 8% con niveles máximos de 11% de humedad, encontrándose en el rango de humedad aprovechable para este cultivo y tipo de suelo (**Figura 109**).

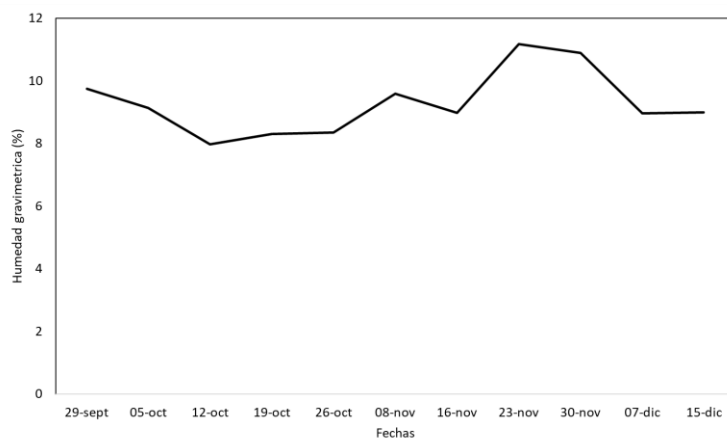


Figura 109. Registro continuo de la humedad gravimétrica (%) en el suelo de la parcela por medio de sondas.

Rendimiento

Los rendimientos alcanzados en la parcela fueron evaluados en cuatro sectores de manera de

recoger posibles diferencias debido a cambios en el desarrollo de las plantas. En este sentido no se encontraron diferencias entre los sectores cosechados. En la **Tabla 42** se presenta un resumen de los rendimientos alcanzados y la productividad del agua.

Tabla 42. *Parámetros productivos evaluados en cosecha.*

Sector	Producción	Riego por año	Productividad del agua
	(kg/ha)	(m ³ /ha)	(kg/m ³ agua)
Con tecnología	13.350	2.120	6.3
Sin tecnología	12.042	2.500	4.8

La **Tabla 42** muestra los resultados de producción y productividad del agua en dos escenarios: con y sin tecnología. La implementación de tecnología en el cultivo resultó en un aumento del 10,85%. Además, se logró una reducción del 20% en el riego, este menor consumo de agua, junto con el aumento de la producción, se tradujo en un incremento del 31% en la productividad del agua. Estos resultados resaltan el impacto positivo de la tecnología en la mejora de la eficiencia del uso del agua y el aumento de la producción.

Conclusiones

Para lograr altos niveles de eficiencia hídrica en el manejo del riego de los cultivos ante limitaciones en la disponibilidad de agua, es necesario emplear marcos conceptuales sólidos y tecnologías de fácil utilización. En este estudio se ha presentado el uso de una metodología estandarizada y validada para el riego de cultivos recomendada por la FAO en su Manual N°56, apoyada por información satelital, cuyos recursos necesarios para su implementación actualmente están disponibles de forma gratuita y accesible en línea. Se ha demostrado que los índices de vegetación satelitales permiten monitorear en el lugar el desarrollo de los cultivos y, al convertirse en coeficientes de cultivo, facilitan la estimación de las necesidades de riego y la obtención de altos niveles de productividad y rentabilidad económica. La principal ventaja de esta metodología radica en su sencillez de uso y en que refleja las condiciones específicas en las que se desarrolla el cultivo, en lugar de depender de tablas generalizadas para el manejo del riego.



Figura 110. Cultivo de porotos.



Piloto tecnológico en cultivo de maíz

La región de Coquimbo es una zona apta para el cultivo del maíz, debido a las buenas temperaturas en otoño, se cultivan de maíz aproximadamente 730 ha a nivel regional, representando el 7% de la superficie del país con este cultivo (INE, 2023). El rendimiento promedio varía entre 50.000 a 70.000 unidades de choclo por hectárea, dependiendo de la variedad, sistema de riego y manejo. Al igual que todos los cultivos en la región árida de Coquimbo, la producción de maíz requiere el aporte de riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de maíz puede permitir aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital con objeto de validar su uso en el cultivo de maíz.

Materiales

En la Parcela Experimental Pan de Azúcar perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA-Intihuasi (19 J, 30° 4'26.89"S 71°14'23.74"O) Coquimbo, durante los meses de enero a abril se cultivó una superficie de 0,7 ha de maíz dulce, variedad Dorado. La siembra se realizó el 25 de enero de 2024, en forma manual considerando una densidad de 53000 plantas por ha (0,75*0,2 m, entre y sobre hilera) (**Figura 111**)

El suelo de los ensayos corresponde a la serie Quebrada de Martínez y se caracteriza por ser miembro de la familia franca esquelética, mixta, térmica Duric Torriorthent (Entisol). Suelo piedmont, delgado, de textura superficial franco arenosa y color pardo oscuro; de textura arcillosa y color rojo débil en matriz 2.5 YR en profundidad (CIREN, 2005).

El clima tiene influencia marítima y la demanda atmosférica es de 950 mm/año. El desarrollo del cultivo ocurrió entre enero y abril (temporada 2024). La preparación del suelo, la siembra y establecimiento del cultivo fue similar a las prácticas habituales de los productores de maíz de la localidad. El aporte del riego fue localizado (goteo) por medio de cintas, con emisores cada 0,2 m de un caudal de 1 L/h, que corresponde a una precipitación de 5 L/h por metro lineal.

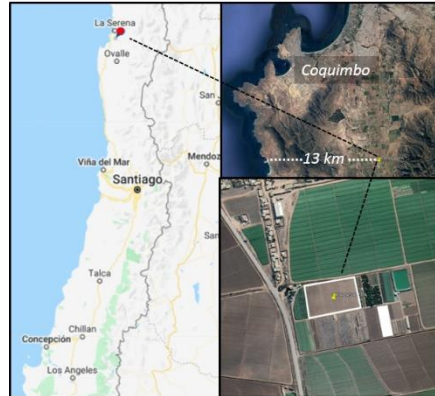


Figura 111. Ubicación parcela hortícola y vista general cultivo de maíz (Parcela Pan de Azúcar, Coquimbo).

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo, fueron determinados utilizando la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998).

Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO (agrisatwebgis.com), mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo, establecer el coeficiente de cultivo (Kcb) como se muestra en la **Figura 112**.



Figura 112. Portal web de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO (agrisatwebgis.com).

El agrupamiento de los valores del índice NDVI en rangos, permitió identificar y diferenciar niveles de desarrollo del cultivo, tal como se señala en la **Figura 113**.

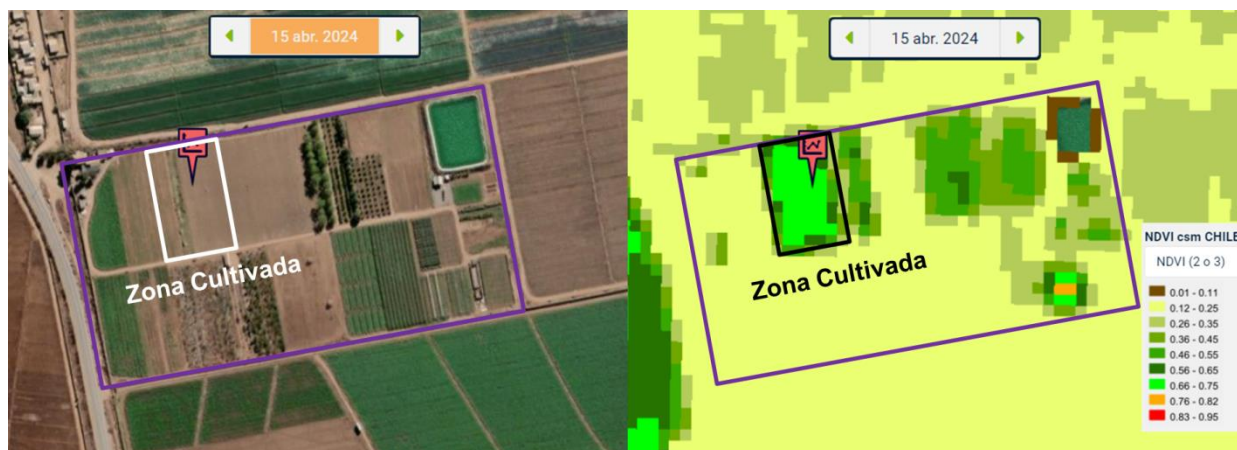


Figura 113. Imágenes del índice de vegetación en maíz y su distribución espacial sobre la parcela experimental.

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se calculó con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en el mismo predio y se encuentra disponible en el sitio web agrometeorologia.cl. Los valores diarios durante el ciclo del cultivo en la **Figura 114**.

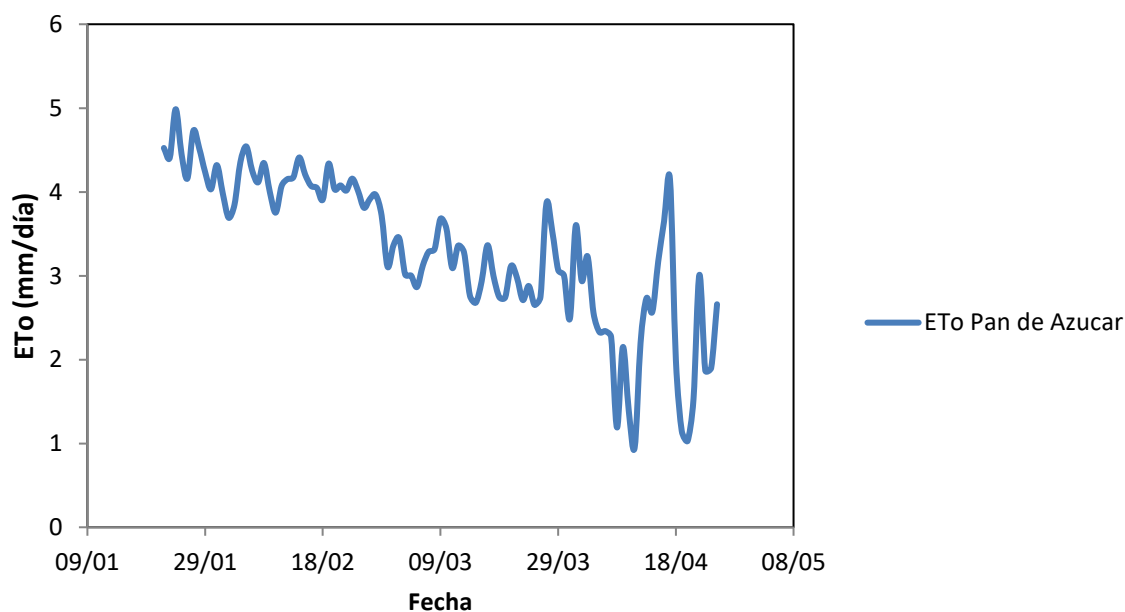


Figura 114. Evapotranspiración de referencia (ET_o) registrada en el sitio para el ciclo del cultivo.

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, los instantes de riego y los volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con sondas de humedad marca

Decagon modelo GS1 (enterradas a 10, 30 y 50 cm) y caudalímetros (**Figura 115**).



Figura 115. Instrumental de monitoreo de la gestión del riego.

Resultados

En la **Figura 116** se muestra el desarrollo del cultivo de maíz, obtenido a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI (disponible en la Plataforma PLAS Fontagro). Como se puede apreciar la cantidad de imágenes satelitales permite definir claramente las diferentes fases de desarrollo del cultivo durante toda la temporada de desarrollo del cultivo. A partir de estos datos se establecieron los valores del coeficiente de cultivo (Kc), utilizados para la determinación semanal de las necesidades de riego del cultivo.

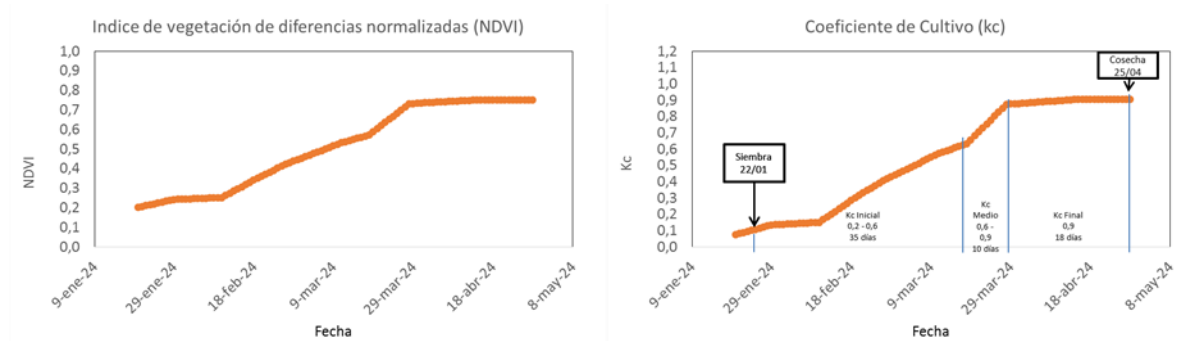


Figura 116. Evolución del desarrollo del cultivo de maíz descrita a partir del índice de vegetación satelital NDVI y valores del coeficiente de cultivo basal (Kc) estimado.

El monitoreo con información satelital permitió caracterizar la duración de los períodos de desarrollo del cultivo: establecimiento (Kc inicial 0,2), desarrollo (crecimiento vegetativo 0,2 – 0,6), crecimiento de la mazorca (Kc medio 0,6 – 0,9) y llenado de grano (Kc final 0,9). No solo se identificaron los estados de desarrollo del cultivo, sino que se estableció su magnitud (máximos) y duración de las etapas, lo que permitió a definición precisa de los volúmenes de riego y la oportunidad de aporte.

Manejo del riego

Durante el periodo del cultivo, el coeficiente de cultivo (K_c) alcanzó valores máximos de 0,9 mientras que la demanda ambiental (E_{To}) alcanzó en promedio 3,42 mm/día y acumulado de 306,7 mm. De este modo, el aporte de riego se efectuó en 32 oportunidades, considerando mayor duración post siembra, con el fin de asegurar la germinación y establecimiento del cultivo. El tiempo por riego varió entre 30 a 150 minutos por evento, obteniendo un volumen total de riego para la temporada y hectárea de 2.326 m³/ha (232 mm). En la **Tabla 43** se muestra un resumen del manejo del riego efectuado en la parcela.

Tabla 43. Antecedentes de riego aplicados en el ensayo.

Período cultivo (días)	Riegos (número)	Tiempo riego (minutos)	Riego (m ³ /ha)
1 a 30	7	30-120	425
31 a 60	12	60-140	839
60 a 90	13	60-150	1062
Total	32		2.326

A partir del manejo del riego indicado, el contenido de humedad en el suelo permaneció sobre el 15% de humedad, donde el punto de marchitez permanente es 12% para un suelo franco con una capacidad de campo del 36%, lo cual fue comprobado a partir de la información registrada con las sondas de humedad (

Figura 117).

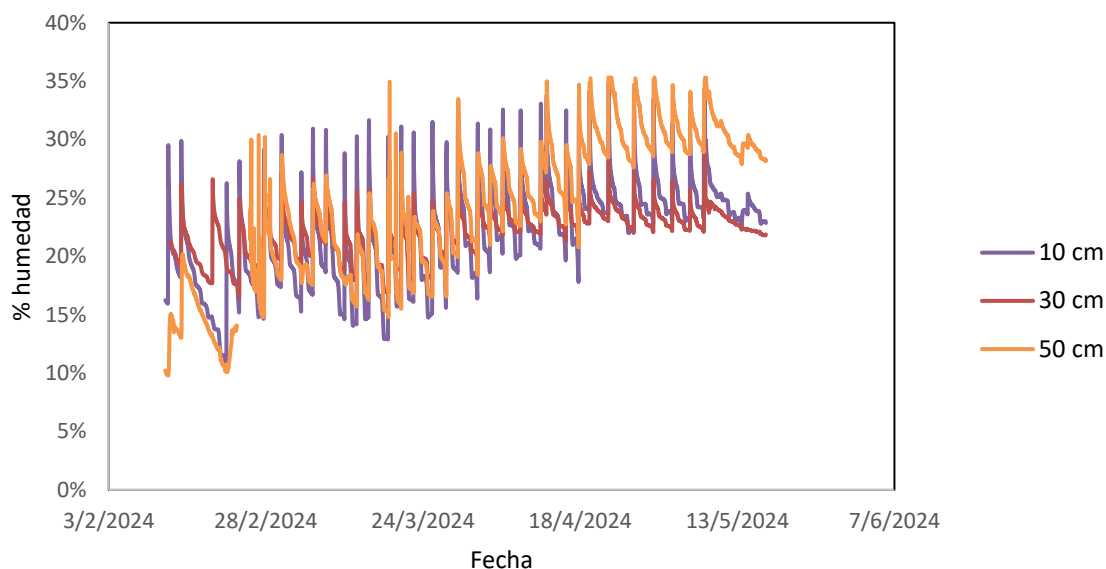


Figura 117. Registro continuo de la humedad volumétrica (v/v %) en el suelo de la parcela por medio de sondas de capacitancia a tres profundidades.

Rendimiento

El cultivo se desarrolló en 92 días, estando en el rango reportado para este tipo de maíz (85 a 95 días). Los rendimientos alcanzados en la **Tabla 44** parcela fueron evaluados en siete sectores (21 puntos de muestreo). En la se presenta algunas componentes del rendimiento. Se observa que la emergencia estuvo en el rango esperado (cinco plantas /meto lineal), y que además dos de estas cinco plantas produjo dos mazorcas comerciales. Las características de peso de mazorca y el largo dentro de lo reportado para la variedad (280 a 380 g y 18 a 20 cm)



Tabla 44. *Parámetros productivos evaluados en cosecha.*

Variable	Media	Min	Max
N° plantas/m lineal	5	3	6
N° mazorcas/m lineal	7	5	9
Peso con Chala (g/u)	285,3	197,6	380,4
Largo con Chala (cm)	24,5	19,4	36,0
Diámetro con Chala (mm)	51,3	40,2	58,0
Peso sin Chala (g/u)	220,7	153,2	292,8
Largo sin Chala (cm)	19,0	16,6	22,1
Diámetro sin Chala (mm)	46,3	38,6	52,8
N° mazorcas descarte (n°/m lineal)	2	1	4
Peso mazorcas descarte (g/u)	70,6	53,5	100,0

En la **Tabla 45** se presentan la productividad por hectárea de cultivo, expresada como la cantidad de biomasa producida, ya sea fresco o en materia seca. De la producción fresca, un 47% corresponde a las mazorcas producidas (47%), seguido de la parte aérea de la planta (32%) y las raíces (21%), porcentajes que varían en el caso de materia seca a 40%, 23% y 37% para las mismas partes de la planta.

Se estimó además la biomasa económicamente útil, que es la que corresponde a la que se comercializa (mazorcas comerciales), en este caso este indicador alcanza al 94% y 87% de la biomasa de las mazorcas, expresadas en materia verde y seca respectivamente. Valores que reafirman la calidad de la producción obtenida (solo se descarta el 6%)



Tabla 45. Parámetros productivos evaluados en cosecha.

Productividad		Media	Min	Max
Kg materia verde/ha	Mazorca	27.111	14.630	35.671
	Planta	18.590	11.332	25.869
	Raíz	12.600	6.597	18.820
	Total	58.301	40.804	78.071
	Biomasa económicamente útil	25.472	13.140	34.341
Kg materia seca/ha	Mazorca	7.188,8	4.666,3	10.085,5
	Planta	4.171,5	2.500,4	6.463,8
	Raíz	6.645,3	3.535,5	12.532,7
	Total	18.005,6	11.931,2	25.735,6
	Biomasa económicamente útil	5.803,7	3.797,3	8.412,5

La productividad del agua (**Tabla 46**) estimada señala que en promedio un m³ de agua de riego produce 25,1 kg de materia verde de maíz (planta, raíz y mazorca) o 7,7 kg de materia seca de este cultivo. Si este indicador se ajusta al producto comercializado (que es lo que involucra ingresos) los valores disminuyen a 11 y 2,5 kg de materia verde o seca.

Este indicador es importante ya que si se conoce el valor de comercialización se puede estimar el retorno por volumen de agua utilizada. En este caso, 11 kg de mazorca equivalen a 38 mazorcas, que se comercializaron entre 100 a 150 pesos chilenos/unidad en la región y época (\$3.800 a \$5300/m³ de agua).



Tabla 46. *Parámetros de productividad de agua de riego. Materia verde (Mv), Materia seca (MS).*

Productividad del Agua	Media	Min	Max
Kg MV total /m ³	25,1	17,6	33,6
Kg MV Eco./m ³	11,0	5,7	14,8
Kg MS Total /m ³	7,7	5,1	11,1
Kg MS Eco./m ³	2,5	1,6	3,6

Conclusiones

Alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica en el manejo del riego de los cultivos frente a escenarios de limitantes en la disponibilidad hídrica, requiere el uso de marcos conceptuales robustos y tecnologías de fácil uso. En este trabajo se ha expuesto el uso de una metodología estandarizada y validada para el riego de los cultivos sugerida por FAO en su Manual N°56, asistida con información satelital. Los insumos para su implementación hoy en día están disponibles de manera gratuita y de fácil acceso en internet. Se ha mostrado que los índices de vegetación satelitales permiten el monitoreo *in situ* del estado de desarrollo del cultivo y una vez convertidos en coeficiente de cultivo, permiten estimar las necesidades de riego del cultivo y alcanzar altos niveles productivos y rentabilidad económica. La mayor virtud de la metodología expuesta es su facilidad de uso y que representa las condiciones en las cuales se desarrolla el cultivo y no el uso de tablas generalistas para el manejo del riego.



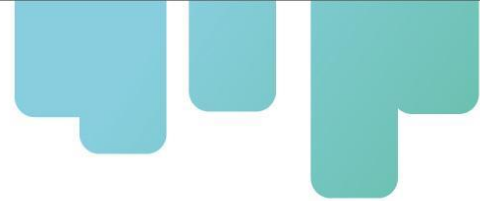
Figura 118. *Cultivo de maíz en pleno crecimiento vegetal.*



Figura 119. *Plantas de maíz entrando a la etapa de llenado de grano.*



Figura 120. Evaluación productiva del cuartel.



Piloto tecnológico en cultivo de uva de mesa

Introducción

En la región de Coquimbo el cultivo de uva de mesa tiene una gran importancia económica y por tanto social. Se estima que cuenta con una superficie aproximada de 6.000 ha y una producción de 13.000.000 cajas, lo cual representa un 18% de la producción del país (Odepa, 2020). El rendimiento promedio varía entre las 20 a 35 Ton/ha, dependiendo de la variedad y el manejo agronómico. Al igual que todos los cultivos desarrollados en regiones áridas, la producción de uva requiere el aporte de riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región de Coquimbo, es necesario realizar todas las acciones pertinentes para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar su productividad. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de uva de mesa puede permitir aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología descrita por FAO en su manual N°56 (Allen et al., 1998) con la innovación tecnológica de la asistencia con información satelital, con objeto de validar su uso en el cultivo de uva de mesa.

Materiales

Los trabajos se desarrollaron durante la temporada 2023-2024 en un cultivo de uva de mesa en la parcela experimental de INIA Intihuasi, ubicada en la localidad de Peralillo (30° 2.336'S, 70° 41.275'O), comuna de Vicuña. En este sitio, las condiciones de suelo y clima son representativas de los ambientes donde se desarrolla la producción de uva de mesa en esta parte de la región (**Figura 121**). El suelo del sitio es franco, profundo, sin presencia de sales ni limitantes para el desarrollo de las raíces. El clima es semiárido con alta demanda ambiental durante casi todo el año con excepción a invierno donde cuenta con baja pluviometría anual. La demanda ambiental es de 1379 mm/año. El parrón uva de mesa tenía 3 años de edad, de la variedad Allison, con marco de plantación 3 m x 2 m y una superficie de 2.5 ha. El aporte del riego se realizó por medio de un sistema de riego por goteo, compuesto por una línea de emisores de 4 Lt/hr, separados a 1 m. La precipitación del equipo es de 1,2 mm/hr y la frecuencia de aplicación fue diaria en el período de mayor demanda ambiental.



Figura 121. Ubicación parcela experimental en Centro Experimental INIA Vicuña, Coquimbo.

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo, fueron determinados utilizando la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998). Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO (agrisatwebgis.com), mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo, establecer el coeficiente de cultivo basal (Kcb) como se muestra en la **Figura 122**.



Figura 122. Portal web de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO (agrisatwebgis.com).

El agrupamiento de los valores del índice NDVI en rangos, permitió identificar y diferenciar niveles de desarrollo del cultivo, tal como se señala en la **Figura 123**.

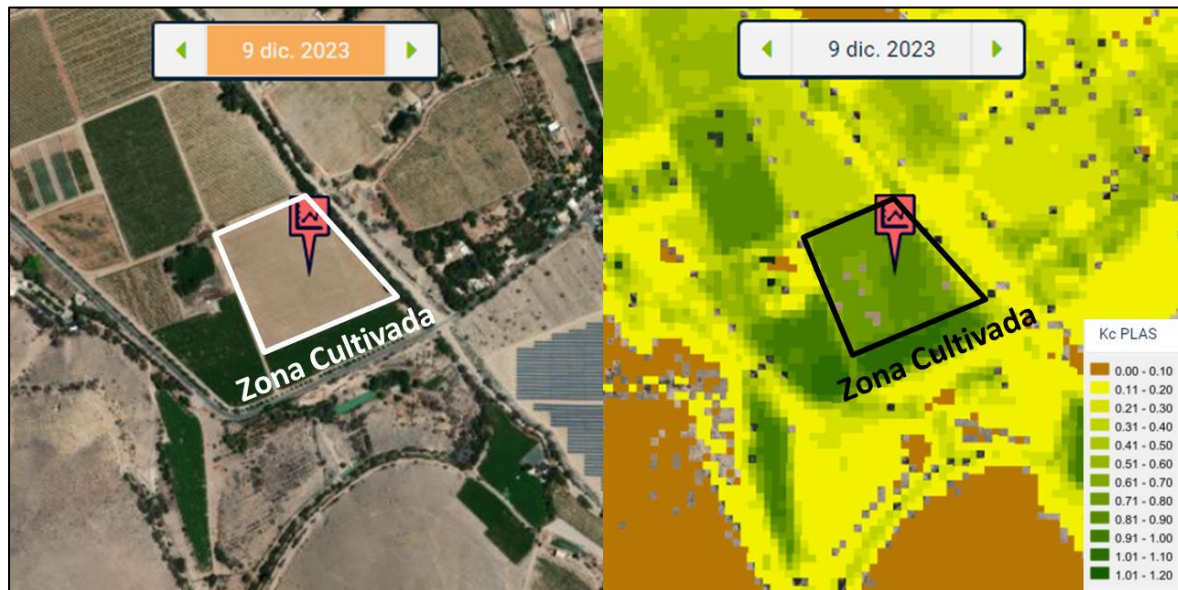


Figura 123. *Imágenes del índice de vegetación en uva de mesa y su distribución espacial sobre la parcela experimental.*

Por su parte, la demanda ambiental en el sitio experimental fue estimada a partir del parámetro evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en el Centro Experimental Vicuña cercana a menos de 1 km del sector ubicada dentro del predio y se encuentra disponible en el sitio web agrometeorologia.cl.

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, los instantes de riego y los volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con un sistema de registro (datalogger mod. Zentra) conectado con sondas de humedad (mod. Teros11), enterradas a 10 cm, 30 cm y 50 cm de profundidad y caudalímetros (**Figura 124**).



Figura 124. Instrumental de registro y monitoreo del aporte de riego.

Resultados

En la **Figura 125** se muestra el desarrollo del cultivo de uva de mesa obtenido a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI (disponible en la Plataforma PLAS Fontagro). Durante la temporada 2023 - 2024, el coeficiente de cultivo (K_{cb}) alcanzó valores máximos de 0,8. Como se puede apreciar la cantidad de imágenes satelitales permite definir claramente las diferentes fases de desarrollo del cultivo durante toda la temporada de desarrollo del cultivo.

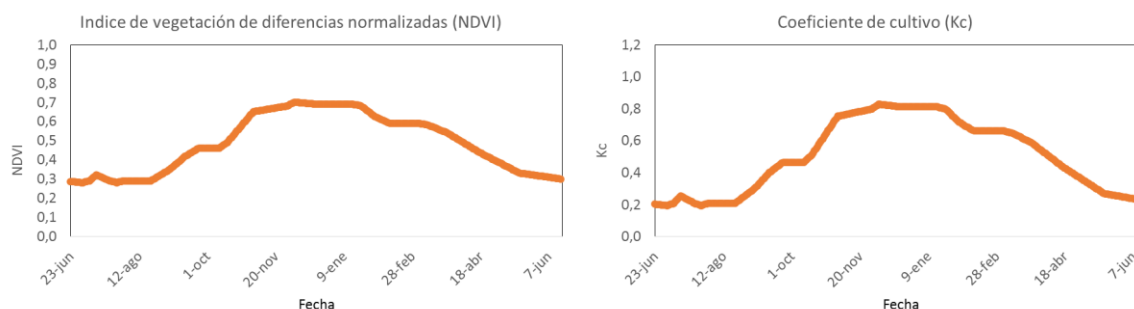


Figura 125. Curva de desarrollo del cultivo de uva de mesa descrita a partir del índice de vegetación satelital NDVI y valores de los coeficientes de cultivo (K_c) estimado.

De este modo, el monitoreo con información satelital permitió caracterizar la duración de los periodos de desarrollo del cultivo y establecer su magnitud (valores máximos) y duración de las etapas, lo que mejoró la definición precisa de los volúmenes de riego y la oportunidad de los aportes de riego.

Manejo del riego

La demanda ambiental (ET₀) durante el periodo analizado alcanzó un acumulado de 1.379 mm y en promedio 3,75 mm/día. Los valores diarios durante la temporada 2023-24 se muestran en la **Figura 126**.

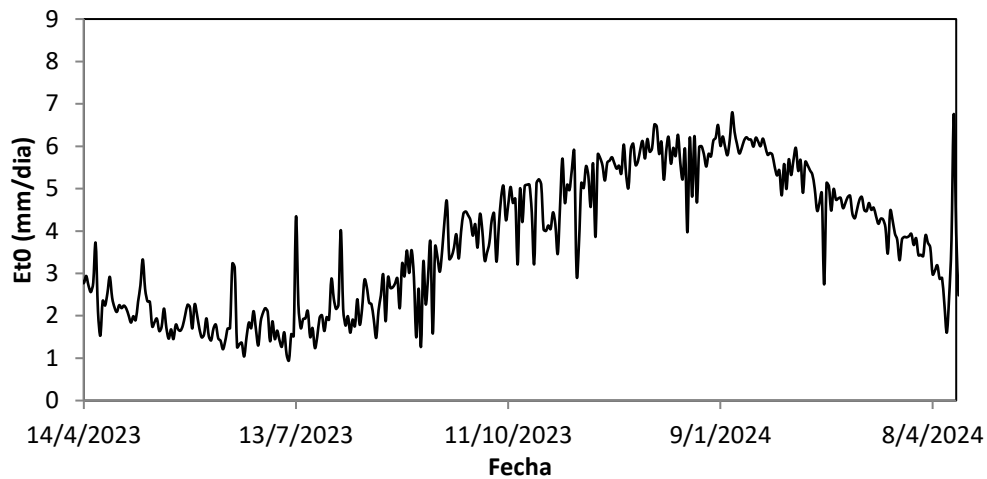


Figura 126. Evapotranspiración de referencia registrada durante la temporada en el sitio experimental.

A partir de esta información y el coeficiente de cultivo estimado con información satelital, el aporte de riego se realizó en 94 oportunidades, considerando el mayor tiempo de riego en la época de mayor demanda del cultivo, con el fin de asegurar el correcto desarrollo de la fruta. El tiempo de riego total fue de 32.940 minutos en la temporada (549 horas), obteniendo un volumen total de riego para la temporada de 8.060 m³/ha (806 mm). En la **Tabla 47** se muestra un resumen del manejo del riego efectuado en la parcela durante la temporada analizada.

Tabla 47. Antecedentes de riego aplicados en el ensayo.

Período cultivo (Mes)	Tiempo riego (minutos)	Riego (m3/ha)
Agosto 2023	660	450
Septiembre 2023	1.620	500
Octubre 2023	3.900	1130
Noviembre 2023	5.280	1550
Diciembre 2023	8.100	1760
Enero 2024	6.480	960
Febrero 2024	3.660	740
Marzo 2024	2.580	520
Abril 2024	660	450
Total	32.940	8.060

A partir del manejo del riego indicado, el contenido de humedad en el suelo permaneció sobre el 12% de humedad y teniendo valores máximos de 30%, lo cual fue comprobado a partir de la información registrada con las sondas de humedad (**Figura 127**).

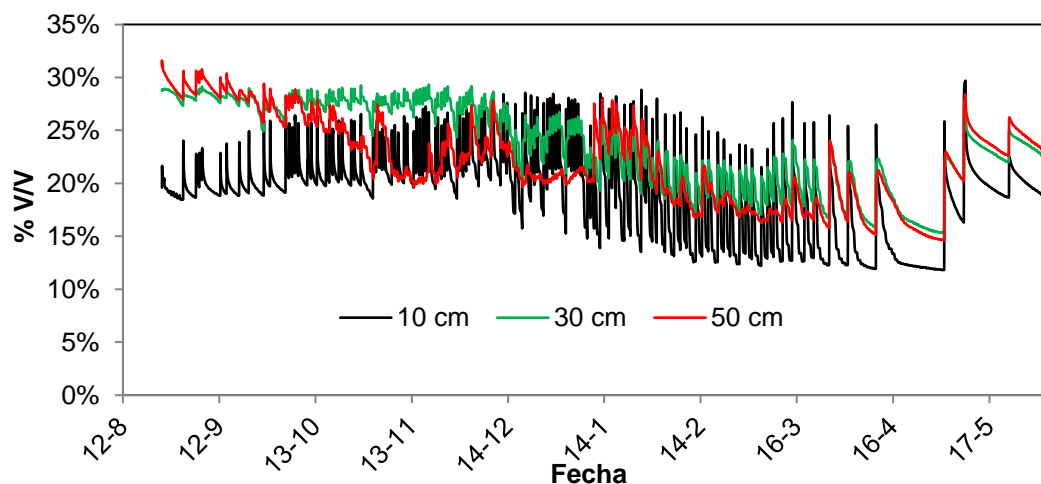


Figura 127. Registro continuo de la humedad volumétrico (v/v) en el suelo de la parcela por medio de sondas.



Rendimiento

En la **Tabla 48** se presenta algunas componentes del rendimiento. Como se observa, la producción alcanzó 24 Ton/ha para el sector regado con la plataforma PLAS, con un porcentaje de comercialización del 82%, logrando una producción económicamente útil de 20.3 Ton/ha.

Tabla 48. Resultados producción y productividad del agua en los dos sectores analizados.

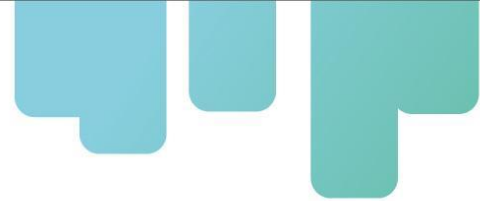
Sector	Producción (Kg / ha)	Descarte (Kg/ha)	Comercialización (%)	Producción económicamente útil (Kg/ha)	Productividad agua (Kg/m3)
M4	24.080	3.691	82%	20.388	2.4

La productividad del agua estimada señala que para el sector regado con la plataforma PLAS un m3 de agua de riego produce 2.8 kg de fruta comercializable.

Este indicador es importante ya que si se conoce el valor de comercialización se puede estimar el retorno por volumen de agua utilizada. En este caso, el kg de fruta para esta variedad de uva esta promediado a 1500 pesos/kg. en la región para el año 2023, dando un resultado de \$3.600/m3 para el campo evaluado.

Conclusiones

Alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica en el manejo del riego de los cultivos frente a escenarios de limitantes en la disponibilidad hídrica, requiere el uso de marcos conceptuales robustos y tecnologías de fácil uso. En este trabajo se ha expuesto la validación del uso de la metodología sugerida por FAO en su Manual N°56 para el riego de los cultivos, con la innovación del uso de la información satelital como fuente de información del coeficiente de cultivo. Se ha demostrado que los índices de vegetación satelitales permiten el monitoreo in situ del estado de desarrollo del cultivo y una vez convertidos en coeficiente de cultivo, permiten estimar las necesidades de riego del cultivo y alcanzar altos niveles productivos y rentabilidad económica. La mayor virtud de la metodología expuesta es que su fácil implementación ya que los insumos necesarios están hoy en día disponibles de manera abierta, gratuita y que representan las condiciones en las cuales se desarrolla el cultivo, por lo que no requiere el uso de tablas generalistas para el manejo del riego.



Piloto tecnológico en cultivo de mandarinas

El clima en la región de Coquimbo determina que sea una de las mejores zonas para el cultivo de mandarinas en Chile. La distribución de temperaturas anuales permite ajustar las producciones para el fin del otoño o pleno invierno. En la región se cultivan aproximadamente 7.550 ha de cítricos, representando 30% de la producción nacional, lo que le confiere importancia con respecto a la producción nacional (Comité Cítrico, 2023). El rendimiento promedio varía entre 30 – 65 ton/ha, dependiendo de la variedad, sistema de riego y manejo. Al igual que todos los cultivos en la región árida de Coquimbo, la producción de mandarinas requiere el aporte de riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Considerando la creciente disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de mandarinos puede permitir aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos agua y fertilizantes. En este trabajo se aplica la metodología FAO 56 con la innovación del uso de información satelital, con objeto de validar su uso en el cultivo de mandarinos.

Materiales

Los trabajos se desarrollaron en la temporada 2023-2024, en una parcela comercial ubicada en la localidad de El Palqui (30° 45.610'S, 70° 59.709'O), comuna de Monte patria, representativa de las condiciones de suelo y clima en las que se desarrolla la producción de mandarinas en esta parte de la región de Coquimbo (**Figura 128**). El suelo del sitio es franco-arcilloso, profundo, sin presencia de sales ni limitantes para el desarrollo de las raíces. El clima es semiárido con baja pluviometría anual (principalmente en invierno) y la demanda ambiental de 1209 mm/año, aproximadamente. El trabajo se realizó en una parcela de mandarinos (*Citrus x clementina*) var. Orogrande, de 7 años de edad, injertados sobre C-35, con marco de plantación 2 m x 5 m, en una superficie de 2,1 ha. El aporte del riego se realiza por medio de un sistema de riego por goteo, compuesto por dos líneas con emisores distanciados 1 metro.



Figura 128. Ubicación de la parcela San Clemente y vista general cultivo de mandarinas (Parcela San Clemente, El Palqui, Monte Patria).

Definición necesidades de riego

Las necesidades de riego y su aporte al cultivo, fueron determinados utilizando la metodología “coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia” definida por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998). Para esto, se utilizó la plataforma PLAS FONTAGRO, mediante la cual es posible realizar un monitoreo del desarrollo temporal del cultivo y establecer el coeficiente de cultivo basal (Kcb), tal como se muestra en la **Figura 129**.



Figura 129. Portal web de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO.

El agrupamiento de los valores del índice NDVI en rangos, permitió identificar y diferenciar niveles de desarrollo del cultivo, tal como se señala en la **Figura 130**.

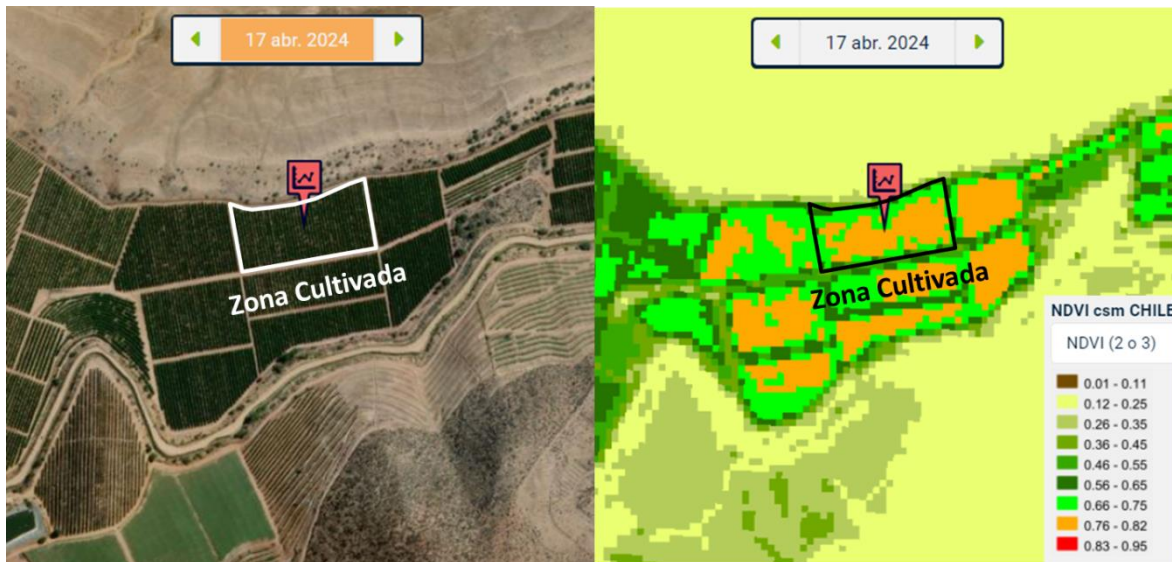


Figura 130. Imágenes del índice de vegetación en mandarina y su distribución espacial sobre la parcela experimental.

Por su parte, la demanda ambiental fue estimada a partir del parámetro evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se obtuvo con los registros de una estación agrometeorológica automática ubicada en El Palqui, ubicada a menos de 10 km del predio y que se encuentra disponible en el sitio web agrometeorologia.cl.

Finalmente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo, los instantes de riego y los volúmenes de riego aportados al cultivo, fueron monitoreados con sondas de humedad (Zentra mod. GS1 y Teros11), enterradas a 30 y 70 cm y pluviómetros y caudalímetros (**Figura 131**).



Figura 131. Instrumental de monitoreo de las partes de riego.

Resultados

En la **Figura 132** se muestra el desarrollo del cultivo de mandarinas, obtenido a partir de la serie temporal de valores del índice de vegetación satelital NDVI (disponible en la Plataforma PLAS Fontagro). Como se puede apreciar la cantidad de imágenes satelitales permite definir claramente las diferentes fases de desarrollo del cultivo durante toda la temporada de desarrollo del cultivo. A partir de estos valores se establecieron los valores del coeficiente de cultivo (K_c), utilizados para la determinación semanal de las necesidades de riego del cultivo.

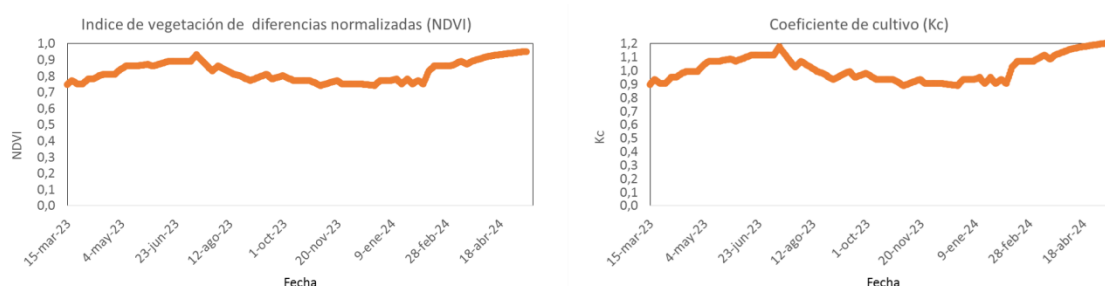


Figura 132. Curva de desarrollo anual del cultivo de mandarinas descrita a partir del índice de vegetación satelital NDVI y los valores del coeficiente de cultivo (K_c) correspondientes.

El monitoreo con información satelital permitió caracterizar la duración de los periodos de desarrollo del cultivo: No solo se identificaron los estados de desarrollo del cultivo, sino que se estableció su magnitud (máximos) y duración de las etapas, lo que mejoró la definición precisa de los volúmenes de riego y la oportunidad de aporte.

Manejo del riego

Durante la temporada 2023 - 2024, el coeficiente de cultivo (K_c) alcanzó valores máximos de 1,1

mientras que la demanda ambiental (ETo) alcanzó en promedio 3,29 mm/día y acumulado de 1.208,7 mm.

Los valores de ETo durante la temporada 2023-24 se muestran en la **Figura 132**.

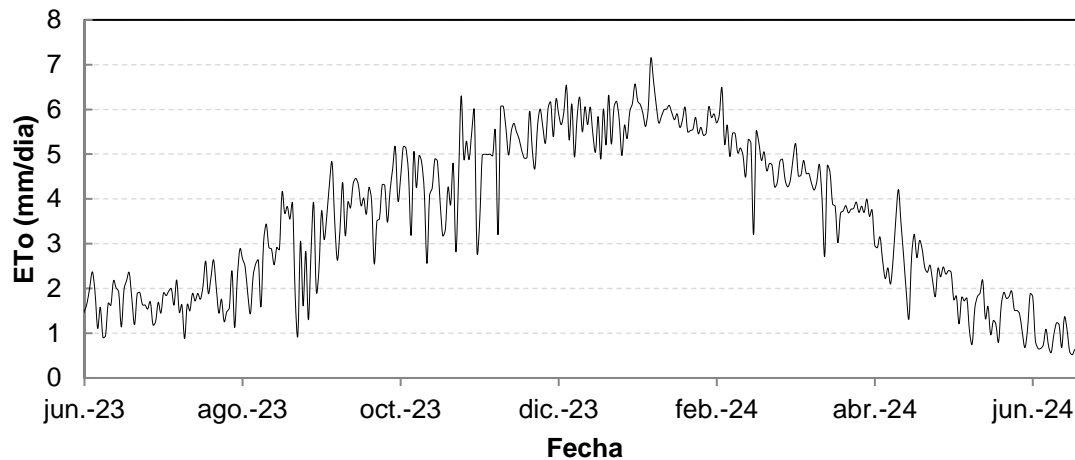


Figura 133. *Evolución anual de la evapotranspiración de referencia (ETo) utilizado en la determinación de la demanda ambiental el sitio piloto.*

De este modo, el aporte de riego se efectuó en 94 oportunidades, considerando el mayor tiempo de riego en la época de mayor demanda del cultivo, con el fin de asegurar el correcto desarrollo de la fruta. El tiempo por riego varió entre 60 a 480 minutos por evento, obteniendo un volumen total de riego para la temporada de 8.327 m³/ha (832 mm). En la **Tabla 49** se muestra un resumen del manejo del riego efectuado en la parcela.

Tabla 49. *Antecedentes de riego aportados en el ensayo.*

Período cultivo	Riegos	Tiempo riego	Riego
Agosto 2023	2	150-420	174
Septiembre 2023	10	60-360	791
Octubre 2023	10	60-450	837
Noviembre 2023	12	30-450	1.104
Diciembre 2023	11	180-480	1.232
Enero 2024	18	180-330	1.392
Febrero 2024	11	240-390	1.070
Marzo 2023	10	210-420	1.015
Abril 2023	8	180-330	662
Mayo 2023	2	270-300	174
Total	94	27.120	8.327

A partir del manejo del riego indicado, el contenido de humedad en el suelo permaneció sobre el 17% de humedad y teniendo valores máximos de 42%, lo cual fue comprobado a partir de la información registrada con las sondas de humedad (**Figura 134**).

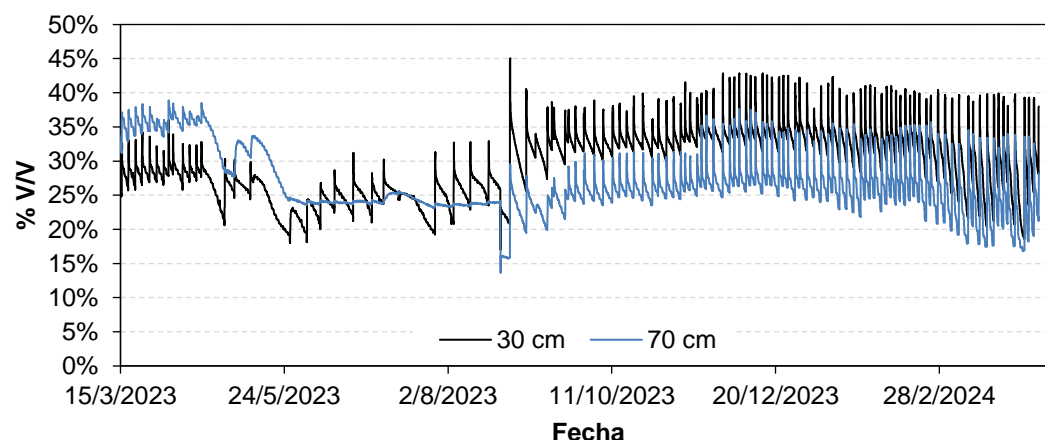


Figura 134. Registro continuo de la humedad volumétrico (v/v) en el suelo de la parcela San Clemente.

Rendimiento

El análisis del cultivo se realizó durante agosto 2023 a mayo del 2024, estando en el rango reportado de 304 días. En la **Tabla 50** se presenta algunas componentes del rendimiento. Se observa que la producción alcanzo un rango promediado de 68 Ton para el sector regado con la plataforma PLAS comparado a la producción con riego normal del campo que llego a las 46 Ton de fruta con un porcentaje de comercialización del 80%.

Tabla 50. Resultados producción y productividad del agua en los dos sectores analizados.

Sector	Producción (Kg/planta)	Producción (Kg/ha)	Comercialización (%)	Producción económicamente útil (Kg/ha)	Productividad del agua (Kg/m ³)
PLAS	68,3	68.312	80%	54.650	6,7
Campo	46,5	46.515	80%	37.212	4,5

De este modo, la productividad del agua estimada para el sector regado con la plataforma satelital fue de 6,7 kg de fruta por metro cúbico de agua aportada, mientras que en el campo sin tecnologías en promedio fue 4,5 kg de fruta por metro cúbico de agua.

Este indicador es importante ya que si se conoce el valor de comercialización se puede estimar el retorno por volumen de agua utilizada. De este modo, considerando que el precio para el año

2023 fue en promedio \$644 pesos/kg, da como resultado un retorno de \$4.318 por metro cúbico de agua para el sector con riego PLAS y \$2.898/m³ para la producción con riego tradicional del campo.

Conclusiones

Alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica en el manejo del riego de los cultivos frente a escenarios de limitantes en la disponibilidad hídrica, requiere el uso de marcos conceptuales robustos y tecnologías de fácil uso. En este trabajo se ha expuesto el uso de una metodología estandarizada y validada para el riego de los cultivos sugerida por FAO en su Manual N°56, asistida con información satelital. Los insumos para su implementación hoy en día están disponibles de manera gratuita y de fácil acceso en internet. Se ha mostrado que los índices de vegetación satelitales permiten el monitoreo in situ del estado de desarrollo del cultivo y una vez convertidos en coeficiente de cultivo, permiten estimar las necesidades de riego del cultivo y alcanzar altos niveles productivos y rentabilidad económica. La mayor virtud de la metodología expuesta es su facilidad de uso y que representa las condiciones en las cuales se desarrolla el cultivo y no el uso de tablas generalistas para el manejo del riego.



Figura 135. Fundo San Clemente cuartel del ensayo en etapa de cuaja.



Figura 136. Fruta presente en los árboles pre enero.



Figura 137. Medición calibre pre envero.



Piloto tecnológico en cultivo de alfalfa

En los últimos años en la región de Coquimbo, se ha observado un proceso creciente del deterioro de la pradera natural en las áreas de secano, donde la productividad de la pradera es baja o muy baja y, si bien tiende a aumentar de norte a sur de la región de Coquimbo, la proyección indica que estos valores disminuirán en el tiempo, existiendo menor disponibilidad de forraje para el ganado, sin embargo, existen zonas con distinta disponibilidad de agua que pueden ser utilizadas con mayor o menor intensidad y que con un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, permitiría establecer sistemas productivos viables y más amigables con el medio ambiente.

En general, los sistemas productivos caprinos en la Región de Coquimbo muestran un exceso de carga animal, con un manejo deficiente de los pastizales naturales, escasas alternativas forrajeras que permitan -en el corto plazo. En este sentido poder implementar tecnologías que permitan hacer un uso más eficiente del recurso hídrico constituye una alternativa para este sector de la población rural

OBJETIVO

Evaluar y contrastar la eficiencia hídrica de un sistema de riego por goteo subterráneo en dos cultivos de alfalfa establecido en la zona semiárida de Chile

En forma específica se pretende:

Caracterizar el cremento y productividad del cultivo por tratamiento

Evaluar en consumo de agua por tratamiento

Evaluar y comparar la eficiencia hídrica por tratamiento

METODOLOGÍA.

El ensayo se lleva a cabo en la parcela Experimental Pan de Azúcar perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA-Intihuasi (19° J 30° 4'26.89"S 71°14'23.74"O) Coquimbo (**Figura 138**).

El suelo corresponde a la serie Quebrada de Martínez y se caracteriza por ser miembro de la Familia franca esquelética, mixta, térmica Duric Torriorthent (Entisol). Suelo piedmont, delgado. De textura superficial francoarenosa y color pardo oscuro; de textura arcillosa y color rojo débil en matriz 2.5 YR en profundidad. (CIREN 2005).



Figura 138. Ubicación ensayo.

Material vegetal.

Se utilizarán dos variedades de semillas, una comercial de dormancia intermedia (Baldrich 650) y una línea de semilla avanzada del programa de mejoramiento genético de alfalfa de INIA.

Tratamientos.

El experimento considera 10 tratamientos (resultantes de la combinación tipos de emisores (5), variedades de alfalfa (2) y 2 repeticiones. El arreglo de los tratamientos a nivel de campo corresponderá a parcelas divididas donde la parcela principal es el sistema de riego y la subparcela la variedad de alfalfa.

Los tratamientos considerados son los siguientes (**Tabla 51**):



Tabla 51. Identificación y descripción de los tratamientos.

Sistema de riego	Emisor	Variedad de alfalfa	Tratamiento
Superficial	Aspersor de caño	Baldrich 650	T1
		INIA PMG	T2
Subterráneo	Naandamjain /Topdrip HD PC AS 2l/h	Baldrich 650	T3
		INIA PMG	T4
	Azud Premier PC AS 2l/h	Baldrich 650	T5
		INIA PMG	T6
	Olivos Boldo Pro HD PC AS 2l/h	Baldrich 650	T7
		INIA PMG	T8
	Azud Premier HD PC AS 2l/h	Baldrich 650	T9
		INIA PMG	T10

Determinación del riego a aplicar.

Para la definición de los volúmenes de riego aportados en forma semanal, se considerarán aspectos como las constantes hídricas del suelo, la demanda ambiental (evapotranspiración de referencia, ET_o) y factores agronómicos de los cultivos, estado fenológico, coeficientes de cultivo. La disponibilidad hídrica será monitoreada utilizando métodos volumétricos.

La definición del volumen de agua a reponer en forma semanal, se basará en el uso de Coeficientes de cultivo (K_c) o coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) obtenidos a través de PLAS y los valores de la demanda ambiental (evapotranspiración de referencia - ET_o), se estimarán las necesidades de riego de los cultivos, utilizando para ello, el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual Nº56 (Allen, Pereira, Raes & Smith., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde;

ETc: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

Kc: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Evaluaciones experimentales

Muestreo de suelo.

El suelo con el cual se realizará la experiencia corresponde a la serie Quebrada de Martínez y se caracteriza por ser miembro de la Familia franca esqueletal, mixta, térmica Duric Torriorthent (Entisol). Suelo piedmont, delgado. De textura superficial francoarenosa y color pardo oscuro; de textura arcillosa y color rojo débil en matriz 2.5 YR en profundidad. El sustrato corresponde a un duripán de constitución silícica, con gravilla y gravas y matriz arcillosa, con manchas de manganeso muy abundantes (CIREN 2005).

Caracterización del crecimiento del cultivo.

Porcentaje de cobertura a través de imágenes digitales. El desarrollo del cultivo se monitoreará adaptando lo indicado por Lozano et al (2018), quienes a través fotografías digitales estimaron el porcentaje de cobertura de los cultivos en el tiempo. Para ello se marcarán 20 puntos totales (2 por tratamiento), a los que mediante un teléfono celular ubicado a 1,5 m de altura se les tomarán fotografías en forma semanal. La imagen será recortada a 1 m², para posteriormente ser procesada utilizando la App Canopeo según lo descrito por Lollato, Patrignani, Ochsner, Locatelli, Tomlinson & Edwards, 2015 y así obtener el porcentaje de cobertura respectivo.

Registro del volumen de agua de riego utilizado por cultivo y época.

Para registrar la cantidad de agua de riego utilizada se recurrirá a:

Instalación de cinco contadores volumétrico (uno por tratamiento de riego), registrando la lectura inicial, semanal y final en cada temporada de cultivo. Por diferencia se obtendrá el valor de agua de riego utilizada expresada en mm o m³/ha.

Registro de la humedad de suelo por cultivo y época.

Para monitorear la humedad del suelo, una vez desarrollado el cultivo de alfalfa se utilizará:

Sensores de humedad volumétrica de suelo. Se instalarán cuatro sensores de humedad de suelo modelo GS1 conectados a dos registradores mod. EMb 50, Decagon Devices.

Humedad de suelo por gravimetría: Se tomarán en forma semanal, 20 muestra de suelo (2 por tratamiento)

Se siguen los siguientes pasos:

- Se extraen muestras de suelo a profundidad 0-20 m
- Se coloca la muestra en el tarro de aluminio, el cual previamente ha sido tarado vacío
- Se procede a pesar la muestra, la cual va a llamarse muestra con agua.
- Se coloca en estufa a 105 °C durante 24 horas (estufa de secado de convección forzada modelo h110f230 heat marca Elos).
- Se procede a pesar nuevamente, una vez enfriada en medio ambiente el tarro.

Registro de la productividad y calidad del cultivo.

Al momento de cosecha, se evaluará

Numero de plantas por 1 metro cuadrado En cada punto de muestreo (20), se contará el número de plantas

Producción en **los 20 puntos donde se monitoreas el crecimiento se realizará la cosecha del forraje producido por cada corte que se efectúe.**

Materia Seca. Se tomará una muestra (alfalfa y malezas si las hubiera) se estimará su porcentaje de materia seca (aérea). La metodología a utilizar se basa en lo descrito por Velásquez (2014), quien indica que se debe pesar una muestra en fresco (aérea y foliar), someterla a secado en estufa por 72 horas a una temperatura de 65°C y volver a pesar la muestra. Posteriormente aplicando la siguiente formula se obtiene el % de Materia Seca.

$$\%MS = ((\text{Peso Fresco} - \text{Peso Seco}) / (\text{Peso Fresco})) * 100$$

El secado de las muestras se realizará en una estufa de secado de convección forzada modelo h110f230 heat marca Elos.

De esta manera se obtendrá la productividad expresada como Kg materia seca /ha (Total, aérea y radicular).

Eficiencia productiva del agua de riego por cultivo y época.

Con los indicadores respecto de la productividad del cultivo y la cantidad de agua de riego utilizada durante el cultivo, se estimará la eficiencia productiva del agua de riego (EPA).

AVANCES

Instalación del sistema de riego

Preparación de suelo

Antes de instalar el sistema de riego, el suelo del ensayo se preparó, pasando un arado subsolador, arado de discos, rastrajes, labores en que el suelo fue despedrado, para asegurar un suelo mullido y sin pedregosidad que pueda dañar las líneas de riego enterradas. Las labores de reparación se realizaron entre enero y febrero del año 2024

Instalación de líneas de riego

Entre el mes de febrero e este año, se terminó de instalar la línea de riego subterráneo, quedando instalada a 20 cm de profundidad y un espacio entre laterales de 50 cm



Figura 139. *Instalación de línea de riego subterráneo.*

Siembra y cosecha

La siembra se llevó a cabo en el mes de septiembre por lo que no podrá ser evaluada. Sin embargo, lo importante de este cultivo es el sistema de riego instalado que queda como una experiencia por evaluar y un legado del proyecto.

Polito tecnológico Choapa; mejoras en sistema de riego de la parcela experimental INIA Choapa.

Durante el invierno del 2024 y para mejorar la eficiencia hídrica intrapredial en el Centro Experimental Choapa, perteneciente al INIA, ubicado en la localidad de Cuz-Cuz, Illapel, se realizaron diferentes arreglos para mejorar tanto la capacidad embalsada, así como la distribución y control de riego.

Para esto, y debido a que la carpeta que permitía dar permeabilidad al estanque de riego cumplió su funcionalidad (10 años), esta fue reemplazada, ya que la antigua solo permitía lograr una capacidad embalsada del 20%, siendo insuficiente para el requerimiento y la necesidad del huerto, especialmente durante los periodos 2020/21, donde la oferta hídrica fue escasa y la dotación del agua al predio era cada 15 días, situación que generó que la dotación de agua solo permitía cubrir el 30% de la demanda ambiental (ETc) para los frutales, estando constantemente las plantas bajo una situación de estrés.

Las obras que se realizaron en el estanque fueron el retiro la carpeta antigua, además, se refaccionaron los taludes y paredes del tranque, se eliminaron los sedimentos generados por la impermeabilidad de la carpeta anterior, además se profundizo un metro más el piso del tranque lo que permitió aumentar la capacidad embalsada, pasando de 500 m³ a 600 m³. Estas labores fueron necesarias para instalar la nueva carpeta y que una vez soldada la geomembrana, revisión de sus uniones, como de la fijación, se comenzaron a realizar las pruebas de llenado para verificar la presencia de fugas que pueden haber quedado. En las **Figura 140, Figura 141 y Figura 142**, se detallan la instalación de la carpeta y el inicio llenado, así como a capacidad completa de acumulación.





Figura 140. Proceso de instalación de la geomembrana en traque C.E. Choapa.



Figura 141. Inicio de llenado del estanque para revisión de fugas.



Figura 142. Embalse a plena capacidad (600 m³).

Las otras mejoras que se realizaron en el predio y que presentaban deficiencias en su operación fue la caseta de riego, debido a que la bomba de impulsión tenía una baja capacidad de trabajo, es decir de 110 l/minuto, lo que permitía el riego de solo 2 sectores al día, quedando siempre un sector sin riego, además no existía un contenedor y una bomba para para realizar la fertilización en forma adecuada, por lo que anteriormente se utilizaba la propia succión positiva para la inyección de los fertilizantes, situación que varias veces generó problemas en la bomba de riego al cavitarse, es decir, se corta el flujo de transporte de agua por burbujas de aire, trabajando la bomba en seco con las probabilidades de que esta se quemara, debido a que no hay un control exhaustivo para la inyección del fertilizante.

Para optimizar el riego en el huerto, en la caseta de control, se instalaron una nueva bomba de impulsión, con una capacidad de 170 l/minuto, lo que permite regar en forma diaria la totalidad de los sectores de riego del predio, un estanque de fertilización de capacidad de 500 l, una bomba de inyección de fertilizantes, sistemas de filtrado y control de presión, así como un tablero de control de riego, equipamiento que se detalla en la **Figura 143**.



Figura 143. Elementos instalados para el control del riego e inyección del fertilizante al huerto del C.E. Choapa de INIA en Illapel.

Estas mejoras realizadas en el Centro Experimental Choapa de INIA Intihuasi, permitirá la optimización de recurso hídrico y la seguridad para el riego de las 2,5 has plantadas de una superficie total de 10 has, de las cuales se encuentran Damascos con las variedades Katty, Castelbrite y tiltón, los nogales con las variedades Serr y Chandler, Almendros con las variedades

Non Pareil, Carmel y Price, Mandarinos, Olivos con variedades tanto para mesa y aceite, Pecanos, Ciruelos y la última plantación realizada este invierno del 2024 que fueron los cerezos con las variedades Brooks, Lapins, Glen red, Santina, especies frutales que permiten realizar transferencia de conocimientos tanto el manejo agronómico como el la determinación de la demanda hídrica y los balances hídricos a través del uso de la plataforma satelital Agrisat y el monitoreo de humedad de suelo con sondas de capacitancia, las que permiten determinar la frecuencia optima del riego de acuerdo a las condiciones ambientales. En la **Figura 144** se detalla la distribución del huerto.



Figura 144. Huerto del C.E. Choapa, INIA Illapel. 1 y 2 huertos de damascos, 3 nogales serr y pecanos, 4 olivos de mesa y aceiteros, 5 almendros, 6 nogales chandler a diferentes densidades de aplntación, 7 Cerezos, 8 Chanlder alta densidad, 9 Naranjos y mandarinos, 10 ciruelo Dágen y 11, huerto de nogal Serr.

4.2 CULTIVOS DE COLOMBIA

Piloto tecnológico en cultivo de lima Tahití en el C.I. Palmira

El experimento del Piloto Colombia (Figura 145) se ha instalado en un cultivo de lima ácida Tahití (*Citrus latifolia* Tanaka) injertado sobre Citrumello CPB 4475 (*Citrus paradisi* 'pomelo Duncan' x *Poncirus trifoliata*) y limón Volkameriano (*Citrus Volkameriana*). Está ubicado en el lote 31 (según nomenclatura interna), en las coordenadas (grados) 3.512796N, -76.312071W, centro de investigación Palmira de la Corporación colombiana de investigación agropecuaria – AGROSAVIA. En la **Tabla 52**. Ficha técnica cultivo C.I. Palmira. se relacionan las características del cultivo.

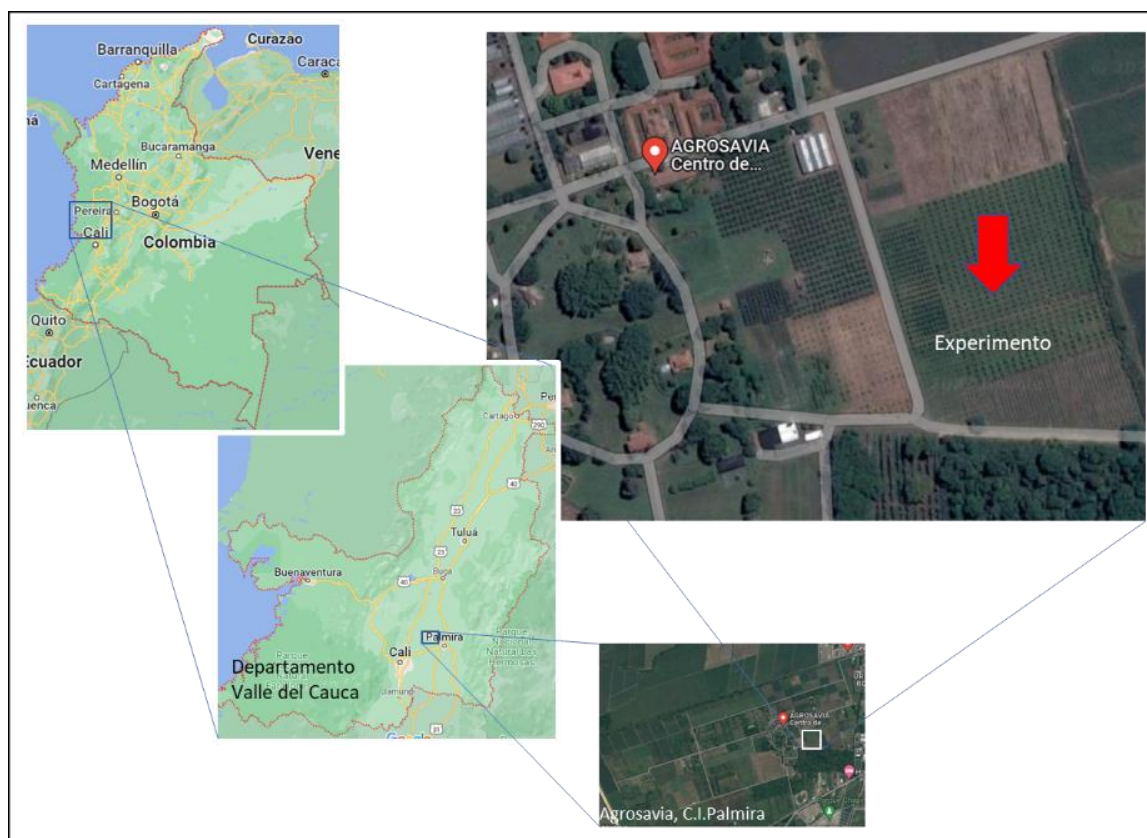


Figura 145. Ubicación parcela piloto en el C.I. Palmira – AGROSAVIA.

Tabla 52. Ficha técnica cultivo C.I. Palmira.

Variable	Dimensión
Fecha información	10enero2021
Municipio	Palmira
Vereda	C.I. Agrosavia
Finca	C.I. Agrosavia
Propietario	Agrosavia
No. Lote	39
Coordenadas	3.512796N, -76.312071W
Área	3150
No. Árboles	180
Distancia siembra	5mX3,5m
Copa	LimaAcidaTahiti
Patrón	CBP(50%), Volkameriano(50%)
Fecha de siembra	Mayo-julio, 2017
Edad cultivo	3,8 años
Tipo riego	Goteo
No. Emisores árbol	8
Q. emisor	4L*h ⁻¹
Frecuencia riego	1,5días
Período riego	1-1,5horas
Q.aplicado/riego/árbol	48 L*h ⁻¹
Rendimiento(t/árbol/año)	Volkameriano 22,8 CPB 20,6
Prof. Raíces	0,4m
Textura suelo	Arcilloso

El experimento está instalado en 4 parcelas, de 45 plantas cada una. La P1, refiere a los árboles de lima ácida Tahiti injertados sobre Citrumelo CPB, los cuales serán regados con el protocolo tradicional del cultivo, en consecuencia, P2, corresponde a la modificación en el riego dictado por el balance hídrico, sobre esta parcela se instalará un sensor tipo dendrómetro (DC-SE-100®, general purpose DC LVDT) para hacer seguimiento al desarrollo del fruto en uno de los árboles experimentales. La parcela P3, considera los árboles injertados sobre limón Volkameriana; con manejo de riego tradicional y P4, con riego bajo balance hídrico. Sobre los primeros 6 meses experimentales no se hará riego bajo balance hídrico, se continuará con el manejo tradicional en el cultivo, en las cuatro parcelas. Pasado el “Máximo” de la cosecha del mes de junio2021, se iniciará el riego experimental.

Suelo. El suelo en el cual se encuentra la parcela experimental del C.I. Palmira, corresponde a la Consociación Palmira (PLa), de acuerdo con el estudio nacional semidetallado de suelos de Colombia a escala 1:50.000 (Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del

Departamento del Valle del Cauca), ejecutado en el 2004, por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). La consociación PLa se localiza en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes formados al pie de la cordillera occidental. En general, presenta relieves de forma plana y amplitud muy larga. Los suelos se han desarrollado en aluviones mixtos; son bien drenados, muy profundos, neutros y de fertilidad alta. El uso actual es agricultura y el principal cultivo es la caña de azúcar. Los suelos presentan ligeras limitaciones para la agricultura dada la afección por sales y sodio en grado ligero. La unidad cartográfica en la que se ubica la parcela experimental corresponde a la familia Pachic Haplustolls; localizada en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3% y ligeramente inclinados con pendientes de 3 a 7%. Son suelos de moderada evolución pedogenética desarrollados en aluviones mixtos; muy profundos, bien drenados y de fertilidad alta. En la **Figura 146** se relaciona la ubicación de la parcela sobre la cartografía del estudio nacional de suelos (IGAC-CVC, 2004), información tomada del Geoportal de CVC (<https://geo.cvc.gov.co/mapas/suelos/16/>). Todos los detalles del tipo y análisis de suelo fueron informados en el producto 3 de descripción de los pilotos tecnológicos.



Figura 146. Ubicación de la parcela experimental en el Mapa de suelos (IGAC-CVC, 2004-2013).

Clima medio.

La zona de estudio se encuentra en el Valle geográfico del río Cauca, donde se presenta un régimen pluviométrico bimodal (**Figura 147**). La precipitación del primer semestre equivale al 60% del total del año. El máximo de precipitación se presenta en el mes de abril, el trimestre más húmedo se ubica en ellos meses marzo-abril-mayo. En el segundo semestre la mayor precipitación se ubica en los meses octubre-noviembre-diciembre. Las mayores necesidades de riego se presentan en los meses junio-julio-agosto-septiembre.

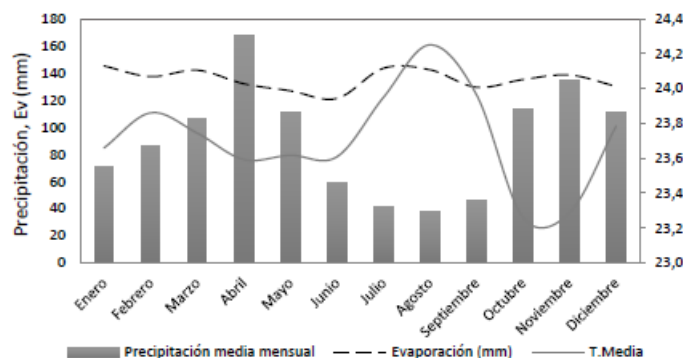


Figura 147. Balance hídrico histórico en C.I. Palmira – Agrosavia. Fuente información: Estación IDEAM- 26075010, Ubicada en Agrosavia, C.I. Palmira.

Solo en el mes de abril el balance hídrico atmosférico es positivo, el resto del año la evaporación supera la precipitación. Entendido que la temperatura afecta directamente la apertura estomática (Suárez & Fernández, 1984), en los meses enero, febrero, junio, julio, agosto y septiembre la productividad del cultivo se podría ver afectada si existiera un déficit hídrico en el cultivo; esto justifica el uso complementario de riego.

Sistema de riego.

El cultivo tiene un sistema de riego por goteo abastecido por una motobomba de 10 HP a gasolina (**Figura 148**), un filtro de anillos de 2" y un filtro hidrociclón (**Figura 149**). La red de distribución cuenta con una tubería PVC-RDE21 principal de 2" y laterales en tubería PVC-RDE21 de 1,5" que derivan a un sistema de emisión en anillo cerrado de 1m de diámetro (figura 9), en manguera de PE de 16mm con 8 goteros autocompensados de 4 L*h⁻¹, para un caudal total nominal de 32 L*h⁻¹*árbol-1, instalados cada 37,5 cm. En la figura 10 se detalla la instalación del anillo en cada árbol.



Figura 148. Estación de bombeo de cítricos. Foto: Marysol Cano.



Figura 149. Estación de filtrado y montaje de válvulas de módulo. Foto: Marysol Cano.

El sistema está dividido en cuatro módulos de riego, controlados por válvulas manuales. El Módulo1 controla el riego en los surcos 1 al 16, el modulo2 los surcos 17 al 30, el modulo3 los surco 31 al 40 y el módulo 4, los surcos 41 al 51. Se operan dos válvulas por cada evento de riego. Las válvulas de cada módulo se encuentran ubicadas en los surcos 10, 23, 35 y 45 respectivamente. El sistema es operado manualmente, con una frecuencia de 1,5 días y un período por módulo entre 1 a 1,5 horas, de acuerdo con la humedad del suelo.

Seguimiento a la humedad del suelo

La curva de retención de humedad del suelo del experimento en C.I. Palmira, mostró que la CC entre 25 y 30cm de profundidad, equivale a 41,9% y el PMP, 39,49%, para este suelo de textura Franco arcillosa. Haciendo un análisis desde la curva de drenaje o secado del suelo después de un riego (**Figura 150**) se observa que el drenaje es rápido, y se estabiliza alrededor de 22% de humedad, después de 11 horas del evento de riego y permanece alrededor de ese valor durante 6 horas (**Figura 151**), posteriormente se reinicia el descenso acelerado de la humedad, ya que inicia el consumo por ETO en horas diurnas. En la práctica, el valor de 22% se interpreta como capacidad de campo.



Figura 150. Humedad del suelo Vs desarrollo del fruto.

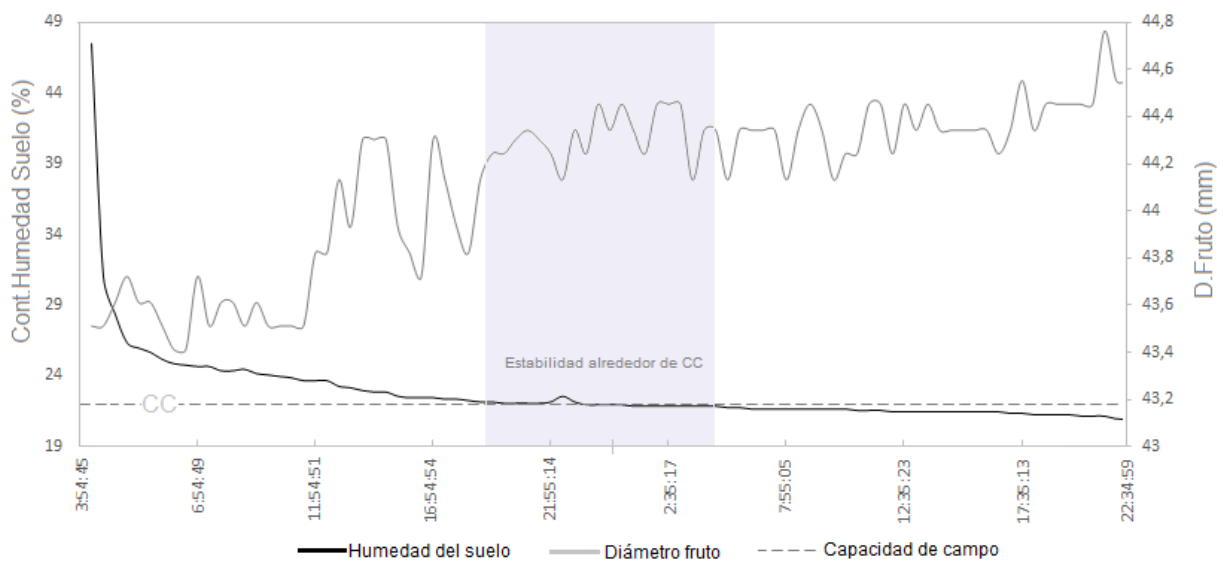


Figura 151. Humedad del suelo a capacidad de campo.

Respecto del agotamiento de la humedad del suelo, tiene un comportamiento lineal. El suelo

pierde humedad a razón de aproximadamente 2,0% diario (0,5% en periodo nocturno y 1,5% en el día). Considerando una capacidad de campo promedio de 22%, el agua aprovechable se agota en 4 días, llegando a un aproximado de 15%, valor muy cercano a PMP, es decir, para este suelo el criterio de agotamiento de la humedad para aplicar el riego sería menor que 30% (valor típico en manejo tecnificado del riego). Para el caso se recomendaría regar con una frecuencia de dos días, evitando así que la planta entre en déficit, ya que sólo se habrá consumido el 50% del agua aprovechable, esto equivale a regar con un agotamiento del 16% de la humedad a capacidad de campo, equivalente a su vez a que el suelo se encuentre en 18,5% de humedad.

Seguimiento al fruto de lima ácida Tahití C.I. Palmira

Dendrómetro. El equipamiento, dendrómetro + antena transmisora (**Figura 152**), para medición de la variación del tamaño del fruto fue instalado el día 26 de mayo 2021 en un fruto de lima ácida Tahití del experimento. Se consideró que el árbol monitorizado por el dendrómetro correspondiera a aquel que posee el seguimiento a la humedad del suelo, por un sensor de capacitancia. El dendrómetro será rotado en diferentes frutos del árbol. Asimismo, se harán mediciones con calibrador que apoyarán la repetición del proceso de crecimiento del fruto.



Figura 152. Dendrómetro y antena transmisora en cultivo de lima ácida Tahití. Foto: Mauricio Martínez

En la figura 17 se relaciona el desarrollo del fruto por un período de 23 días. En este período el fruto creció sólo 3,3mm, a razón de 0,14 mm*día⁻¹. Este es un crecimiento muy lento, sin embargo, es normal en el estado del fruto, ya que ha superado la fase de elongación, y se

encuentra en tamaño de cosecha (NTC4087, Icontec 1997), donde el fruto crece muy poco. Este fruto será cosechado y se iniciará seguimiento en otro fruto. El dendrómetro aún se encuentra en fase de calibración, ya que ha presentado fallas en su funcionamiento.

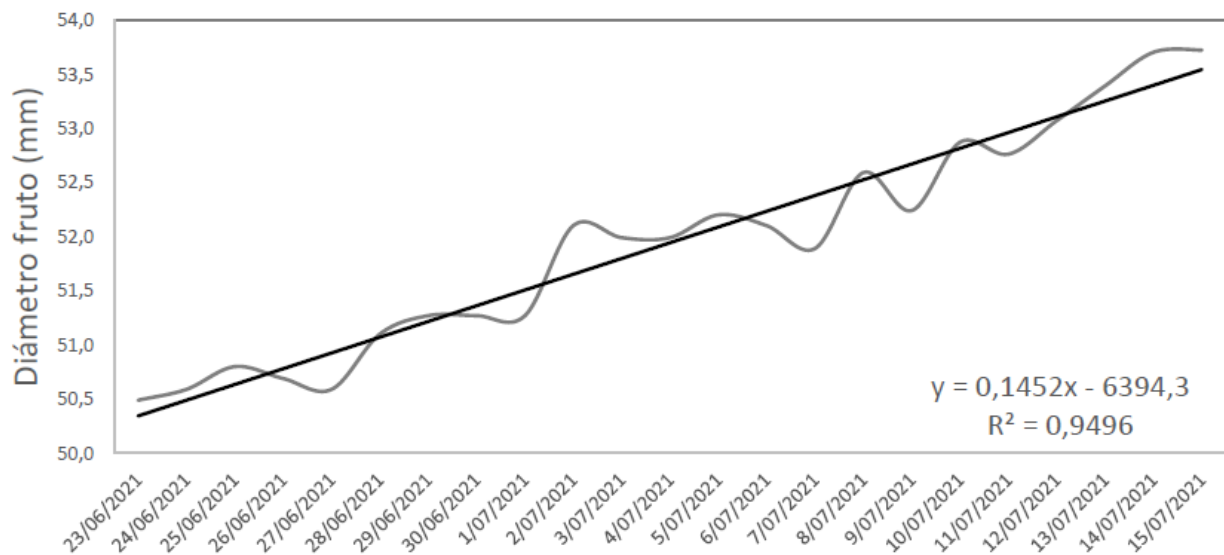


Figura 153. Desarrollo del fruto monitoreado con el dendrómetro.

Nótese en la **Figura 154**, un efecto evidente de la disponibilidad y la disminución de la disponibilidad del agua en el suelo sobre el diámetro del fruto en crecimiento. El análisis muestra cómo un fruto que, en condiciones normales de humedad del suelo, toma 89 días para crecer más de 45mm, tarda 56 días en crecer 13,6mm, bajo una condición de déficit hídrico. El fruto, tal como se observa, crece, más toma 63% del tiempo de desarrollo en aumentar 1/3 del tamaño total de fruto, esto indica, que sí el fruto tuviese una tasa de crecimiento constante (caso hipotético), se tardaría 185 días en alcanzar un tamaño comercial. Esto sería completamente anti-económico.

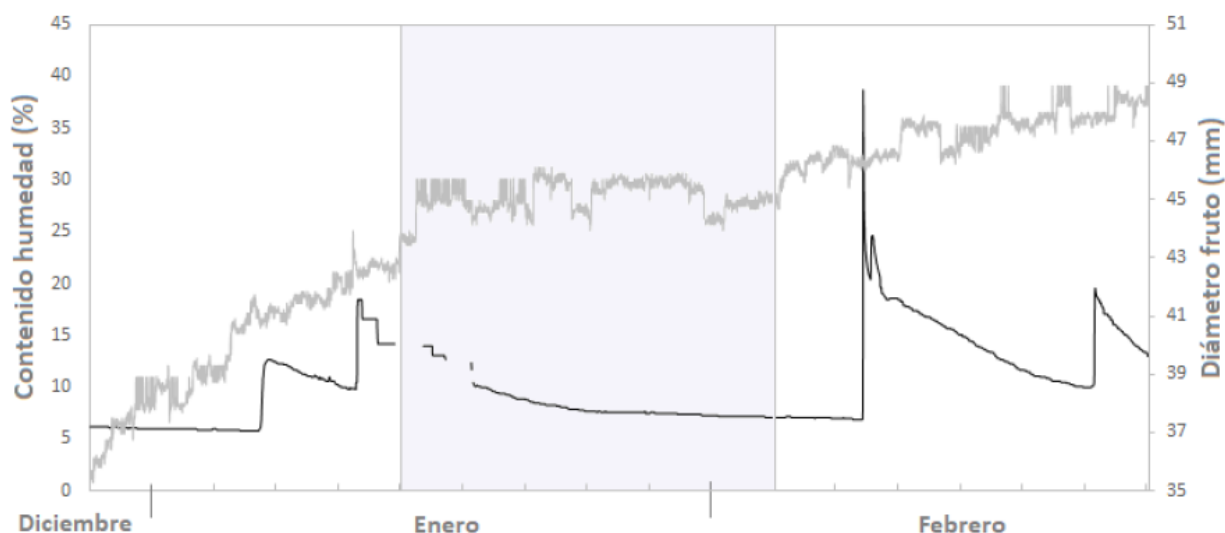


Figura 154. Efecto del déficit de agua sobre el desarrollo del fruto.

Programa de riego

El programa de riego se generó con la serie histórica de humedad del suelo tomada con un sensor de capacitancia instalado en el sitio experimental. Se tomó un promedio de varias secciones de la serie y con ellas se determinó la tasa de cambio de humedad en proceso de secado para definir la frecuencia y de hidratación para calcular el período. En la **Tabla 53** se presenta el programa debía aplicarse a partir de septiembre 2022, sin embargo, el nivel de las precipitaciones que se ha presentado en el período mantiene altos contenidos de humedad (**Figura 155**), que ha impedido la aplicación de riego. El sistema de riego presenta fallas, con lo cual, aún no se podría aplicar el programa de riego.

Tabla 53. Programa de riego experimento C.I. Palmira, Agrosavia.

Indicador Especie	CC	m. recta secado (día)	0,8CC	0,8(0,8CC)	Frecuencia (días)	Período
Lima ácida Tahití	22	0,4104	17,6	14,08	9	1hora

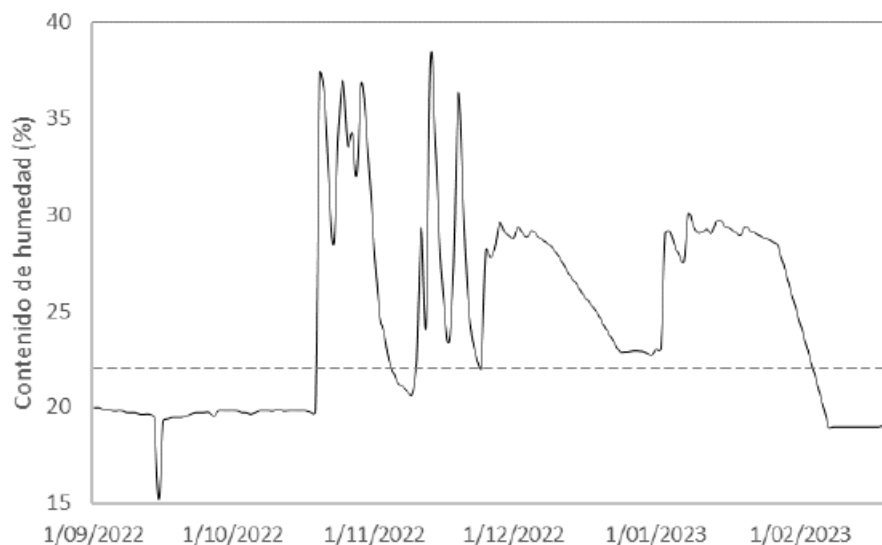


Figura 155. Estado humedad del suelo período programa de riego.

Productividad del agua.

Tabla 54. Parámetros productivos evaluados en cosecha.

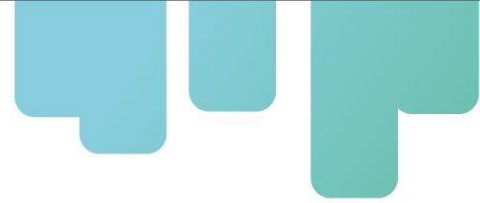
Cultivo	Producción	Riego por año	Productividad del agua
	(t/ha)	(m3/ha/año)	(kg/ m ³ agua)
2022 sin tecnología	13.5	219,7	61.4
2023 con tecnología	14	113.92	122.9

Los resultados de la Tabla 54 muestran un avance en la eficiencia del uso del agua en el cultivo tras la implementación de tecnología en 2023. La producción aumentó un 3.7%, pasando de 13.5 t/ha a 14 t/ha. Simultáneamente, el uso de tecnología permitió una reducción del riego por año en un 48.15%. Esta mejora en la eficiencia del riego se tradujo en un aumento significativo de la productividad del agua en un 100.16%, lo que significa que se produjo más cultivo con mucha menos agua. Este resultado positivo subraya el impacto de la tecnología en la optimización del uso de los recursos hídricos, un factor clave para la sostenibilidad y rentabilidad del cultivo.



Conclusiones

El manejo eficiente del riego en la producción de lima ácida Tahití es esencial para enfrentar los desafíos asociados con la disponibilidad limitada de agua. Este estudio demostró que la implementación de tecnología, junto con metodologías estandarizadas como la sugerida por el Manual FAO N°56, puede mejorar significativamente la eficiencia hídrica y la productividad del cultivo. Entre los hallazgos principales se destacó que la incorporación de tecnología permitió aumentar la productividad del agua en un 100.16%, logrando producir más cultivo con menor consumo hídrico. Además, se evidenció una reducción en el uso de agua, ya que el riego anual disminuyó en un 48.15% tras implementar las estrategias tecnológicas, contribuyendo así a la sostenibilidad de los recursos. Paralelamente, la producción mostró un incremento del 3.7%, lo cual refleja el impacto positivo de optimizar las prácticas de riego mediante el uso de tecnología. Estos resultados subrayan la importancia de adoptar herramientas tecnológicas accesibles y estrategias adaptadas a las condiciones locales para maximizar la eficiencia del uso del agua. La metodología implementada no solo mejora la sostenibilidad ambiental, sino que también contribuye a la rentabilidad económica de los cultivos, asegurando la viabilidad a largo plazo de la producción agrícola en escenarios de cambio climático y recursos limitados.



Piloto tecnológico en cultivos tropicales asistido por sensores y redes IoT.

La falta de conocimiento y medición de los verdaderos requerimientos hídricos de las plantas pueden generar excesos o déficit en el uso del agua; ambos causan estrés hídrico (Seleiman, et al., 2021). El exceso puede generar agotamiento en la fuente, contaminación del suelo y del agua, lavado de los nutrientes del suelo y causar la muerte de las plantas por anoxia (Devlin & Brodie, 2023). El déficit de agua minimiza la expresión del potencial productivo de los cultivos y en períodos prolongados, la muerte por deshidratación (Temesgen, 2020). Con este trabajo se identificó el uso actual del agua para 10 cultivos, aquellos que ocupan alrededor del 90% del área del Distrito de riego RUT: aguacate (*Persea americana*), cacao (*Theobroma cacao* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), guanábana (*Anona muricata*), guayaba (*Psidium guajaba*), lima ácida Tahití (*Citrus latifolia* Tanaka), maíz (*Zea mays*), maracuyá (*Passiflora edulis* f. *Flavicarpa*), papaya (*Carica papaya*) y vid (*Vitis vinifera*). Este proyecto propone una alternativa al manejo del riego de grandes superficies de producción agrícola en Colombia, que, tienen la obligación de administrar eficientemente el agua (CONPES 2936, 2018). De acuerdo con ASORUT (2020), la zona RUT es considerada la despensa hortofrutícola de Colombia, que contribuye con la producción del 50% de los alimentos de Valle del Cauca, el 12% de la producción frutícola nacional y el 42% del PIB del departamento. El distrito de riego RUT (D.RUT), en sus 10.200ha, está diseñado y actualmente sustenta gran parte de esta producción. Con el 77,2% del área ocupada por caña de azúcar y el 18,8%, por maíz (ASORUT, 2018). El distrito debe mantener grandes volúmenes disponibles en las fuentes (canales); por lo cual, es necesario repensar las técnicas tradicionales, empíricas, no cuantitativas para el control del riego, considerando los volúmenes y métodos poco eficientes, aspersión y superficie, que usan estos cultivos. Implementar tecnologías de medición bajo herramientas de agricultura 4.0 (sensores y redes IoT), permitió un mayor control en la aplicación del agua CEPAL (2022), llegando a disminuir significativamente el uso y a mejorar la gestión en el distrito (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). Una red IoT con 10 nodos principales de medición del contenido de humedad del suelo, con sensores de capacitancia (Abrisqueta et al., 2010; Bonet et al., 2010), priorizando, claro está, los cultivos que, a nivel local y departamental, por su importancia socioeconómica (PECTIA, 2022), demandan este tipo de información. Se logró disminuir el consumo del agua en más del 70%. En la actualidad la administración del distrito, que puede consultar el contenido de humedad del suelo, de los cultivos, en tiempo real, usa las herramientas, para la toma de decisiones en la gestión hídrica. Esta red, se convierte en un piloto para el Valle del Cauca y Colombia, en el manejo hídrico con precisión en un distrito de riego.

Materiales

La fase experimental se desarrolló en el distrito de riego RUT (D.RUT), ubicado al norte del departamento del Valle del Cauca, ocupando la zona plana, delimitada entre la cordillera Occidental y el río Cauca, de los municipios Roldanillo, La Unión y Toro, representativa de las condiciones de suelo y clima del D.RUT (**Figura 156**). El clima de la zona cuenta con una temperatura media de 24° C y altitud de 930 msnm. El ciclo de la precipitación es bimodal, con una media anual de 1.015 mm; la evaporación anual fluctúa entre 1.500 y 1.700 mm; la humedad relativa promedio es del 72%. Lo anterior en condiciones medias. La principal fuente hídrica del D. RUT es el río Cauca, más comparte el abastecimiento de la demanda hídrica agrícola, pecuaria y doméstica, con el acuífero del sector norte del departamento (ASORUT, 2024). Según cifras del ASORUT el distrito posee 10.256ha, de las cuales, el 52,7% es ocupado por caña de azúcar, 21,2% por el cultivo de maíz, 13,4% corresponde a frutales, entre los cuales el cultivo más importante es la Vid (4,9%), el 4,1% es ocupado por pastos para la ganadería, el 4,1 corresponde a infraestructura y cultivos dispersos como hortalizas y el restante 4,5% no está cultivado. En el distrito conviven 1.353 familias, las cuales dependen exclusivamente de la actividad agrícola.

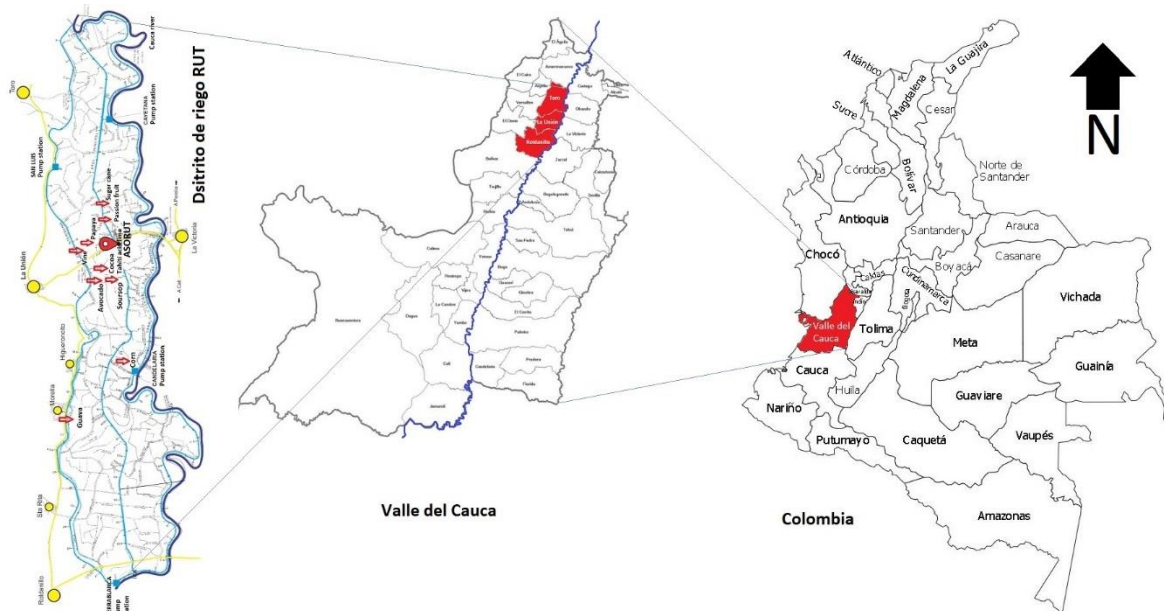


Figura 156. Ubicación piloto distrito de riego RUT – D. RUT. Fuente: Ríos-Rojas et al, (2024a).

En el Valle del Cauca el 70% de la producción de frutas proviene de pequeños y medianos productores, destacándose los cítricos, la uva, la piña, el banano común y el aguacate (ADR et al., 2021). El departamento es el tercero con mayor producción de frutas a nivel nacional, aportando el 9,1% (Bioversity & CIAT, 2022). En el 2017, La Corporación autónoma regional del Valle del Cauca – CVC, informó que del total de 226 m³/s cuantificados como demanda del recurso hídrico

en el departamento, el 64% son para el sector agrícola con (145 m³/s), y son utilizados principalmente para el riego de cultivos como caña de azúcar, cultivos transitorios, pastos y frutales. Es precisamente, esta alta demanda hídrica la que justifica el uso y la inversión en tecnología que permita regular, hacer un buen uso del recurso hídrico en la agricultura del Valle del Cauca. En la **Tabla 55**, se relaciona la participación del D.RUT en la producción de los 10 cultivos del piloto Colombia, respecto de las áreas sembradas en el Valle del Cauca. Obsérvese la importante participación para los cultivos de guayaba, maíz, papaya y vid, que precisamente, en la fase diagnóstico presentaron uno de los usos de menor eficiencia. Será entonces la red del D.RUT el mejor de los modelos de uso.

Tabla 55. Área departamental que ocupan los cultivos priorizados por el proyecto.

Cultivo	Área D.RUT (ha)	Área Dpto. Valle del Cauca (ha)	Participación D.RUT
Aguacate	6,6	495	1,3%
Cacao	10,1	1.648	0,6%
Caña	5.407	214.018	2,5%
Guanábana	13,5	466	2,9%
Guayaba	454,7	1.001	45,4%
Lima ácida Tahití	18,68	970	1,9%
Maíz	2.180,4	6.234	35,0%
Maracuyá	50,8	754	6,7%
Papaya	131	258	50,8%
Vid	501,2	1.833	27,3%

Definición necesidades de riego

De acuerdo con CVC (2017), la mayor demanda en los caudales superficiales del departamento, abastecidos por agua superficial y subterránea, corresponde a la agricultura, con un 64% del total concesionado, en comparación con el consumo humano y doméstico estimado en un 7,6%. En cuanto al recurso hídrico subterráneo, el 94,3% del agua concesionada se destina a riego.

La CVC, informó el año 2017 que un 58% de las cuencas del Valle del Cauca, presentaba índices de escasez hídrica, resultado de los impactos negativos por variabilidad climática. Aunado a los fenómenos climáticos, reportan causas como la ampliación de la frontera agrícola; el aumento de las actividades productivas con un consumo ineficiente de altos volúmenes de agua, y la falta de cultura ambiental. El IDEAM en el 2017, informó de los impactos negativos que tendrían las cuencas hídricas departamentales ante un escenario de cambio climático, modelado para el 2040. Como resultado, el Valle del Cauca ocuparía el quinto lugar entre los departamentos con mayor

riesgo de afectación al cambio climático. Un efecto importante -mostrado por el modelo al 2040- se observaría en zonas con presencia de acuíferos, alturas por debajo de 1.000 msnm, pendientes <16% y suelos arcillosos; cultivadas con arroz, caña y frutales, cuya recarga se verá disminuida en hasta de 20 mm/año (CVC, 2017). Así, al norte del departamento, el modelo informa que, en los municipios de La Unión, Trujillo, Roldanillo, Bolívar, Toro y Ansermanuevo, predominará la categoría de vulnerabilidad muy alta.

Tal como indica la CVC, la variabilidad climática es evidente en la zona, presentando de manera alterna, períodos de alta oferta hídrica y temporadas bastante secas. Para el caso, en la **Figura 157**, se puede observar que en el año 2021 la precipitación acumulada presentó una excedencia fue del 75%, respecto de la media histórica, para el 2022 fue del 51%, más para el 2023, estuvo, 20% bajo la media. La fluctuación del contenido de humedad del suelo, registrada por los sensores de humedad, permitió identificar rápidamente los excesos y déficits presentados en los cultivos, debidos a la variabilidad de la precipitación; permitiendo tomar decisiones frente al riego y también sobre los problemas de drenaje.

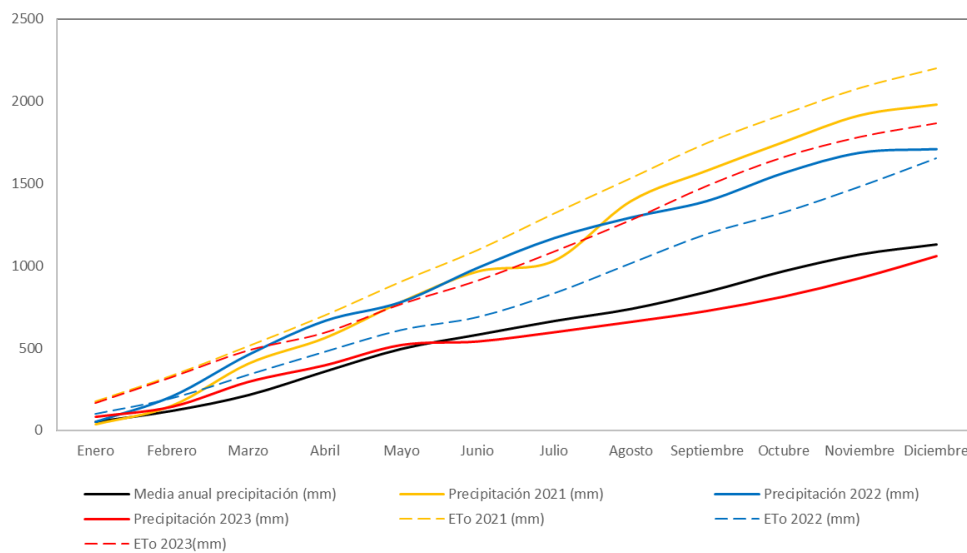


Figura 157. Oferta ambiental de la precipitación en el período experimental.

Red monitoreo ambiental IoT

Se contó con 3 estaciones meteorológicas automáticas (EMA), ubicadas en predios del D. RUT, ubicadas estratégicamente en los sectores norte, centro y sur del distrito. Estas estaciones miden con frecuencia horaria/diaria, la Temperatura (°C), Humedad relativa (%), Precipitación (mm), Radiación solar (W/m²) y Velocidad del viento (m/s). La ubicación de las EMA se detalla en la

figura 3, se demarcan con una etiqueta color lila. Complementando la red de monitoreo climático, se instaló una red para el registro de la humedad del suelo. El detalle de la ubicación de la red dentro del D.RUT, se presenta en la **Figura 158**, con flechas color rojo.



Figura 158. Ubicación de la red de monitoreo ambiental en el D.RUT. Fuente: Ríos-Rojas et al, (2024a).

Dentro de la red hay diferentes dispositivos que capturan, almacenan y transmiten la información hasta un servidor donde la información está disponible en tiempo real para los usuarios. En cada finca (cultivo priorizado) se instalaron dos sensores capacitivos, que registran la humedad del suelo (**Figura 159**) con lapsos de 20 minutos.



Figura 159. Sensor de humedad del suelo. Ríos-Rojas et al, (2024b).

Los sensores, ubicados en la profundidad media de la zona de raíces (**Tabla 56**) de dos plantas, constituyen un nodo de suelo, el cual cuenta, además, con un almacenador de datos (con un chip de seguridad) y una antena transmisora (**Figura 160**). En este caso se poseen 10 nodos de suelo,

uno por cada cultivo.

Tabla 56. Profundidad de instalación de los sensores.

Cultivo	Profundidad (cm)
Aguacate	30
Cacao	25
Caña	15
Guanábana	30
Guayaba	30
Lima ácida Tahití	30
Maíz	15
Maracuyá	20
Papaya	20
Vid	25



Figura 160. Instalación estaciones de humedad del suelo en el sitio experimental.

Las antenas de cada dos cultivos transmiten a los nodos repetidores, que son, 5 en total; y estos, a su vez, transmiten la información al nodo principal o coordinador, ubicado en la sede administrativa del D.RUT. En la **Figura 161** se presenta un esquema de la red del D. RUT, instalada

en junio 2021.

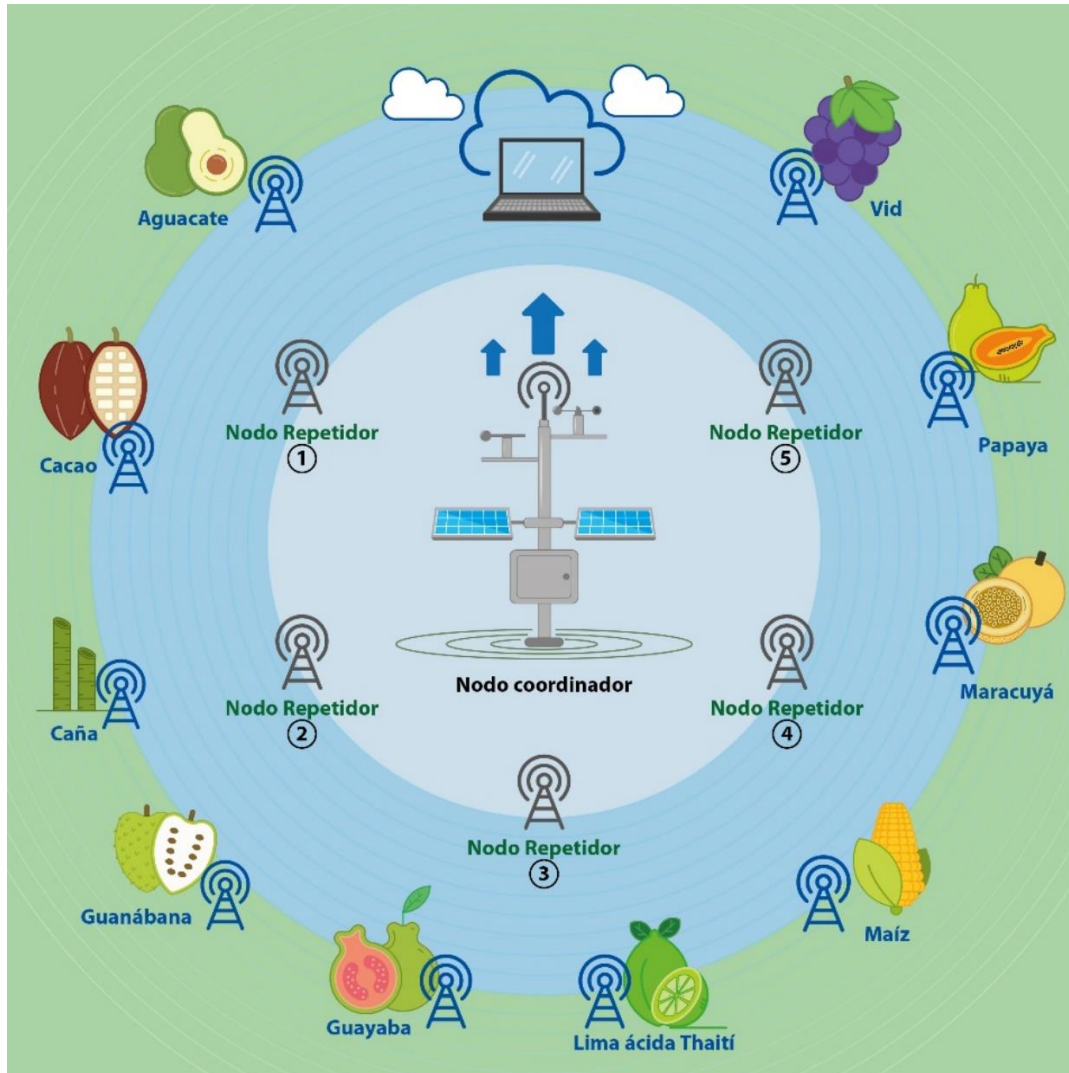


Figura 161. Esquema de la red en el D.RUT. Fuente: Ríos-Rojas et al, (2024b).

Además de las variables ambientales, se monitoreó con regularidad semanal el diámetro ecuatorial del fruto y para el caso de la caña de azúcar y el maíz, el diámetro del tallo y el número de nudos. El diámetro ecuatorial se midió con un calibrador marca Mitutoyo® (**Figura 162**), con resolución en mm. Las variables monitoreadas en el sistema Suelo-Planta-Atmósfera, fueron correlacionadas para identificar la influencia del ambiente en el desarrollo del fruto y en general el comportamiento productivo del cultivo.



Figura 162. Medición del diámetro del fruto. Fuente: Ríos-Rojas et al, (2024b).

Dada la alta nubosidad en el sitio durante el período experimental (junio 2021 – octubre 2023), no se poseen imágenes satelitales de calidad, con las que se pudiera hacer el análisis de requerimientos del riego desde el NDVI. Por ello, se aplicó el método del balance hídrico en el suelo, utilizando sensores de capacitancia.

La frecuencia y el período, bajo las cuales se debía operar el riego se determinó desde la serie de humedad del suelo, registrada por los sensores. La frecuencia específicamente refiere al tiempo que pasa entre un riego y otro. Así a partir de un riego o una lluvia, el siguiente riego se ejecuta cuando la humedad del suelo ha alcanzado el límite máximo de agotamiento. Para el caso de los cultivos del D.RUT se estableció como un 80% del 80% de la capacidad de campo del suelo, CC. Ahora, el límite máximo al cual se debe mantener la humedad del suelo es el 80%CC, privilegiando la aireación de las raíces (Luo & Zhou, 2006) en este tipo de suelos, con textura arcillosa. Para suelos arenosos, se debe procurar una humedad continua de 100%CC. En este caso, para el D.RUT, el rango de humedad del suelo estaría entre 0,8CC & 0,64CC. El período es el tiempo que tarda el riego, partiendo de 0,64CC, hasta alcanzar 0,8CC.

La CC fue generada desde las series de humedad del suelo (Muangprathub, Boonnam, Kajornkasirat, Lekbangpong, Wanichsombat & Nillaor, 2019). La CC fue definida como la moda de la serie de humedad entre un evento de riego y la estabilidad instantánea del drenaje, cuando la humedad se presenta “constante”, durante un corto período. Se tomaron varias secciones de serie después de un riego o una precipitación.

Definida CC, así mismo, el rango de humedad a mantener en el suelo: 0,8CC & 0,64CC, se procedió a aplicar el riego según los criterios, consultando la humedad de manera diaria en horas de la mañana y la tarde, para los 10 cultivos. Para mejorar el entendimiento de los criterios de riego, las herramientas digitales y hacer que, el proceso se adoptara en forma práctica, se construyó una hoja de cálculo para los productores. En este archivo en formato Excel®, el productor incluye el valor de la humedad del suelo dos veces al día y la plantilla le indica: “regar” o “no regar”. En

la **Figura 163** se presenta un esquema de la plantilla.

Para el ingreso y consulta de la información de los registros de los sensores en la plataforma “Apgriculator.com”, así como para diligenciar los datos en la hoja de cálculo, se capacitó a los productores, se generó un video guía y en el manual del proyecto “Agricultura 4.0: cuándo, cuánto y cómo regar” (Ríos-Rojas, et al., 2024), se detallan las instrucciones. En la versión Web de este manual, el productor puede hacer uso de los links a la plataforma y el código QR para ingresar y descargar la hoja de cálculo.

Especie	Aguacate			
CC (%)	39			
0,8CC	31,2			
0,64CC	24,96			
fecha	θ (7:30:00)	θ (13:15:00)	Decisión riego	Observación
1/10/2022	40,5	40	No riego	
...	
...	
8/10/2022	34,9	32,95	No riego	
17/10/2022	24,65	24,65	Regar	
1/01/2023	37,60	37,25	No riego	
...	
...	
21/03/2023	20,00	22,20	Regar	
29/03/2023	36,70	36,20	No riego	
...	
31/03/2023	25,50	24,35	Regar	

Figura 163. Plantilla para la toma de decisiones de riego

Resultados

Monitoreo ambiental en el período experimental.

Al inicio de la fase experimental el monitoreo expuso diferentes problemáticas en el manejo del agua en los cultivos priorizados. Para la mayoría de los cultivos, se observa que el fruto se desarrolla en condiciones de anegamiento, lo cual afectaba no solo el tamaño final, sino además el tiempo a cosecha; en condiciones aún más severas, con excesos prolongados, se afectó la floración; presentando cosechas tardías o incluso ausentes. En las **Figura 164****Figura 165**, **Figura 166** y**Figura 167** se presenta el desarrollo del fruto, para un ciclo, bajo una condición de exceso hídrico, para los cultivos cacao, papaya, maracuyá y aguacate, respectivamente. Para los cuatro casos presentados, el contenido de humedad del suelo se mantuvo por largos períodos sobre CC.

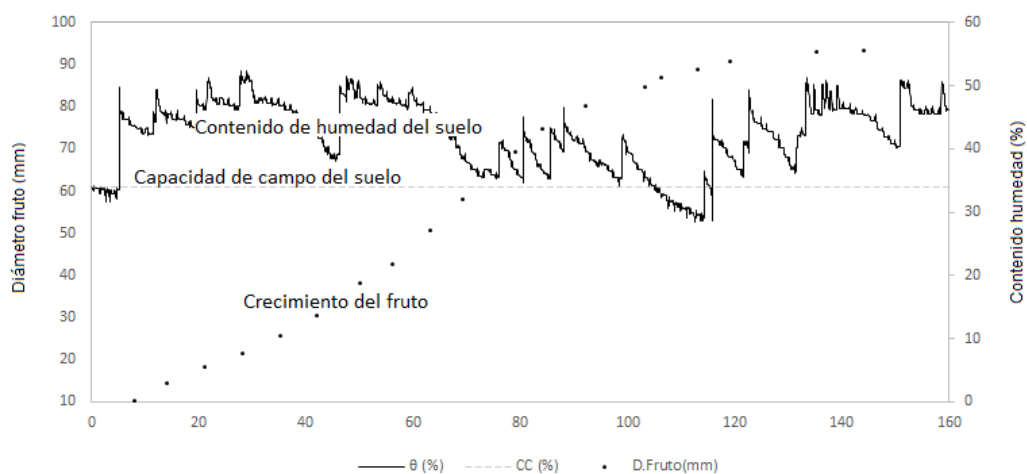


Figura 164. Curva de crecimiento para el cacao Vs humedad del suelo.

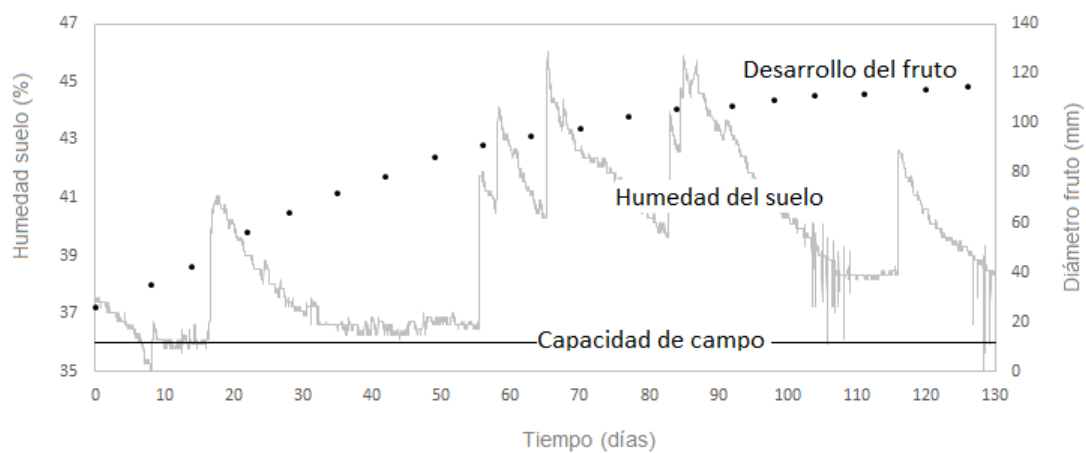


Figura 165. Desarrollo medio del fruto de la papaya Vs. Humedad el suelo.

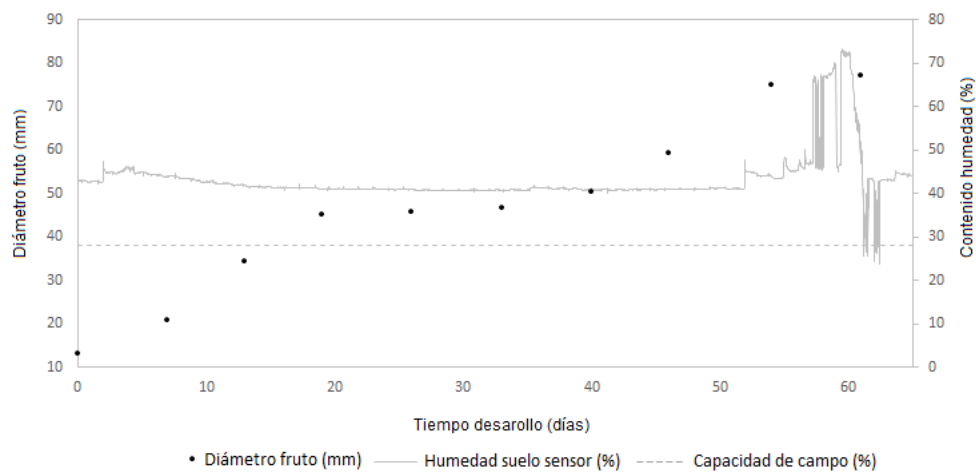


Figura 166. Desarrollo del fruto de maracuyá Vs humedad del suelo.

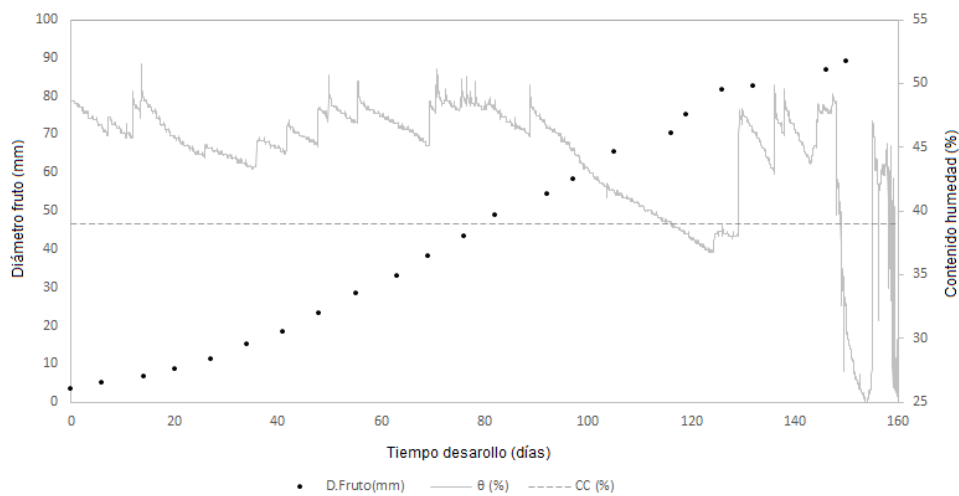


Figura 167. Curva de crecimiento para el aguacate Vs humedad del suelo.

Los excesos de humedad en el D.RUT, tienen diferentes orígenes: la precipitación, el riego, el drenaje subsuperficial desde los canales principales interceptor de drenaje, o el de riego; que en algunos casos poseen cota del agua más alta que los cultivos (**Figura 168**); y por último la capilaridad, debido a los altos niveles freáticos presentados en el lugar (**Figura 169**).



Figura 168. Drenaje de canales hacia los huertos por diferencia de altura. Fuente: Ríos-Rojas et al, (2024a).



Figura 169. Presencia continua de nivel freático somero en el D.RUT.

Otros cultivos, se desarrollan en condición de déficit hídrico, mismo que ha generado estrés en las plantas y para cultivos tan sensibles tanto al déficit como al exceso, como es el maracuyá ha generado pérdida de áreas completas del cultivo. En las **Figura 170****Figura 171****Figura 172** se presentan los cultivos guayaba, maíz y vid, en escenario de déficit.

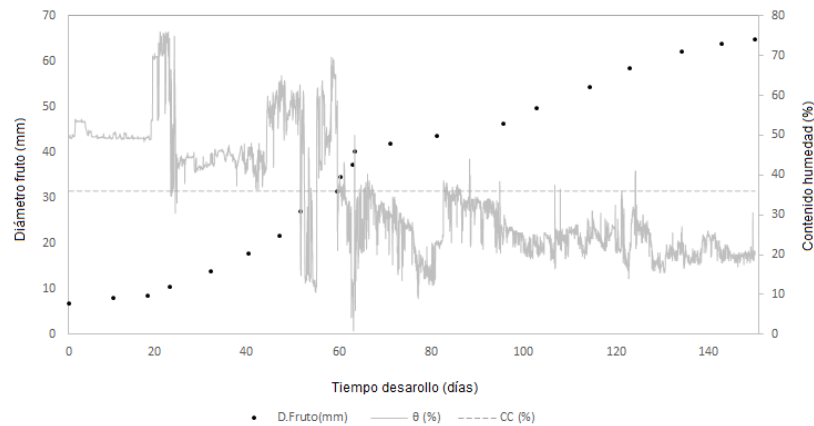


Figura 170. Desarrollo del fruto de la guayaba Vs. humedad del suelo.

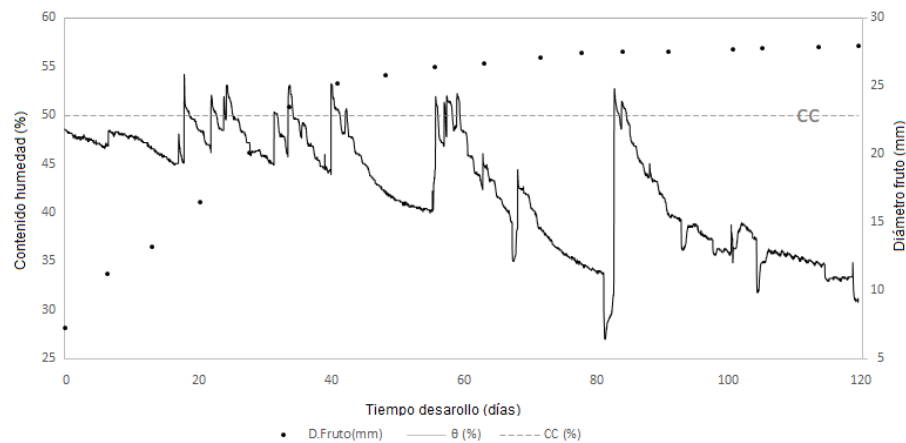


Figura 171. Desarrollo medio del fruto del maíz Vs humedad del suelo.

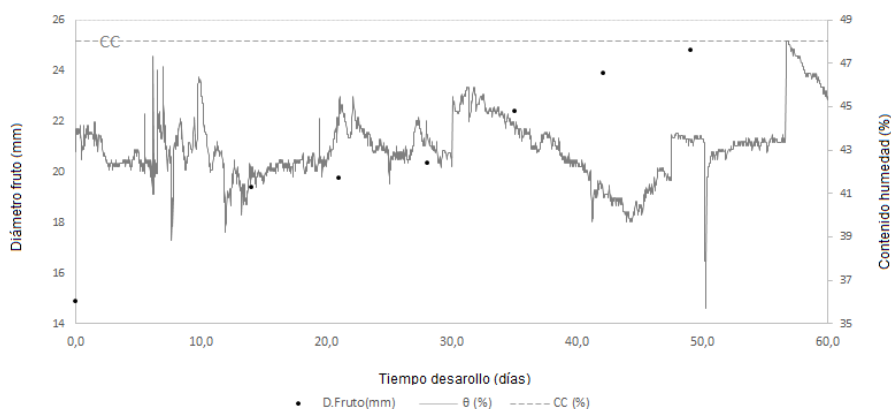


Figura 172. Desarrollo del fruto de la vid Vs. humedad del suelo.

Control en la aplicación de riego.

Tal como se informó en la metodología, para ejecutar un mejor control del riego, los productores podían hacer uso de una plantilla de riego para definir sí regar o no, en función del contenido de humedad que presentaba el suelo, resultado de diferentes accesos de agua. Esto para los productores conectados a la red IoT. Para aquellos no conectados, en condiciones biofísicas similares a las experimentales, dentro del D.RUT, se generó un programa de riego, evaluado y ajustado entre octubre 2022 y septiembre 2023. El resultado del programa de riego se presenta en la **Tabla 57**. Este programa se ha indicado a los productores que no es estático, es una base. Se informó que durante el proceso de aplicación pueden hacer pruebas de gravimetría e ir definiendo sus propios frecuencia y período. Los procesos fueron detallados en Ríos-Rojas et al, (2024b).

Tabla 57. Programa de riego ajustado para las especies priorizadas en el D.RUT.

Especie	CC	m*	0,8CC	0,8(0,8CC)	Frecuencia (días) septiembre2023	Período
Aguacate	38	0,864	30,4	24,32	11	1,5horas
Cacao	34	0,7992	27,2	21,76	11	40 min
Caña	44	0,4968	35,2	28,16	18	1hora
Guanábana	40	0,8712	32	25,6	15	1hora
Guayaba	36	2	28,8	23,04	10	40 min
Lima ácida Tahití	36	0,7488	28,8	23,04	10	1hora
Maíz	50	0,8136	40	32	15	40 min
Maracuyá	28	0,6552	22,4	17,92	7**	20min
Papaya	36	1,5408	28,8	23,04	10	40 min
Vid	42	1,5768	33,6	26,88	15	1hora

*m está calculada para 24horas

** No se tienen resultados representativos para maracuyá, dada la imposibilidad de ubicar un cultivo que presentara las condiciones de investigación en el D.RUT

El programa fue aplicado durante el período mencionado (octubre 2022 y septiembre 2023), con lo cual se logró que los productores practicaran en el uso de la tecnología.

Algunos casos exitosos en la aplicación del riego controlado bajo herramientas de Agricultura 4.0 se presentaron para los cultivos maíz, guayaba, guanábana. Para el maíz (**Figura 173**), se logró hacer un control de la humedad mucho más aproximado a la tecnología. En realidad, fue el cultivo con mayor éxito, en cuanto a uso eficiente del agua. El maíz poseía uno de los mayores consumos hídricos por hectárea en el D.RUT, aplicando la tecnología pasó de casi $16.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ a $3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, consumo que representa un ahorro del 80% del agua. Ahora bien, el consumo sigue siendo alto, sí se considera que el límite máximo de humedad se mantiene alrededor de CC y no en el rango 0,8CC – 0,64CC. Con este manejo, el último ciclo tuvo la menor

temporalidad (**Tabla 58**), la planta estuvo un poco más pequeña, pero cumplió con la media de número de hojas. Asimismo, el rendimiento se mantuvo, lo cual indica, que la tecnología beneficia de manera importante este cultivo.

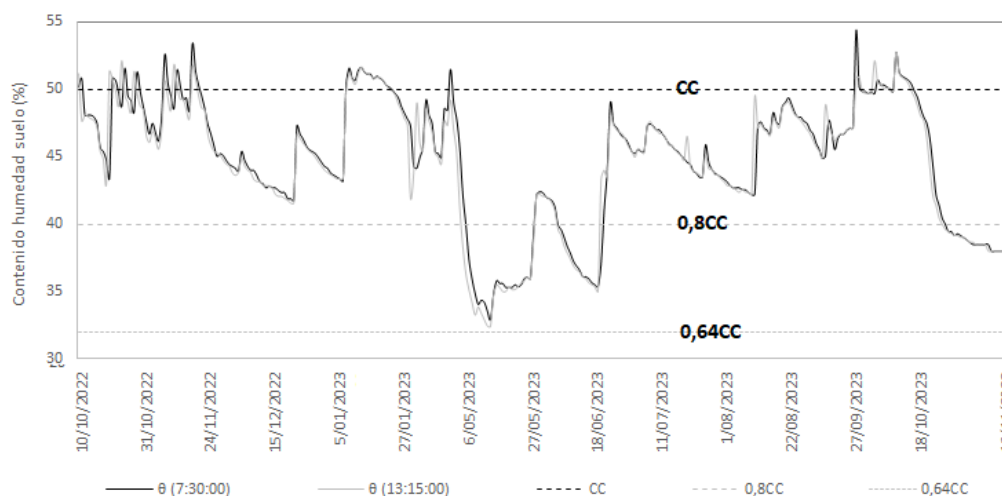


Figura 173. Dinámica de la humedad del suelo en el cultivo de maíz bajo riego tecnificado.

Tabla 58. Duración del ciclo productivo para el cultivo de maíz.

Cultivo	Ciclo	Longitud ciclo (días)	Media diámetro final (mm)
Maíz	1	140	27
	2	102	32
	3	77	24,4

Con el cultivo de maíz, el proyecto aporta en gran medida al distrito, pues como es de recordar, ocupa alrededor del 21,2% del área. Los productores de maíz fueron muy receptivos de la tecnología, considerando que no solo van a ahorrar en el volumen de agua, sino también, en consumo de energía (combustible), que fue, claro significativamente menor. Ahora bien, las repercusiones no son solo económicas para el productor, sino también ambientales, disminuir el uso de combustible es equivalente en magnitud, a minimizar el aporte de GEI.

Otro cultivo exitoso en la aplicación de la tecnología fue la guayaba (**Figura 174**), tal vez el más cercano a cumplir con los requisitos de riego. Obsérvese que la humedad se mantiene en el rango deseable: bajo 0,8CC y sobre 0,64CC, con algunos Peaks y Valles, pero en general muy cerca del rango. Este ejercicio con guayaba demuestra al distrito y a los productores que se puede cumplir con la tecnología, que es posible y que con ellos devienen los beneficios. Para el caso, la guayaba llegó a un ahorro en el uso del agua del 67,25, pasando de 8,51 t*año⁻¹ a 9,9 t*año⁻¹, solo en el

período comprendido entre la caracterización (año 2022) y el fin de la evaluación (año 2023). Esto es, los rendimientos podrían aumentar si el productor se mantiene en el régimen de riego, ya que el cultivo tendrá agua y aire adecuados para expresar su capacidad genética. Tal como se observa en la **Tabla 59**, la temporalidad del ciclo disminuyó, manteniendo el tamaño.

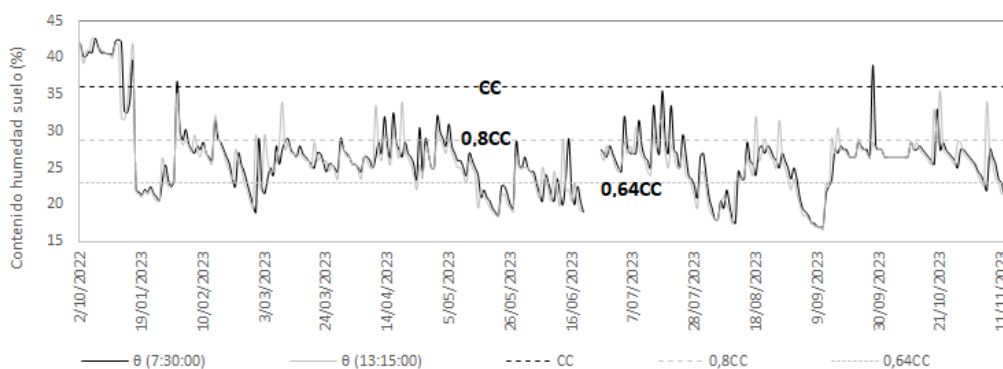


Figura 174. Dinámica de la humedad del suelo en el cultivo de guayaba durante el período evaluación.

Tabla 59. Duración del ciclo productivo para el cultivo de la guayaba.

Cultivo	Ciclo	Longitud ciclo (días)	Media diámetro final (mm)
Guayaba	1	134	65
	2	122	54,7
	3	111	52,2

Otro cultivo que presentó algún nivel de control de riego, durante un largo período en función de la tecnología, fue la guanábana (**Figura 175**). Se observa que al inicio del período se hizo un esfuerzo por mantener la humedad en el nivel adecuado, bajo 80%CC, sin embargo, con la disminución de las precipitaciones en el segundo semestre del 2023, se retomó el período de riego y aunque el productor hizo el control respectivo, se notó una intrusión de agua desde el canal interceptor a esta finca que afectó gravemente el balance hídrico. A pesar de los esfuerzos, el período húmedo aumentó el contenido de humedad y desde mayo hasta fin de año, la humedad superó a CC. También se deben considerar los eventos extremos de agosto, septiembre y octubre del 2023. Este inconveniente, al parecer influyó en el ciclo de la fruta, incrementando su temporalidad (**Tabla 60**). Obsérvese que fue un efecto sobre el período de crecimiento, ya que el tamaño final se mantuvo.

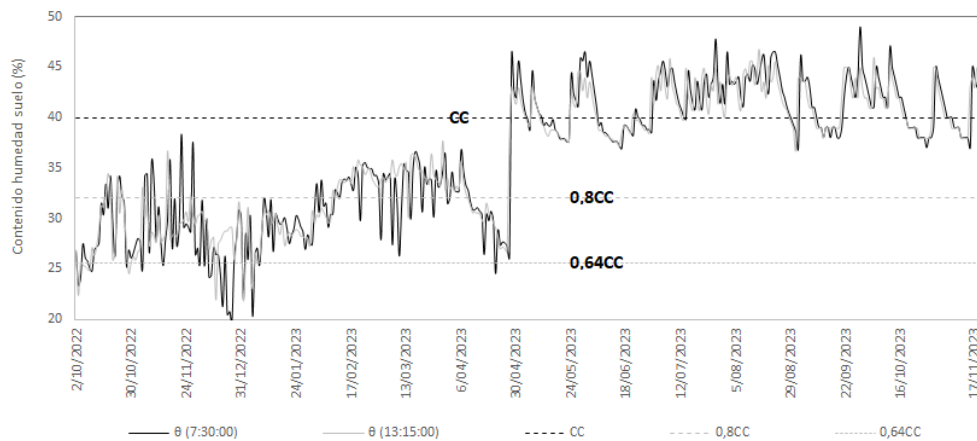


Figura 175. Dinámica del contenido de humedad del suelo en el cultivo de guanábana.

Tabla 60. Duración del ciclo productivo para el cultivo de la guanábana.

Cultivo	Ciclo	Longitud ciclo (días)	Media diámetro final (mm)
Guanábana	1	81	115
	2	104	113
	3	127	114

Un caso que merece ser mencionado es el de la papaya (**Figura 176**), no fue de éxito, los productores no siguen las recomendaciones de riego y el cultivo pasó largos períodos con déficit (banda lila). Este evento pudo ser debido a la presencia de precipitaciones del período, sin embargo, las precipitaciones de diciembre 2022, no fueron suficientes para mantener la disponibilidad. A pesar de hacer el debido informe al productor, este no estuvo atento a las recomendaciones y pasó de ser un cultivo de excesos a uno de déficit extremo. Se decidió trasladar el monitoreo a otra finca.

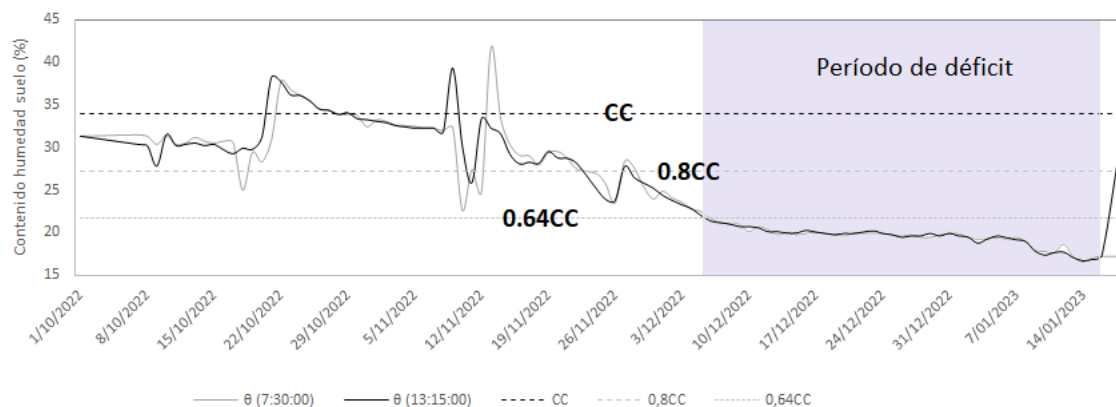


Figura 176. Estado de déficit de humedad del suelo cultivo papaya período evaluación.

En el nuevo escenario para papaya (**Figura 177**. Estado de exceso de humedad del suelo cultivo papaya período evaluación.), entre enero y febrero 2023 se hizo un mayor control del riego. A partir del mes de marzo y hasta mayo, se presentó un exceso casi que continuo para el período de evaluación del riego, esto sin lugar a duda, es debido a las altas precipitaciones presentadas en la zona, más en el período subsiguiente, hasta finalizar la evaluación, a juzgar por la magnitud de las precipitaciones, se puede concluir que los excesos son debidos al riego.

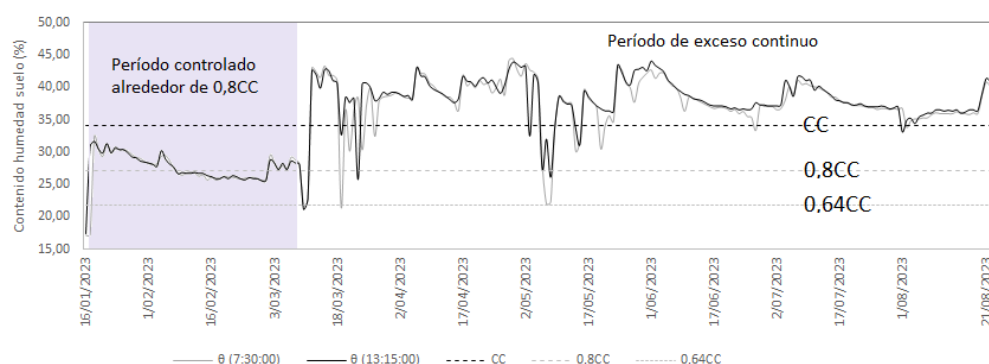


Figura 177. Estado de exceso de humedad del suelo cultivo papaya período evaluación.

En la **Tabla 61** se observa, que al parecer el exceso de agua no tuvo mayor injerencia sobre la temporalidad del ciclo productivo y el tamaño medio de la fruta, sin embargo, se puede observar que en general son frutas pequeñas ya que esta fruta puede alcanzar hasta 15cm de diámetro (PNUD, 2023). Es por ello, que se considera, aún, la fruta no ha alcanzado su potencial productivo, dadas las condiciones de manejo.

Tabla 61. Duración del ciclo productivo para el cultivo de la papaya.

Cultivo	Ciclo	Longitud ciclo (días)	Media diámetro final (mm)
Papaya	1	136	112,7
	2	138	105,9
	3	130	92,3
	4	132	110

En general los productores durante el período de evaluación no fueron rigurosos con las recomendaciones, a pesar, que, la profesional del proyecto informaba oportunamente el resultado arrojado por la hoja de cálculo para ejecutar o no un riego. Los resultados productivos

no se vieron afectados, los ciclos fueron bastante uniformes, y la fruta estuvo dentro de los parámetros de comercialización, asimismo, el rendimiento para algunos productores se mantuvo y para la parcela en monitoreo aumentó, mejorando incluso la media rentable (Finagro, 2022).

Otros inconvenientes, informados con anterioridad, refieren a la intrusión que hace el agua de riego del distrito que va por los canales principales a los huertos aledaños. Ese es el caso de huerto de aguacate, que como se puede observar en la **Figura 178**. Dinámica de la humedad del suelo cultivo aguacate período evaluación., fue poco el control que se pudo hacer del agua durante el período de evaluación. Se presenta un período de exceso, donde el contenido de humedad en el huerto está sobre CC. En adelante, con el cese del riego de la caña, en el distrito, el canal baja el nivel y asimismo baja el contenido de humedad del huerto. Se tuvo un período donde se logró aplicar el programa de riego, más no se mantuvo, ya que se reinició el riego de la caña de azúcar, en junio 2023, ante la ausencia de precipitaciones.

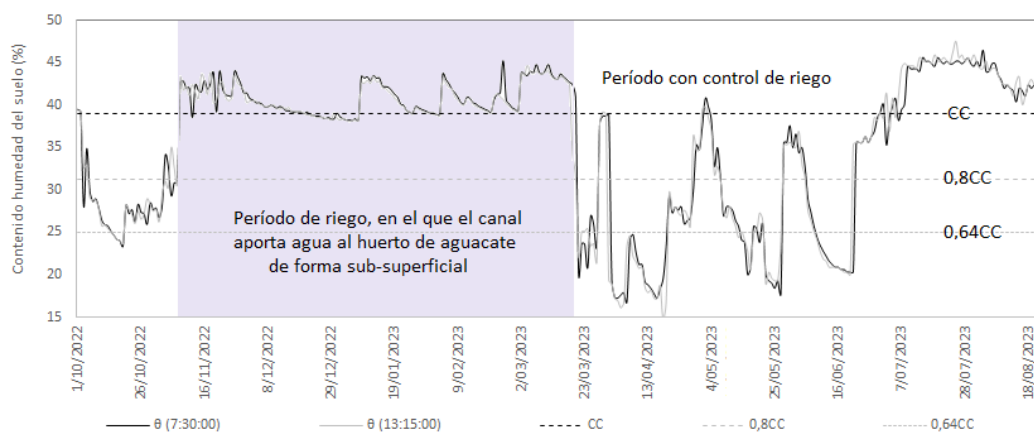


Figura 178. Dinámica de la humedad del suelo cultivo aguacate período evaluación.

A pesar de las condiciones ambientales, los resultados del ciclo final (**Tabla 62**), tienen mayor correlación con lo reportado por Romero (2012), el cual indica que la duración del ciclo para aguacate Lorena es de 143 días; para la finca San Antonio se ha llegado a 147 días, para la cosecha del año “Off” que es la más prolongada. Para el caso de la cosecha del año “On”, el período es un poco más corto y en el caso de la finca San Antonio, se mantiene.

Tabla 62. Duración del ciclo productivo para Aguacate Lorena.

Cultivo	Ciclo	Longitud ciclo (días)	Media diámetro final (mm)
Aguacate	1	155	88,8
	2	97	90
	3	124	79,1
	4	97	81,5
	5	147	89,7

Considerando los resultados hasta este punto, es preciso valorar la tecnología, especialmente el uso de los sensores, como un acierto para el uso eficiente del agua en el D.RUT. Como es obvio, estos equipos informan de manera inequívoca las ventajas de poder ver el comportamiento del agua en un sitio que a simple vista es imposible. Lo normal, como se había documentado antes, los productores riegan con el estado de humedad que se observa en la superficie. Sin embargo, el productor de aguacate no necesitó regar durante el período de intrusión subsuperficial del agua al huerto; en un período que otros cultivos requerían riego. No es que esto sea una ventaja para el productor de aguacate, ya que, con estos excesos, el cultivo no florece, pero ahora sabe cuál es el problema y ha tomado la decisión de hacer una obra de drenaje y no invertir en productos para estimular la floración.

El cultivo de lima ácida Tahití se observó bastante afectado por el período húmedo (**Figura 179**), los problemas de drenaje del huerto no se superaron durante el proceso de evaluación, con lo cual el cultivo permaneció durante la mayor parte del tiempo sobre CC, con poca floración.

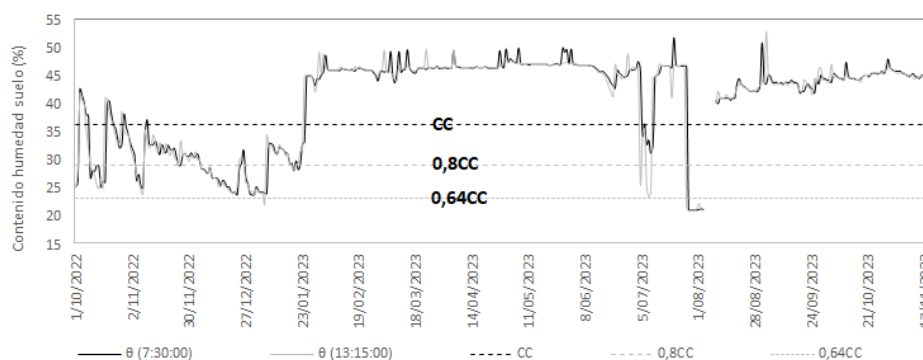


Figura 179. Dinámica de la humedad del suelo en el cultivo de lima ácida Tahití durante el período evaluación.

Aun así, se logró que el productor dejara de sobre regar y los consumos hídricos de agua verde disminuyeron significativamente. El ahorro del agua estuvo alrededor de 65%, aún con los excesos

hídricos presentados en los meses finales del período de evaluación.

Como se puede observar en la **Tabla 63**, los resultados para la lima ácida Tahití son satisfactorios, considerando que se logró, no solo disminuir la recurrencia del riego, sino que el productor acogió información dada en las capacitaciones, como son las características ideales de cosecha. Para el caso, la lima ácida Tahití se comercializa con un diámetro entre 45 y 50mm, a esta edad, ya se tiene madurez fisiológica. Sin embargo, en repetidas ocasiones los productores desconocen esta información. Con este criterio, se aporta en la cosecha oportuna, con la consecuente disminución del ciclo que permitía el productor. Trabajos de Agrosavia (inédito) informan de un ciclo de 89 días, para frutos de 5.0mm. Los resultados indican que, en esta zona, esta temporalidad podría ser aún menor, con los consecuentes beneficios productivos y económicos.

Tabla 63. *Duración del ciclo productivo para la Lima ácida Tahití.*

Cultivo	Ciclo	Longitud ciclo (días)	Media diámetro final (mm)
Lima ácida Tahití	1	222	62
	2	112	53,8
	3	103	56,8
	4	75	50,9
	5	84	52,4
	6	76	48,2

Es preciso mencionar que en la finca San Antonio, aún está en falta mejorar el sistema de drenaje para que los cultivos puedan expresar mejor su potencial y el manejo hídrico haga un real efecto.

El cultivo de vid tuvo largos períodos en exceso hídrico (**Figura 180**), con algunos períodos de control, sin embargo, esta parcela y en general las parcelas de esta finca sufren la intrusión hídrica desde el canal interceptor del D. RUT. Este cultivo está instalado en camas, más la capilaridad ejerce un papel importante, debido a los altos contenidos de arcilla. Aun así, el regar en función del contenido de humedad del suelo y no con calendario, permitió un ahorro de uso del agua del 89%, mantener en promedio la calidad comercial nacional de la fruta (2.0 a 2.5cm) y mantener los tiempos de cosecha con 5 días de diferencia (**Tabla 64**). Los resultados de la longitud del ciclo informan que, en la localidad, éste puede durar menos y entregar frutas con diámetros dentro de la media comercial de exportación (2,4 y 2,8cm). En todo caso, el último ciclo, que terminó el 17/10/2023, si se observa afectado por los altos niveles hídricos.

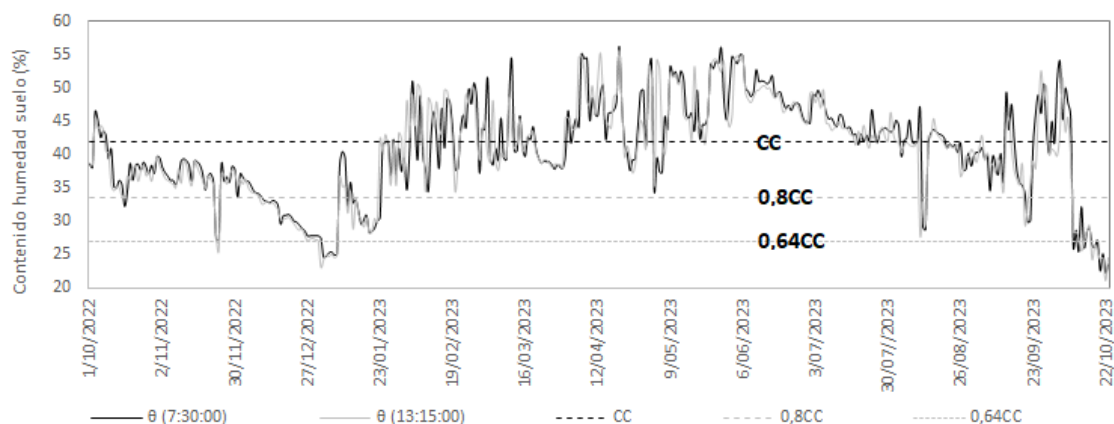


Figura 180. Dinámica de la humedad del suelo, cultivo de la Vid, período de evaluación.

Tabla 64. Duración del ciclo productivo para el cultivo de la Vid.

Cultivo	Ciclo	Longitud ciclo (días)	Media diámetro final (mm)
Vid	1	46	22,2
	2	62	24,4
	3	55	21,5
	4	48	24,8
	5	55	22,2
	6	56	23,3
	7	48	22,7
	8	49	22,3
	9	54	20,3

Finalmente, como parte del análisis y resultados se observó, como ya se ha informado que los altos contenidos de humedad si alteraron los ciclos de los cultivos, más el apoyo con la información dada por la tecnología permitió ajustar los tiempos de cosecha y para algunos cultivos, fue un avance importante.

Los cultivos priorizados para el piloto Colombia, mostraron en general una adecuada respuesta productiva. En algunos casos los rendimientos no se incrementaron, más se mantuvieron. Como es claro, aún existe la brecha para algunos cultivos; sin embargo, el hecho que los productores del D.RUT puedan contar con disponibilidad hídrica aumenta la probabilidad del cierre de brecha, aún más para los cultivos industriales que ocupan grandes áreas. En la **Tabla 65** se relaciona el rendimiento cuantificado en el experimento para el año 2023, la media reportada para el norte del departamento del Valle del Cauca y los rendimientos reportados por las entidades oficiales logrados en procesos de investigación.

Tabla 65. Brecha tecnológica para los cultivos experimentales.

Cultivo	Rendimiento (t/ha/año2023)	Rendimiento local (t*ha-1)	Rendimiento o investigación (t*ha-1)	Fuente
Aguacate	12	8	10	Finagro, (2018a)
Cacao	0,5	0,6	0,45	MADR, (2021a)
Caña	100	85-90	117,5	Finagro, (2018b)
Guanábana	55	30	44,2	Agrosavia, (2020a)
Guayaba	9,9	9,9	12	MADR, (2021b)
Lima ácida Tahití	22,4	10	52	Agrosavia, (2020b)
Maracuyá	26	26	29	Agronet, (2018)
Maíz	8	6	5,8	MADR, (2021c)
Papaya	70	68	110	Agronet, (2018)
Vid	16	6,8	18	Agronet, (2018)


Análisis de Uso eficiente del agua.

Tal como se ha observado en el transcurso del informe, en el distrito de riego RUT, los productores hacen un uso ineficiente del agua, aún aquellos que emplean sistemas localizados de alta frecuencia. El mayor error identificado en estos sistemas productivos radica en los tiempos de

riego, más que en el sistema usado o la frecuencia. En la **Tabla 66** se relaciona los escenarios sin (año 2022) y con tecnología (año 2023), se puede observar detalladamente los indicadores de uso del agua.

Tabla 66. Indicadores de uso del agua.

Escenario sin tecnología, año 2022					
Cultivo	Tiempo riego (h)	Frecuencia de riego (días)	Vol.agua m ³ /ha/año	Productividad Agua (t/m ³)	Costo combustible (USD)
Aguacate	2,50	7	1.317,23	0,0091	364,16
Cacao	2,00	7	7.366,41	0,0001	84,75
Caña	5,36	19	49.772,47	0,0026	1510,67
Guanábana	1,50	7	720,14	0,0764	260,14
Guayaba	2,62	13	1.103,07	0,0077	143,18
Lima ácida Tahití	2,00	7	2.348,11	0,0095	134,50
Maíz	3,70	16	15.967,35	0,0005	1033,71
Maracuyá	4,50	2	97.880,74	0,0003	1170,64
Papaya	5,20	8	21.757,17	0,0023	803,95
Vid	3,70	6	8.489,75	0,0012	123,54
Escenario con tecnología, año 2023					
Cultivo	Tiempo riego (h)	Frecuencia de riego (días)	Vol.agua m ³ /ha/año	Productividad Agua (t/m ³)	Costo combustible (USD)
Aguacate	1,5	11	502,94	0,024	139,04
Cacao	0,7	11	1.546,95	0,000	17,80



Caña	2,0	18	19.603,58	0,005	595,00
Guanábana	1,0	15	224,04	0,245	80,93
Guayaba	0,7	10	361,24	0,027	46,89
Lima ácida Tahití	1,0	10	821,84	0,027	47,08
Maíz	0,7	15	3.038,11	0,003	196,68
Maracuyá	0,3	7	2.050,83	0,013	24,53
Papaya	0,7	10	2.209,19	0,032	81,63
Vid	1,0	15	917,81	0,017	13,36

Es claro que los productores del distrito de riego RUT están sobre-regando, haciendo uso no eficiente del agua. Desconocían completamente cómo controlar el riego, ellos solo aplican agua. En la **Tabla 67** se relaciona la diferencia en consumo de agua para riego entre los escenarios anteriormente planteados: sin y con tecnología, años 2022 y 2023, respectivamente.

Tabla 67. Cuantificación del ahorro en el uso del agua de riego años 2022 Vs 2023.

Cultivo	Diferencia en el uso del agua 2022-2023 (m ³ /ha/año)	Ahorro del agua (%)
Aguacate	814,29	61,82
Cacao	5.819,47	79,00
Caña	30.168,88	60,61
Guanábana	496,10	68,89
Guayaba	741,84	67,25
Lima ácida Tahití	1.526,27	65,00
Maíz	12.929,24	80,97
Maracuyá	95.829,91	97,90
Papaya	19.547,98	89,85
Vid	7.571,94	89,19

Obsérvese el caso del cultivo de papaya. Este cultivo posee sistemas de riego, al criterio de los productores, tecnificados, con dos líneas de goteo y camas altas para privilegiar el drenaje. Es claro que este drenaje es completamente necesario en este sistema productivo y bajo este régimen de riego.

Obsérvese que los cultivos que más agua consumen para el riego serán aquellos que más beneficios presentan al hacer un uso eficiente. Para el caso de la caña, la ganancia económica solo por bajar el consumo de combustible al pasar de 5,4 horas de riego a 2,0, es del 29%. Para el caso del maíz es del 36%, pasando de 3,7 horas por hectárea a 0,7 horas. Estos descuentos en el tiempo de riego se lograron midiendo directamente en el sitio de las raíces el momento en el que el agua penetra a esta profundidad y humedece el suelo hasta capacidad de campo. Este tiempo para el cacao, que es otro de los grandes consumidores de agua en el escenario sin tecnología, es de 2,0 horas, más al cuantificar lo que tarda el agua en aportar la humedad necesaria para el

cultivo, pasa a un riego de 0,7 horas; todo ello conlleva a una ganancia económica del 8,72%, solo por regar bien. En la **Tabla 68** se relaciona la ganancia que puede obtener cada cultivo solo por ahorra agua en el riego, sin que necesariamente aumente el rendimiento.

Tabla 68. Indicador de ganancia por ahorro en el uso del agua.

Cultivo	Rendimiento (t/ha/2022)	Rendimiento (t/ha/2023)	Rendimiento económico 2022	Rendimiento económico 2023	Costo combustible (USD 2022)	Costo combustible (USD 2023)	Ganancia (%)
Aguacate	12	12	12.454,03	12.679,14	364,16	139,04	1,81
Cacao	0,5	0,5	767,52	834,48	84,75	17,80	8,72
Caña	127,4	100	2.689,06	2.700,46	1.510,67	595,00	0,42
Guanábana	55	55	28.489,86	28.669,07	260,14	80,93	0,63
Guayaba	8,51	9,90	1.984,32	2.428,11	143,18	46,89	22,37
Lima ácida Tahití	22,4	22,4	11.065,50	11.152,92	134,50	47,08	0,79
Maíz	8,50	8,50	2.443,57	3.280,59	1.033,71	196,68	34,25
Maracuyá	26	26	15.374,82	16.520,93	1.170,64	24,53	7,45
Papaya	50	70	18.514,24	26.963,82	803,95	81,63	45,64
Vid	10	16	12.603,73	20.350,28	123,54	13,36	61,46

Conclusiones y recomendaciones

El uso de las herramientas asociadas a la agricultura 4.0, acopladas a la transferencia de datos, facilitada por las redes IoT, aumentan la probabilidad de hacer un uso eficiente del agua en la agricultura. Los trabajos logrados en el D.RUT y los beneficios logrados con el ahorro del agua muestran a la administración del distrito, que hacer una gestión del agua a escala de finca, acorde



con los verdaderos requerimientos de los cultivos y la capacidad de almacenamiento del suelo, es posible. Es claro que, con la caña de azúcar, con el sistema de riego que implementan en este cultivo, superficie, el ahorro del agua, en el tiempo, no será tan significativo como muestran los resultados de esta investigación, más podrán generar “la duda” o “motivación” en productores y administración del distrito para este cultivo. Otros productores, como los de frutales, fueron bastante receptivos, y aunque, el clima y lo corto del período experimental no permitió replicar de manea continuada los resultados, los ciclos evaluados dan una línea base. Los productores más receptivos e interesados fueron los de maíz, con ellos se logró un mayor acercamiento al uso eficiente del agua en la producción.

Se considera que se ha dado un paso importante en la digitalización de la agricultura con este proyecto, el apoyo de ASORUT, fue fundamental para tal fin. En la actualidad, a la fecha de la entrega de este informe, seis meses después de finalizada la fase experimental, se observa que la red sigue funcional y que el distrito está usando la información, incluso haciendo gestiones para ampliarla. Esto nos hace concluir que logramos el objetivo.

Los productores usuarios de la red quedaron debidamente capacitados en el uso de la información y están muy interesados en lo que se podría llamar la fase2 de este proyecto, ya que se vinculará el monitoreo directo a la planta por medio de dendrómetros de fruto y la información de estado hídrico actual de las parcelas, llegará a su celular por medio de un aplicativo Web que el proyecto “Agricultura "tropical" 4.0: gestión eficiente del agua” generará para tal fin. Este proyecto inició ejecución en el D.RUT el 16abril2024; este y el desarrollo del dendrómetro de Agrosavia, son un resultado directo de esta investigación.

Este proyecto se convierte en piloto para cualquier desarrollo tecnológico con redes IoT que se desee instalar en el Valle del Cauca y tal vez, en Colombia, considerando que una infraestructura con esta escala no existe en el país. Se espera con la fase2 ampliar la cobertura de capacitados e informar los beneficios logrados en uso del agua. Asimismo, el trabajo será objeto de desarrollo académicos, ya que por recursos la fase1 no logró vincular estudiantes. Una tesis fue propuesta, más no se tuvo recursos para cubrir los gastos del estudiante, aunque se le aportó la información.

4.4 CULTIVOS DE URUGUAY

Piloto tecnológico en el Junco, INIA Uruguay.

En el marco de la iniciativa **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”**, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - INIA Uruguay implementó un piloto tecnológico en la Parcela Experimental “El Junco”, ubicado en el norte del país en el departamento de Salto. El objetivo de este piloto tecnológico consiste la puesta en marcha y la validación de un paquete tecnológico-conceptual que permita a los agricultores de la región contar con herramientas modernas para el manejo del riego dentro de sus predios.

La propuesta abarcó el manejo del riego en pasturas permanentes con riego por gravedad en melgas (o bordos) y también con riego por aspersión (pivot central) en maíz y soja.

A partir de los resultados obtenidos en la parcela piloto (**Figura 181**) se validó la propuesta tecnológica, así como su operatividad a partir de fuentes de información pública.

El paquete conceptual-tecnológico implementado en la parcela piloto “El Junco”, incluye la implementación del manejo del riego a través de la metodología estandarizada conocida como **“coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia”**, que combina la propuesta de FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la incorporación de información satelital para el seguimiento del desarrollo del cultivo y la estimación de un coeficiente del cultivo basal (K_{cb}) a partir del índice de vegetación NDVI (Campos et al. 2010; Neale et al. 1989; Calera et al 2016).

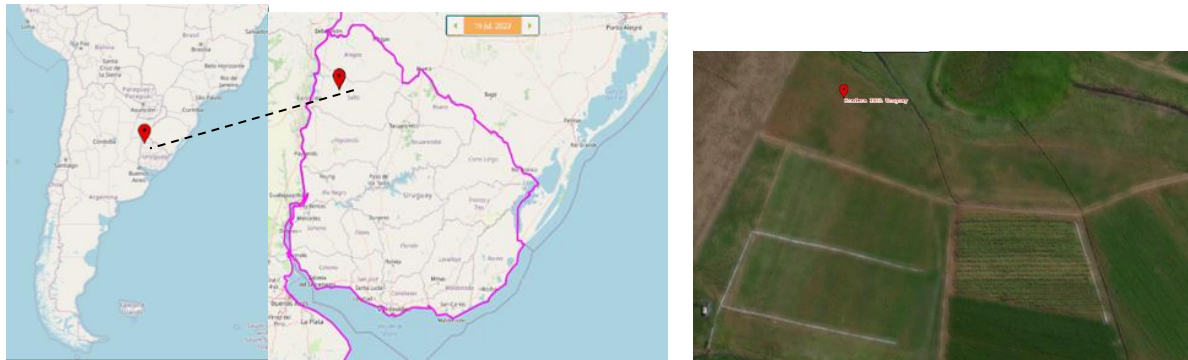


Figura 181. Ubicación de la parcela piloto “El Junco”, Salto Uruguay.

Materiales y métodos

Área de estudio: el piloto **tecnológico** en riego se implementó en la Parcela Experimental “El Junco”, en la cuenca del arroyo Tala, dentro de la Colonia Rubio, Salto (31°11'23.0" S, 57°22'32.7" O). En la región predomina el sistema ganadero, asociado a algunas empresas que hacen cultivos extensivos regados (maíz, soja) y en las zonas bajas se produce arroz, también existe en la región una pequeña cuenca de productores de leche. La parcela piloto tiene una superficie aproximada

de 6 ha con pasturas permanentes, sembradas en marzo de 2015.

El acceso del agua de riego se realiza por medio de un canal superficial abierto, que proviene de una represa ubicada a 3 km. Para registrar la cantidad de agua aplicada a los cultivos, en la entrada de la parcela piloto se cuenta con un caudalímetro (aforador) electromagnético (**Figura 182**) que registra el caudal instantáneo y el volumen de agua total aplicado en la temporada. El encendido y apagado del equipo es automático con el ingreso del agua a la tubería.



Figura 182. Infraestructura para el riego por gravedad en la parcela “El Junco”, caudalímetro volumétrico electromagnético y medidor de avance en entrada de la parcela piloto.

Características de suelo

En la parcela piloto, el suelo está clasificado como vertisol háplico, que corresponde a suelos profundos (horizonte A mayor a 60 cm), con fertilidad natural alta y buen drenaje (Duran, A., 1991).



Figura 183. Unidades de suelo (Coneat) y perfil de suelo en calicata modal en parcela piloto (Foto: Museo virtual de suelos).

De acuerdo a la descripción del perfil de suelo, se identifican 2 horizontes: uno superior hasta 70 - 80 cm de profundidad, con alta fertilidad natural, negro, con alto contenido de materia orgánica, bien drenado y luego un horizonte C de material parental. En la **Tabla 69** se detallan las características químicas del suelo.

Tabla 69. *Análisis químico de los suelos de la parcela piloto tecnológico año 2021.*

Identificación	Materia Orgánica %	CIC (meq/100g)	Potasio (meq/100g)	Sodio (meq/100g)	Calcio (meq/100g)	Magnesio (meq/100g)	Ac. Interc. (meq/100g)
El Junco Maku Microstar 0-20	4.7	33.72	0.50	0.28	25.50	7.36	0.08
El Junco Maku Microstar 20-40	4.2	37.34	0.62	0.31	28.40	7.90	0.09
El Junco Maku 0-20	4.9	31.10	0.48	0.28	23.10	7.14	0.09
El Junco Maku 20-40	4.3	35.02	0.61	0.31	25.90	8.13	0.07
El Junco Festuca Vieja 0-20	5.0	37.67	0.61	0.34	27.00	9.64	0.08
El Junco Festuca Vieja 20-40	4.8	39.11	0.65	0.31	28.20	9.84	0.11
El Junco Alfalfa 0-20	4.6	32.37	0.50	0.25	23.00	8.55	0.07
El Junco Alfalfa 20-40	4.8	36.99	0.54	0.30	26.10	9.98	0.07
El Junco Paspalum 0-20	4.3	36.81	0.56	0.39	28.00	7.80	0.06
El Junco Paspalum 20-40	4.3	38.17	0.63	0.31	29.20	7.98	0.05
El Junco Festuca Nueva 0-20	4.5	37.33	0.60	0.25	25.60	7.79	0.09
El Junco Festuca Nueva 20-40	3.7	40.56	0.64	0.34	27.40	12.13	0.05
El Junco TR 0-20	5.0	33.36	0.45	0.29	23.50	9.05	0.06
El Junco TR 20-40	4.3	37.55	0.54	0.33	26.10	10.48	0.10

CIC= capacidad de intercambio catiónico; Ac. Interc.= acidez intercambiable

Análisis físico: Las contantes hídricas del suelo fueron determinadas en el laboratorio de INIA Las Brujas a partir de muestras sin perturbar tomadas con anillos de 100 mL (**Tabla 70**).

Tabla 70. *Contenido volumétrico de agua a las distintas tensiones evaluadas en laboratorio. Muestras de suelo sin perturbar.*

Tensión de agua (cm H ₂ O)	Humedad Volumétrica (m ³ .m ⁻³)					
	Profundidad					
	0-20 cm	ds*	20-40 cm	ds*	40-60 cm	ds*
1	0,411	0,003	0,433	0,008	0,537	0,064
30	0,393	0,009	0,405	0,016	0,509	0,056
1000	0,373	0,009	0,379	0,018	0,488	0,052
5000	0,321	0,009	0,317	0,013	0,441	0,047
15000	0,314	0,009	0,308	0,014	0,432	0,046

*ds: desvío estándar

Características del clima

La evapotranspiración de referencia (ET_o) fue calculada a partir de los datos diarios registrados en una estación meteorológica (Davis Instruments, USA) ubicada en el sitio experimental (**Figura 184**).



Figura 184. *Estación meteorológica automática (Davis Vantage Pro). Establecimiento El Junco, Salto, Uruguay.*

Para el cálculo de la ETo se utilizó el software Ref-ET (Allen, 2016), que incluye los procedimientos descritos en el Manual de FAO N°56 (Allen et al, 1998). Los resultados de la evolución de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones ocurridas en la cuenca del Arroyo del Tala se presentan en la **Figura 185**. Las lluvias registradas durante las tres temporadas no alcanzaron para cubrir las necesidades de agua del cultivo estimadas a partir del cálculo de la evapotranspiración de referencia.

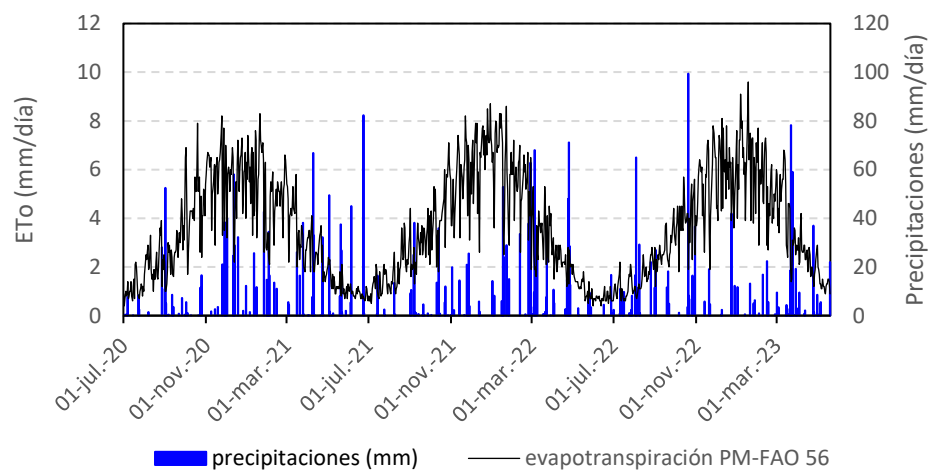


Figura 185. Evolución de la precipitación y la evapotranspiración (ETo) en la parcela piloto durante las tres temporadas evaluadas. Establecimiento El Junco, Salto, Uruguay.

Resultados Generales de los 3 cultivos estudiados (maíz, soja y pasturas)

El uso de la reflectancia del cultivo para estimar los coeficientes de cultivo (K_c y K_{cb}) es un procedimiento altamente utilizado a nivel internacional. Esta metodología de estudio ha tomado fuerza en los últimos años por la mayor disponibilidad de imágenes de satélites de acceso libre. En el caso de Uruguay, la resolución espacial, radiométrica y temporal del Sentinel 2 (A y B) permiten un agregado de valor importante en la aplicación de esta herramienta en el manejo del riego.

Hay que separar lo que pueda ser la evolución de los coeficientes del cultivo en condiciones sin limitantes de agua, nutrición o sanitarias, normalmente representadas con los valores de $ET_{c\text{ FAO-56}} = ETo \times K_{c\text{ Tabla}}$; de la obtención de los coeficientes del cultivo en condiciones reales de campo, donde posiblemente se puedan encontrar limitantes de agua. En este último caso, con restricciones de agua, asumimos que los valores de $K_{c\text{ NDVI}}$ y $K_{cb\text{ NDVI}}$ pueden ser utilizados en la estimación de $ET_{a\text{ AgriSat}} = K_{c\text{ NDVI}} \times ETo$; $ET_{a\text{ AgriSat}} \sim ET_{c\text{ ajustada}}$. Para estos casos asumimos que el valor de $K_{c\text{ NDVI}}$ y $K_{cb\text{ NDVI}}$ está también afectado por el K_s y podría ser usado en la estimación de la ET_a del cultivo.

Al comparar la ETa del modelo de BHS en forma independiente observamos que los valores promedio de cada corrida del modelo entran dentro de la mayoría de los días evaluados dentro del margen de dispersión de los valores obtenidos a través del NDVI, permitiendo en condiciones no óptimas desde el punto de vista del riego hacer inferencias de cómo va el cultivo, cuánto nos estamos apartando de las condiciones óptimas y que medidas de manejo del riego habría que hacer para mejorar el cultivo. Al mismo tiempo permite observar la dimensión de distribución espacial del cultivo dentro del área regada.

A modo de resumen general del manejo del riego en las parcelas piloto de maíz, soja y pasturas permanentes, se presenta el **Tabla 71** con los rendimientos promedios de los cultivos bajo riego que fueron monitoreados, la lámina de riego aplicada, la productividad del agua y las precipitaciones registradas entre los meses de octubre y marzo de cada zafra.

Tabla 71. Rendimiento de cada cultivo monitoreado en la parcela piloto, el riego aplicado, la productividad del agua y las precipitaciones registradas. Establecimiento El Junco, Salto, Uruguay.

Cultivo	Año	Rendimiento (kg/ha)	Riego (m ³ /ha)	Productividad del agua (kg/m ³)	pp(mm)
Maíz	2020-21	11.000	2.040	5.39	604
Maíz	2021-22	6.918	2.915	2.37	463.8
Maíz	2022-23	10.663	4.805	2.22	375.6
Soja	2020-21	2.222	805	2.76	604
Soja	2022-23	1.461	1.230	1.19	375.6
Pastura	2019-20	10.500	2.750	3.82	649.2
Pastura	2020-21	9.780	2.330	4.20	604
Pastura	2021-22	9.765	3.770	2.59	463.8

Piloto tecnológico en cultivo de soja.

Uruguay cuenta con una superficie del cultivo de soja de aproximadamente 1.000.000 ha con un rendimiento promedio de 2300 kg ha⁻¹. Estos rendimientos varían de acuerdo con las precipitaciones durante el verano ya que la gran mayoría del área del cultivo se realiza en secano. En la zona noroeste de Uruguay, la superficie de soja ronda en las 140.000 ha (MGAP, 2023), solo una pequeña área recibe riegos estratégicos durante el verano (1200 ha aproximadamente). Si bien el potencial del cultivo de soja está por encima de los 4000 kg ha⁻¹ (Montoya y Otero, 2019; Gimenez et al., 2017) el rendimiento promedio a nivel nacional y en particular en esta región del país tiene una variación muy marcada por las precipitaciones y los rendimientos están muy por debajo del potencial agronómico. Si bien el clima en el país es muy variable entre años y también durante el año, en general hay estudios de Otero (2017) que muestran que todos los años durante los meses de primavera y verano existe un déficit hídrico que afecta la producción de los cultivos de verano en mayor o menor medida. Sumado a esto existen estudios que muestran que el cambio climático podría provocar cada vez más eventos seguidos de déficit hídrico, lo cual eso afectaría la disponibilidad de agua para riego en la región. Por lo tanto, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de soja permitiría aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En el presente trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital con objeto de validar su uso en el cultivo de soja.

Materiales y Métodos

Los estudios se realizaron en el cultivo de soja bajo pivot central en la cuenca del arroyo Tala, en Salto (empresa Donistar S.C.) (31°09'16.00" S, 57°21'42.69" O) y en el establecimiento Los Olivos en Paysandú (empresa Los Abedules) (31°44'02.46" S, 57°58'06.17" O). Pivot de soja 2020-2021 y 2023-2024 (Figura 186).



Figura 186. Puntos de muestreo en los pivots. Establecimiento El Junco, Salto, Uruguay.



Muestreos de campo y seguimiento del cultivo.

En todos los casos, inmediatamente antes de la siembra en cada ciclo del cultivo se seleccionaron diferentes puntos dentro de cada círculo del pivot (14-30 puntos) los cuales representaban zonas de interés, por cambios en la pendiente o fase del suelo, por cambios en el tipo de suelo, o simplemente por cambios visuales de la instalación del cultivo.

En estos puntos periódicamente se registraron algunos parámetros en la planta. El contenido de clorofila medido con un dispositivo SPAD (Minolta, USA) en la tercera hoja desarrollada desde la parte superior, se midieron 3 a 5 plantas por sitio. El índice de área foliar (IAF) fue estimado quincenalmente a través de la intercepción solar en cada punto con un ceptómetro (LP-40, Meter, USA), se registró la intercepción de luz en cada sitio, cada medida consistió en un registro sobre la canopia de la planta y tres registros a la altura del suelo en forma oblicua y transversal a las hileras de plantación. También se registró la altura de la planta.

En el momento de la cosecha, en cada sitio de muestreo se cosecharon las plantas de soja en 2 metros lineales y se obtuvo el peso de los granos. Se corrigió el peso a 13% de humedad.

Caracterización del suelo.

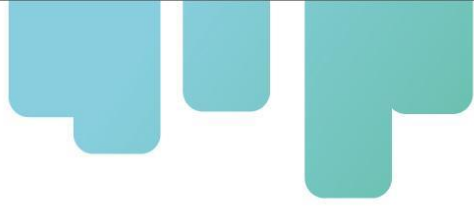
En cada sitio experimental se realizó la caracterización hídrica del perfil representativo de todo el pivot, determinando el contenido volumétrico de capacidad de campo (0,01 MPa) y punto de marchitez permanente (1,5 MPa) de cada horizonte. Las determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos de INIA-LB, con el método de ollas de presión (Richards, 1956).

Tabla 72. *Contenido volumétrico de agua (Hv%) a capacidad de campo (0,01 MPa) y punto de marchitez permanente (1,5 MPa) de los suelos utilizados.*

Tipo de Suelo	Ubicación	Profundidad (cm)	CC (Hv%)	PMP (Hv%)
Vertisol Háptico	El Junco	0-20	47.0	33.0
		20-40	57.0	40.0
		40-60	58.0	44.0
Pivot Maíz	Los Olivos	0-20	38.3	20.1
		20-60		40.5 22.3
Pivot Soja	Los Olivos	0-20		40.8 20.6
		20-60		40.2 19.6

Obtención de datos climáticos y seguimiento del riego.

Los datos climáticos fueron obtenidos en el ciclo 2020-2021 desde una torre Eddy Covariance



(LICOR, USA) instalada cerca de los pivot, el resto de los ciclos se utilizaron los datos de la estación meteorológica Davis (USA) instalada en el predio a menos de 1 km del experimento, usando las variables diarias de precipitación, temperatura del aire a 1,5 m del suelo, humedad del aire, velocidad promedio y máxima del viento, radiación global incidente y presión atmosférica. La evapotranspiración diaria de referencia (ET_o, PM-56) se calculó siguiendo el procedimiento del manual de FAO-56 y el software Ref-ET (Allen, et al. 2016). Se utilizó un K_c para la soja de 0,50; 1,15; 0,50 para las etapas de inicio, medio y final del ciclo del cultivo (Allen, et al. 1998). Se registraron en todos los casos, la fenología del cultivo y las láminas de riego aplicadas.

Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_{C FAO-56}) se utilizó la ecuación 1, compuesta por la ET_o de referencia diaria y el K_c obtenido de Allen et al. (1998).

Ec 1. $ETC_{FAO-56} = ETo \times Kc_{Tabla}$, sin limitantes de agua.

Índice de vegetación y K_c-K_{cb}.

Se seleccionó el índice normalizado de vegetación (NDVI) como el índice de reflectancia más apropiado para estimar el K_c y K_{cb} del cultivo (Campos et al. 2010; Calera et al 2016). Para el manejo de los datos satelitales del NDVI, en su dimensión de distribución espacial, se utilizó la plataforma AgriSatwebGIS®, desarrollada con la Universidad de Castilla La Mancha (2016); de la misma se obtuvieron las imágenes de los pivot y los datos de NDVI de cada uno de los puntos muestreados durante todo el ciclo del cultivo. La plataforma AgriSatwebGIS® trabaja con imágenes Sentinel 2 a/b, lo que permite una resolución espacial y radiométrica de calidad para el manejo del riego; así como el período de revisita suficientemente bueno para realizar un correcto manejo del agua de riego. Para el cálculo del NDVI se usaron las bandas radiométricas con una resolución de 20 m. Se descartaron los días con nubes.

Los valores de NDVI de los puntos seleccionados en cada pivot a lo largo del ciclo, se utilizaron para calcular el K_c y K_{cb} de cada punto de muestreo con las siguientes ecuaciones:

Ec 2. $Kcb_{NDVI} = 1,44 NDVI - 0,1$ (Campos et al. 2010; Neale et al. 1989; Calera et al 2016)

Ec 3. $Kc_{NDVI} = 1,25 NDVI + 0,1$ (Calera et al 2016)

Para obtener la ET_a instantánea del cultivo (ET_{a AgriSat}) o también la ET_c ajustada por el contenido de agua del suelo (K_s) en cada uno de los puntos muestreados se multiplicó el K_c estimado a través del NDVI (K_{cNDVI}), por la ET_o de referencia obtenida desde los datos meteorológicos diarios a lo largo del desarrollo del cada cultivo en cada pivot, con la ecuación 4.

Ec 4. $ETa_{AgriSat} = Kc_{NDVI} \times ETo$; $ETa_{AgriSat} \sim ETc_{ajustada}$.

Modelo de balance de agua en el suelo

En forma independiente, para el suelo representativo de cada sitio experimental se realizó un balance de agua en el suelo con un modelo que permitiera configurar los parámetros del riego realizado. Se utilizó el modelo SIMDualK_c (Rosa et al, 2010), ampliamente conocido y utilizado en la academia y en investigación en Uruguay. Se obtuvo un balance promedio de cada sitio y año

del cultivo, con los parámetros climáticos registrados, las condiciones del cultivo (K_c y K_{cb} de FAO-56), las fechas fenológicas, las tolerancias permitidas de agotamiento de agua permitida (p) y las láminas de riego aplicadas en cada caso.

En cada sitio experimental se tenía una descripción detallada del perfil del suelo.

Del balance de agua en el suelo obtenido se utilizó el valor diario de ET_a ($ET_{aSIMDualKc}$) en cada pivot, y se relacionó este valor promedio de ET_a , con los valores de los puntos ($ET_{aAgriSat}$) y con la $ET_{cFAO-56}$ calculada a través de los valores de tabla (Allen, et al 1998).

Resultados

La plataforma AgriSat facilitó enormemente la operación de la búsqueda de los puntos muestreados en el campo y los correspondientes valores de NDVI (Sentinel 2). La única limitación de la utilización masiva del método es la nubosidad de la región de Uruguay, como podemos ver en la **Figura 187** con espacios de tiempo del cultivo sin datos.

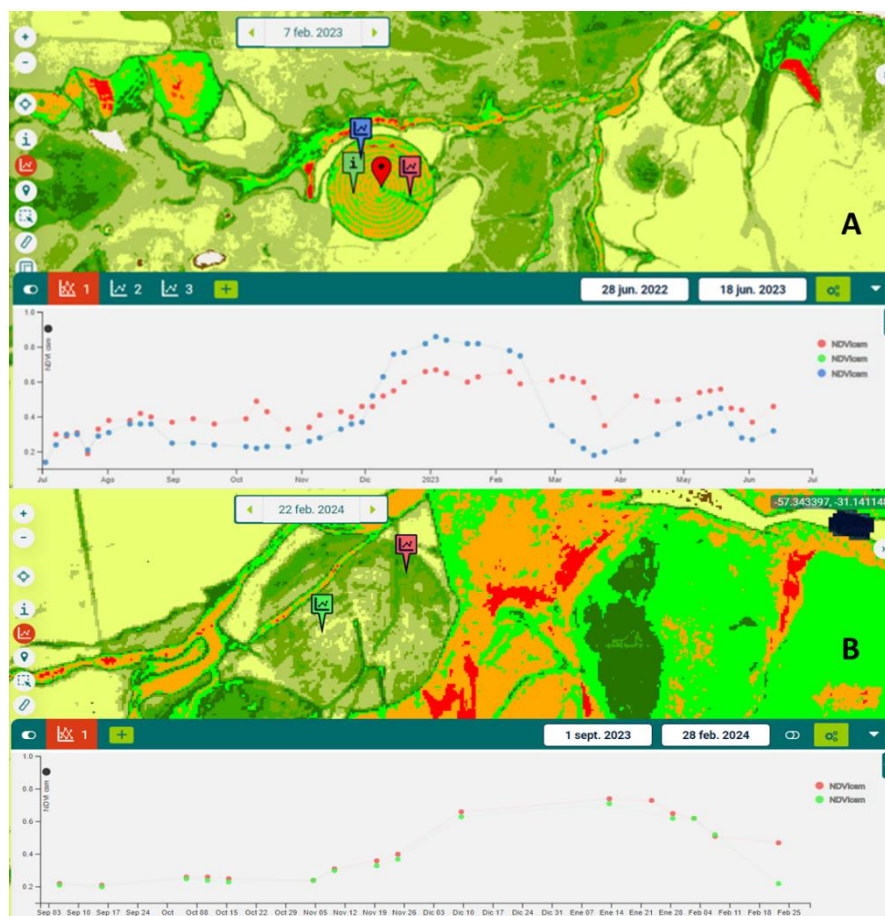


Figura 187. Visualización del NDVI en la plataforma AgriSat. Superior. Pivot 2022-2023 y evolución del NDVI de dos puntos de muestreo, en un ciclo de baja nubosidad. Inferior. Pivot 2023-2024 y evolución del NDVI de dos puntos de muestreo, en un ciclo de cultivo sin datos.

Evolución del NDVI durante el ciclo del cultivo.

La evolución de la dispersión espacial del NDVI dentro de los pivots, fue consistente con el manejo del agua en el mismo. En el pivot de soja 2020-2021 (**Figura 188**), donde por razones operativas de la empresa, el riego debió restringirse y en definitiva no realizar un correcto riego de acuerdo a las necesidades del cultivo, la dispersión de los valores del NDVI dentro del pivot aumentaron considerablemente, especialmente en la soja, donde se regó solo el primer mes desde la siembra.

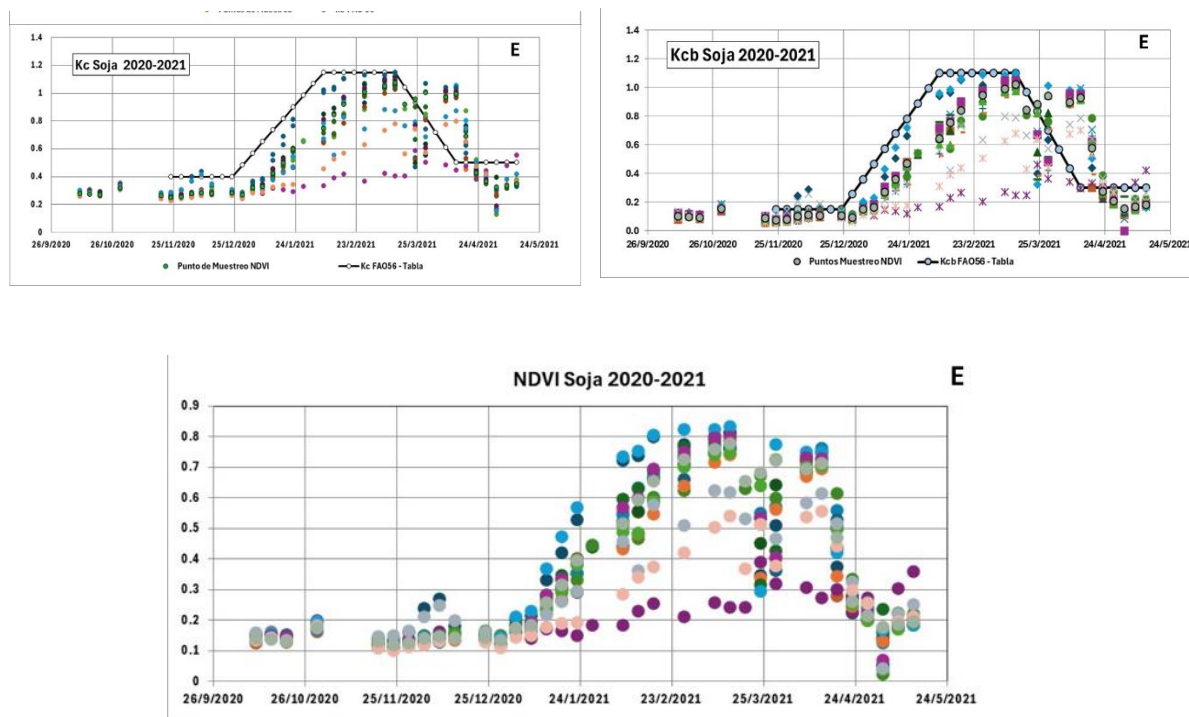


Figura 188. Evolución del NDVI en los puntos muestreados en el pivot de soja en El Junco, zafra 2020-21

Evolución del Kc y Kcb del cultivo

La evolución del Kc y Kcb estimados a través del NDVI, presentaron la misma dispersión y evolución que el NDVI, reflejando las buenas o malas condiciones del manejo del riego (**Figura 189**). Cuando se compara con el Kc y Kcb de tabla (FAO-56) (línea negra), sería esperable que los puntos muestreados tuvieran la misma forma que la curva teórica, indicando que fueron bien regados. Sin embargo, en la evolución del Kc y Kcb del pivot presentado en la **Figura 189**, el riego debería ser mejorado para estar más cerca de la línea de esos coeficientes determinados teóricamente por tabla.

Por otro lado, en las dos situaciones de mal o nulo riego (**Figura 189**) el desarrollo del cultivo fue limitado en varios sitios dentro del pivot donde la transpiración fue limitada, evidenciada por la diferencia entre los valores muestreados y la línea del Kcb teórico o en condiciones óptimas de

producción (FAO-56). Posiblemente esta reducción se pueda explicar por la falta de agua en los dos cultivos.

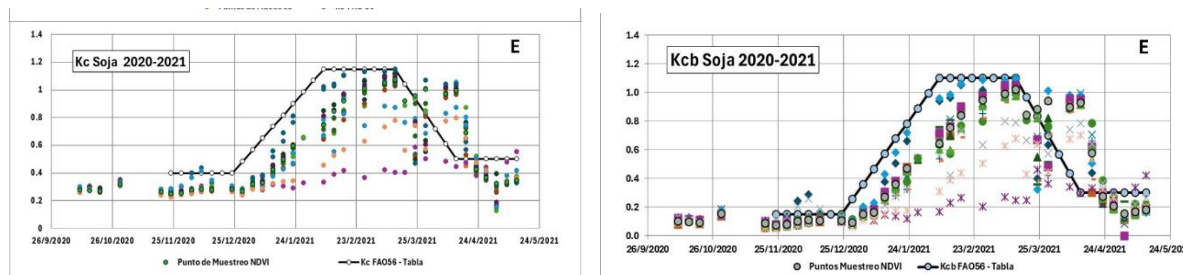


Figura 189. Evolución del Kc y Kcb de tabla (FAO-56) (línea entera) y Kc obtenido del NDVI (plataforma AgriSat), círculos son los puntos de muestreo en el pivot de soja en Los Olivos. Zafra 2020-21.

Evolución de la evaporación del cultivo (ETc FAO-56), la evaporación actual promedio estimada a través del modelo de balance hídrico del suelo (ETa SIMDualKc) y la evapotranspiración actual (ETa AgriSat)

La ETc FAO-56 fue superior a las demás formas de cálculo de la ET en casi todas las fechas analizadas, los valores de Kc y Kcb utilizados fueron obtenidos de la propuesta de FAO-56 en condiciones sin restricciones del cultivo de agua, nutrientes ni sanitarias (**Figura 190**) y calculada a través de la ETo del día del análisis (día de pasaje del satélite).

Al utilizar los valores de Kc_{NDVI} y Kcb_{NDVI} calculados a través del NDVI para estimar la ET instantánea (ETa_{AgriSat}) de cada uno de los puntos de muestreo dentro de los pivots, vemos una amplia o reducida dispersión de los valores de acuerdo a como se haya hecho el manejo del riego ese año. Este valor de ETa_{AgriSat} o instantáneo (estimado en última instancia por el NDVI), puede representar muy bien la ETc ajustada ósea la ETc del cultivo ajustada por las condiciones de agua del suelo, ósea incluyendo las condiciones en que pueda haber una limitante de agua en el suelo (Ks). De esta manera observamos como los valores de ETa_{AgriSat} siguen el desarrollo del cultivo, pero tienen un valor menor a la ETc de FAO56.

Para chequear esta hipótesis se simuló el contenido de agua del suelo en los pivots de cada año. El modelo SIMDualKc tiene la versatilidad de poder ajustar varios parámetros que influyen en el balance de agua en el suelo; parámetros fenológicos, del cultivo, del suelo, del método de riego y forma del manejo del agua de riego en general, además de los parámetros climáticos.

Uno de los resultados de su simulación es la estimación de la evapotranspiración actual del cultivo (ETa_{SIMDualKc}) promedio. Este valor de ETa_{SIMDualKc} es calculado diariamente, y representa un valor promedio de los parámetros puestos en la simulación.

Para el cálculo de la ETa_{SIMDualKc} el modelo toma en cuenta el Kc, Kcb y Ks del cultivo, lo que nos da un valor independiente de la ETc ajustada del cultivo (ETa_{SIMDualKc}) que podemos comparar con la ETc FAO-56, y con la ETa_{AgriSat} (**Figura 190**).

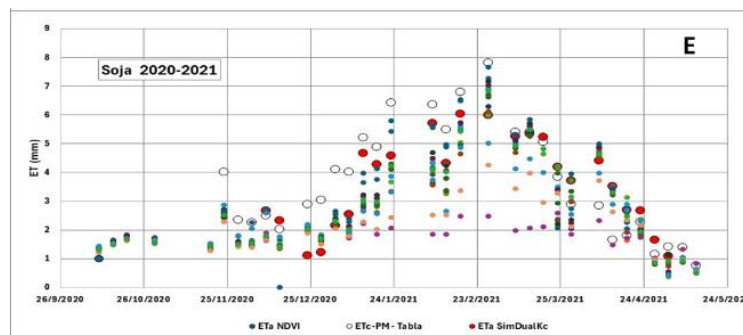


Figura 190. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (FAO-56) (círculos blancos), evapotranspiración actual estimada a través del BHS (SIMDualKc) (círculos rojos) y evapotranspiración actual a través del NDVI-Kc (puntos) en el pivot de soja en Los Olivos, zafra 202-21.

Discusión

El uso de la reflectancia del cultivo para estimar los coeficientes de cultivo (Kc y Kcb) es un procedimiento altamente conocido en la academia internacional, apoyado por una gran cantidad de trabajos científicos. La utilización de estos conceptos ha tomado fuerza en los últimos años por la mayor disponibilidad de satélites de acceso libre, que permiten obtener las imágenes apropiadas. En nuestro caso, en particular con el Sentinel 2, que por su resolución espacial, radiométrica y temporal permiten un agregado de valor importante a este procedimiento, en este caso en aplicaciones del manejo del riego.

Hay que separar lo que pueda ser la evolución de los coeficientes del cultivo en condiciones sin limitantes de agua, nutrición o sanitarias, normalmente representadas con los valores de $ET_c_{FAO-56} = ET_o \times Kc_{Tabla}$; de la obtención de los coeficientes del cultivo en condiciones reales de campo, donde posiblemente se puedan encontrar limitantes de agua. En este último caso, con restricciones de agua, asumimos que los valores de Kc_{NDVI} y Kcb_{NDVI} pueden ser utilizados en la estimación de $ETa_{AgriSat} = Kc_{NDVI} \times ET_o$; $ETa_{AgriSat} \sim ETc_{ajustada}$. Para estos casos asumimos que el valor de Kc_{NDVI} y Kcb_{NDVI} está también afectado por el Ks y podría ser usado en la estimación de la ETa del cultivo.

Al comparar la ETa del modelo de BHS en forma independiente observamos que los valores promedio de cada corrida del modelo entran dentro de la mayoría de los días evaluados dentro del margen de dispersión de los valores obtenidos a través del NDVI, permitiendo en condiciones no óptimas desde el punto de vista del riego hacer inferencias de cómo va el cultivo, cuánto nos estamos apartando de las condiciones óptimas y que medidas de manejo del riego habría que hacer para mejorar el cultivo. Al mismo tiempo observar la dimensión de distribución espacial del cultivo dentro del pivot.



Conclusiones

En condiciones del cultivo con limitantes de agua en el suelo (como es en general el riego de soja en Uruguay), la estimación de los coeficientes del cultivo obtenidos a través de la reflectancia (NDVI) están afectados por el coeficiente de estrés (K_s) e integralmente podrían ser utilizados para calcular la ETa del cultivo y ver su dispersión espacial dentro del área de riego (Fig. 5).

Ambos casos fueron comparados con la estimación de la ETa a través de un BHS, dando como resultado una importante concordancia entre este valor de ETa con los valores de $ETa_{AgriSat}$ obtenidos a través del NDVI.

Piloto tecnológico en cultivo de maíz.

Uruguay cuenta con una superficie del cultivo de maíz de aproximadamente 188.000 ha con un rendimiento promedio de 5500 kg ha⁻¹ (variación entre 1500 y 7600 dependiendo de las lluvias). Estos rendimientos varían de acuerdo con las precipitaciones durante el verano ya que más del 80% del área del cultivo se realiza en secano. El rendimiento promedio del cultivo de maíz bajo riego a nivel nacional es de 7600 kg ha⁻¹, sin embargo, existe un potencial de rendimiento en la zona litoral oeste y en particular en el litoral norte de alcanzar rendimientos por encima de los 15.000 kg ha⁻¹ (Otero, 2023, com. pers.; Gimenez, 2017). Si bien el clima en el país es muy variable entre años y también durante el año, en general hay estudios de Otero (2017) que muestran que todos los años durante los meses de primavera y verano existe un déficit hídrico que afecta la producción de los cultivos de verano en mayor o menor medida. Sumado a esto existen estudios que muestran que el cambio climático podría provocar cada vez más eventos seguidos de déficit hídrico, lo cual eso afectaría la disponibilidad de agua para riego en la región. Por lo tanto, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de maíz permitiría aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En el presente trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital con objeto de validar su uso en el cultivo de maíz.

Materiales y Métodos

Los estudios se realizaron en el cultivo de maíz bajo pivot central en la cuenca del arroyo Tala, en Salto (empresa Donistar S.C.) y en el establecimiento Los Olivos en Paysandú (empresa Los Abedules). Se realizó el estudio durante las zafras de riego 2020-2021, 2021-2022 y 2023-2024.

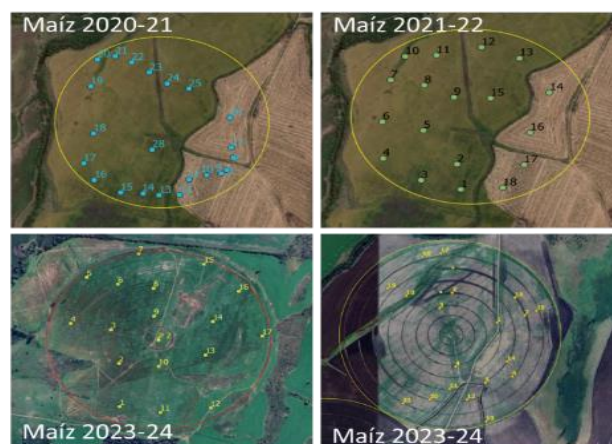


Figura 191. Puntos de muestreo en los pivots.



Muestreos de campo y seguimiento del cultivo.

En todos los casos, inmediatamente antes de la siembra en cada ciclo del cultivo se seleccionaron diferentes puntos dentro de cada círculo del pivot (14-30 puntos) los cuales representaban zonas de interés, por cambios en la pendiente o fase del suelo, por cambios en el tipo de suelo, o simplemente por cambios visuales de la instalación del cultivo.

En estos puntos periódicamente se registraron algunos parámetros en la planta. El contenido de clorofila medido con un dispositivo SPAD (Minolta, USA) en la tercera hoja desarrollada desde la parte superior, se midieron 3 a 5 plantas por sitio. El índice de área foliar (IAF) fue estimado quincenalmente a través de la intercepción solar en cada punto con un ceptómetro (LP-40, Meter, USA), se registró la intercepción de luz en cada sitio, cada medida consistió en un registro sobre la canopia de la planta y tres registros a la altura del suelo en forma oblicua y transversal a las hileras de plantación. También se registró la altura de la planta.

En el momento de la cosecha, en cada sitio de muestreo se cosecharon las plantas de maíz en 2 metros lineales y se obtuvo el peso de los granos. Se corrigió el peso a 13% de humedad.

Caracterización del suelo.

En cada sitio experimental se realizó la caracterización hídrica del perfil representativo de todo el pivot, determinando el contenido volumétrico de capacidad de campo (0,01 MPa) y punto de marchitez permanente (1,5 MPa) de cada horizonte. Las determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos de INIA-LB, con el método de ollas de presión (Richards, 1956) (**Tabla 73**).

Tabla 73. *Contenido volumétrico de agua (Hv%) a capacidad de campo (0,01 Mpa) y punto de marchitez permanente (1,5 MPa) de los suelos utilizados.*

Tipo de Suelo	Ubicación	Profundidad (cm)	CC (Hv%)	PMP (Hv%)
Vertisol Háplico	El Junco	0-20	47.0	33.0
		20-40	57.0	40.0
		40-60	58.0	44.0
Pivot Maíz	Los Olivos	0-20	38.3	20.1
		20-60	40.5	22.3
Pivot Soja	Los Olivos	0-20	40.8	20.6
		20-60	40.2	19.6

Obtención de datos climáticos y seguimiento del riego.

Los datos climáticos fueron obtenidos en el ciclo 2020-2021 y 2021-2022 desde una torre Eddy

Covariance (LICOR, USA) instalada cerca de los pivot, el resto de los ciclos se utilizaron los datos de la estación meteorológica Davis (USA) instalada en el predio a menos de 1 km del experimento, usando las variables diarias de precipitación, temperatura del aire a 1,5 m del suelo, humedad del aire, velocidad promedio y máxima del viento, radiación global incidente y presión atmosférica. La evapotranspiración diaria de referencia (ET_o, PM-56) se calculó siguiendo el procedimiento de la guía FAO-56 y el software Ref-ET (Allen, et al. 2016). Se utilizó un K_{cTabla} para el maíz de grano de 0,30; 1,20; 0,40, para las etapas de inicio, medio y final del ciclo del cultivo (Allen, et al. 1998). Se registraron en todos los casos, la fenología del cultivo y las láminas de riego aplicadas.

Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_{c FAO-56}) se utilizó la ecuación 1, compuesta por la ET_o de referencia diaria y el K_c obtenido de Allen et al. (1998).

Ec 1. $ET_{c\text{ FAO-56}} = ET_o \times K_{c\text{Tabla}}$, sin limitantes de agua.

Índice de vegetación y K_c-K_{cb}.

Se seleccionó el índice normalizado de vegetación (NDVI) como el índice de reflectancia más apropiado para estimar el K_c y K_{cb} del cultivo (Campos et al. 2010; Calera et al 2016). Para el manejo de los datos satelitales del NDVI, en su dimensión de distribución espacial, se utilizó la plataforma a AgriSatwebGIS®, desarrollada con la Universidad de Castilla La Mancha (2016); de la misma se obtuvieron las imágenes de los pivot y los datos de NDVI de cada uno de los puntos muestreados durante todo el ciclo del cultivo. La plataforma AgriSatwebGIS® trabaja con imágenes Sentinel 2 a/b, lo que permite una resolución espacial y radiométrica de calidad para el manejo del riego; así como el período de revisita suficientemente bueno para realizar un correcto manejo del agua de riego. Para el cálculo del NDVI se usaron las bandas radiométricas con una resolución de 20 m. Se descartaron los días con nubes.

Los valores de NDVI de los puntos seleccionados en cada pivot a lo largo del ciclo, se utilizaron para calcular el K_c y K_{cb} de cada punto de muestreo con las siguientes ecuaciones:

Ec 2. $K_{cb\text{ NDVI}} = 1,44\text{ NDVI} - 0,1$ (Campos et al. 2010; Neale et al. 1989; Calera et al 2016)

Ec 3. $K_{c\text{ NDVI}} = 1,25\text{ NDVI} + 0,1$ (Calera et al 2016)

Para obtener la ET_a instantánea del cultivo (ET_{aAgriSat}) o también la ET_c ajustada por el contenido de agua del suelo (K_s) en cada uno de los puntos muestreados se multiplicó el K_c estimado a través del NDVI (K_{cNDVI}), por la ET_o de referencia obtenida desde los datos meteorológicos diarios a lo largo del desarrollo del cada cultivo en cada pivot, con la ecuación 4.

Ec 4. $ET_{a\text{ AgriSat}} = K_{cNDVI} \times ET_o$; $ET_{a\text{ AgriSat}} \sim ET_c\text{ ajustada}$.

Modelo de balance de agua en el suelo

En forma independiente, para el suelo representativo de cada sitio experimental se realizó un balance de agua en el suelo con un modelo que permitiera configurar los parámetros del riego realizado. Se utilizó el modelo SIMDualK_c (Rosa et al, 2010), ampliamente conocido por la investigación y la academia en Uruguay. Se obtuvo un balance promedio de cada sitio y año del

cultivo, con los parámetros climáticos registrados, las condiciones del cultivo (K_c y K_{cb} de FAO-56), las fechas fenológicas, las tolerancias permitidas de agotamiento de agua permitida (p) y las láminas de riego aplicadas en cada caso.

En cada sitio experimental se tenía una descripción detallada del perfil del suelo.

Del balance de agua en el suelo obtenido se utilizó el valor diario de ET_a ($(ET_{aSIMDualKc})$ en cada pivot, y se relacionó este valor promedio de ET_a , con los valores de los puntos ($ET_{aAgriSat}$) y con la $ET_{cFAO-56}$ calculada a través de los valores de tabla (Allen, et al 1998).

Resultados

La plataforma AgriSat facilitó enormemente la operación de la búsqueda de los puntos muestreados en el campo y los correspondientes valores de NDVI (Sentinel 2). La única limitación del método es la nubosidad de la región de Uruguay, como podemos ver en la **Figura 192**, con espacios de tiempo del cultivo sin datos.

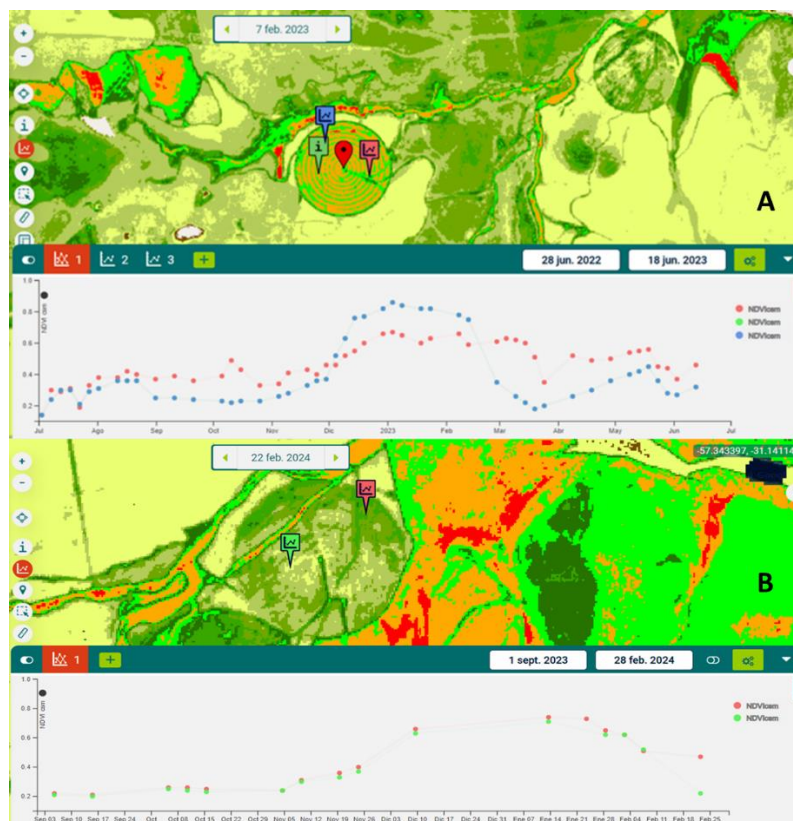


Figura 192. Visualización del NDVI en la plataforma AgriSat. Superior. Pivot 2022-2023 y evolución del NDVI de dos puntos de muestreo, en un ciclo de baja nubosidad. Inferior. Pivot 2023-2024 y evolución del NDVI de dos puntos de muestreo, en un ciclo de alta nubosidad. Ambos pivots en El Junco, Salto.

Evolución del NDVI durante el ciclo del cultivo.

La evolución de la dispersión espacial del NDVI dentro de los pivots, fue consistente con el manejo del agua en el mismo. En el pivot de maíz 2020-2021 (El Junco), maíz 2023-2024 (El Junco) y maíz 2023-2024 (Los Olivos), **Figura 193 A, C y D** respectivamente, el riego realizado fue bueno y los valores muestran una baja dispersión de entre ellos en cada una de las fechas analizadas. Por otro lado, en el pivot de maíz 2021-2022, donde por razones operativas de la empresa, el riego debió restringirse y en definitiva no realizar un correcto riego de acuerdo a las necesidades del cultivo, la dispersión de los valores del NDVI dentro del pivot aumentaron considerablemente.

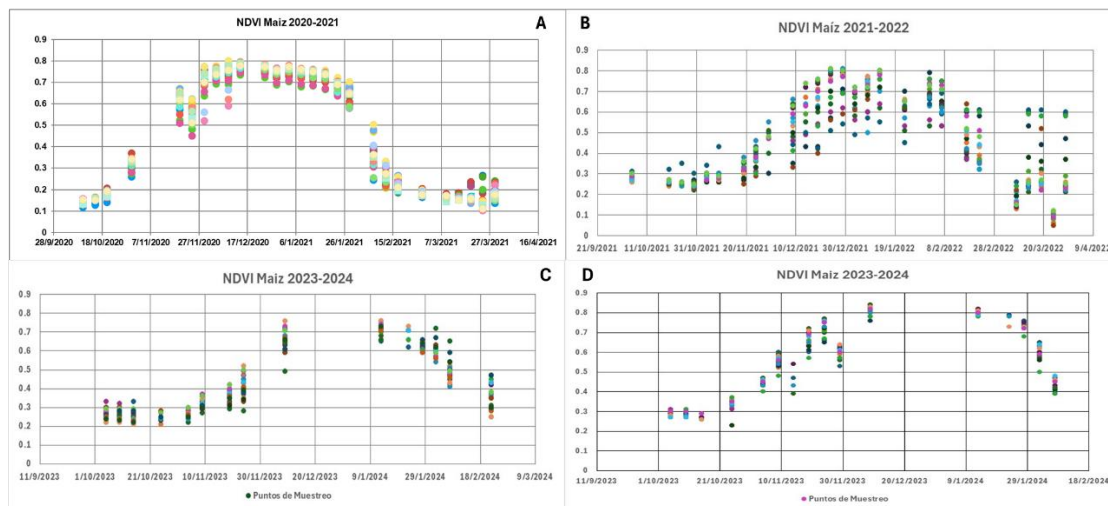


Figura 193. Evolución del NDVI en los puntos muestreados en los pivots en los diferentes sitios. A) Pivot de maíz 2020-2021 (El Junco). B) Pivot de maíz 2021-2022 (El Junco). C) Pivot de maíz 2023-2024 (El Junco). D) Pivot de maíz 2023-2024 (Los Olivos).

Evolución del Kc y Kcb del cultivo

La evolución del Kc y Kcb estimados a través del NDVI, presentaron la misma dispersión y evolución que el NDVI, reflejando las buenas o malas condiciones del manejo del riego. Cuando se compara con el Kc y Kcb de tabla (FAO-56) (línea negra), se observa en términos generales mantienen la forma esperada con el desarrollo del cultivo, especialmente los sitios mejor regados (**Figura 194** y **Figura 195, A y D**). Sin embargo, en los sitios B y C (**Figura 194 y Figura 195**) el riego debería ser mejorado para estar más cerca de la línea del Kc o Kcb teórico de tabla. En ambos casos, el rendimiento promedio de los puntos muestreados fue de 11 y 9 ton ha⁻¹ respectivamente, cuando se podría esperar para este tipo de suelo y manejo que el rendimiento promedio sea cercano a 13 o 14 ton ha⁻¹ o más.

El pivot de maíz de Los Olivos (**Figura 194 y Figura 195, D**) fue manejado con un criterio apropiado para lograr rendimientos máximos, con un riego más detallado y oportuno. Esto se refleja en la concordancia entre los valores calculados de los puntos muestreados del Kc y Kcb a través del NDVI y la línea teórica del Kc y Kcb sugerida por Allen et al (1998).

Por otro lado, en las dos situaciones de mal o nulo riego (**Figura 194**Figura 195, B) el desarrollo del cultivo fue limitado en varios sitios dentro del pivot donde la transpiración fue limitada, evidenciada por la diferencia entre los valores muestreados y la línea del Kcb teórico (FAO-56). Posiblemente esta reducción se pueda explicar por la falta de agua en los dos cultivos.

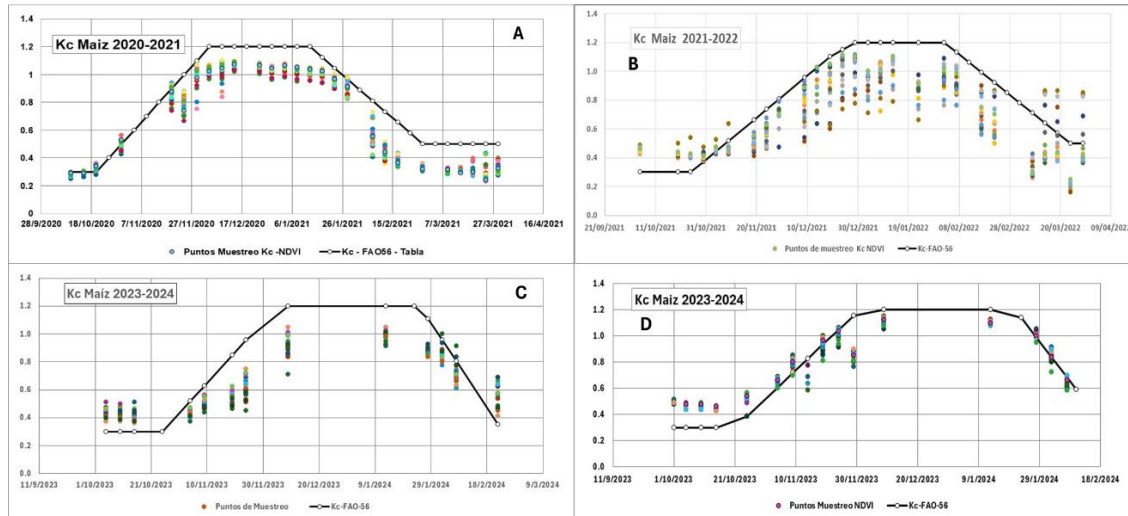


Figura 194. Evolución del Kc de tabla (FAO-56) (línea entera) y Kc obtenido del NDVI (plataforma AgriSat), círculos son los puntos de muestreo en los pivots en los diferentes sitios. A) Pivot de maíz 2020-2021 (El Junco). B) Pivot de maíz 2021-2022 (El Junco). C) Pivot de maíz 2023-2024 (El Junco). D) Pivot de maíz2023-2024 (Los Olivos).

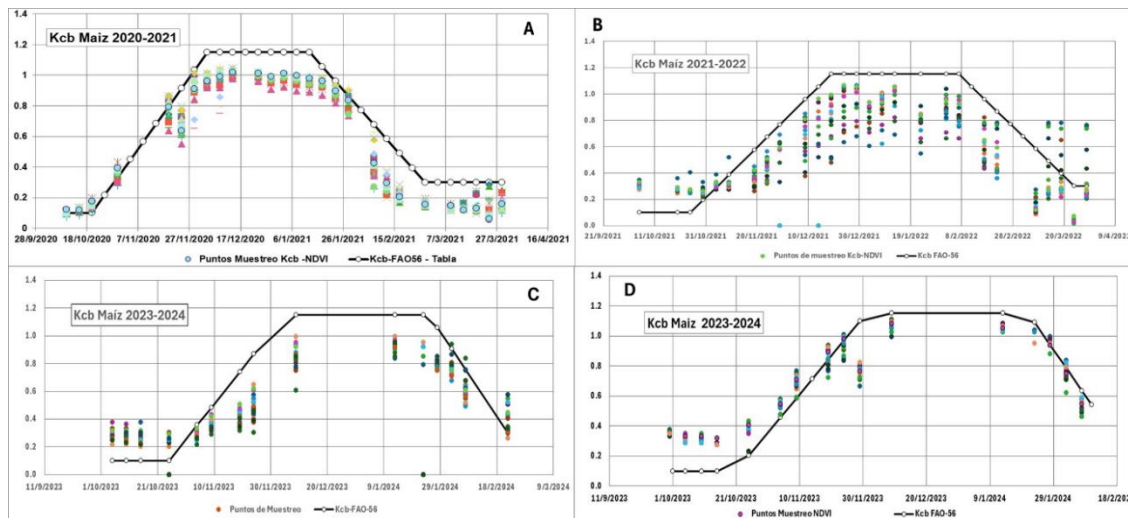


Figura 195. Evolución del Kcb de tabla (FAO-56) (línea entera) y Kcb obtenido del NDVI (plataforma AgriSat), círculos son los puntos de muestreo en los pivots en los diferentes sitios. A) Pivot de maíz 2020-2021 (El Junco). B) Pivot de maíz 2021-2022 (El Junco). C) Pivot de maíz 2023-2024 (El Junco). D) Pivot de maíz2023-2024 (Los Olivos).



Evolución de la evaporación del cultivo (ET_c FAO-56), la evaporación actual promedio estimada a través del modelo de balance hídrico del suelo (ET_a SIMDualKc) y la evapotranspiración actual (ET_a AgriSat)

La ET_c FAO-56 fue superior a las demás formas de cálculo de la ET en casi todas las fechas analizadas, los valores de Kc y Kcb utilizados fueron obtenidos de las propuestas de FAO-56 en condiciones sin restricciones del cultivo de agua, nutrientes ni sanitarias (**Figura 196**) y calculada a través de la ET_o del día del análisis (día de pasaje del satélite).

Al utilizar los valores de Kc_{NDVI} y Kcb_{NDVI} calculados a través del NDVI para estimar la ET instantánea (ET_a AgriSat) de cada uno de los puntos de muestreo dentro de los pivots, vemos una amplia o reducida dispersión de los valores de acuerdo a como se haya hecho el manejo del riego ese año. Este valor de ET_a AgriSat o instantáneo (estimado en última instancia por el NDVI), puede representar muy bien la ET_c ajustada ósea la ET_c del cultivo ajustada por las condiciones de agua del suelo, ósea incluyendo las condiciones en que pueda haber una limitante de agua en el suelo (K_s). De esta manera se observa como los valores de ET_a AgriSat siguen el desarrollo del cultivo, pero tienen un valor menor a la ET_c de FAO56, a excepción de aquellos sitios donde se haya hecho un mal manejo del riego (**Figura 196 D**).

Para chequear esta hipótesis se simuló el contenido de agua del suelo en los pivots de cada año. El modelo SIMDualKc tiene la versatilidad de poder ajustar varios parámetros que influyen el balance de agua en el suelo; parámetros fenológicos, del cultivo, del suelo, del método de riego y forma del manejo del agua de riego en general, además de los parámetros climáticos.

Uno de los resultados de su simulación es la estimación de la evapotranspiración actual del cultivo (ET_a SIMDualKc) promedio. Este valor de ET_a SIMDualKc es calculado diariamente, y representa un valor promedio de los parámetros puestos en la simulación.

Para el cálculo de la ET_a SIMDualKc el modelo toma en cuenta el Kc, Kcb y K_s del cultivo, lo que nos da un valor independiente de la ET_c ajustada del cultivo (ET_a SIMDualKc) que podemos comparar con la ET_c FAO-56, y con la ET_a AgriSat (**Figura 196**).

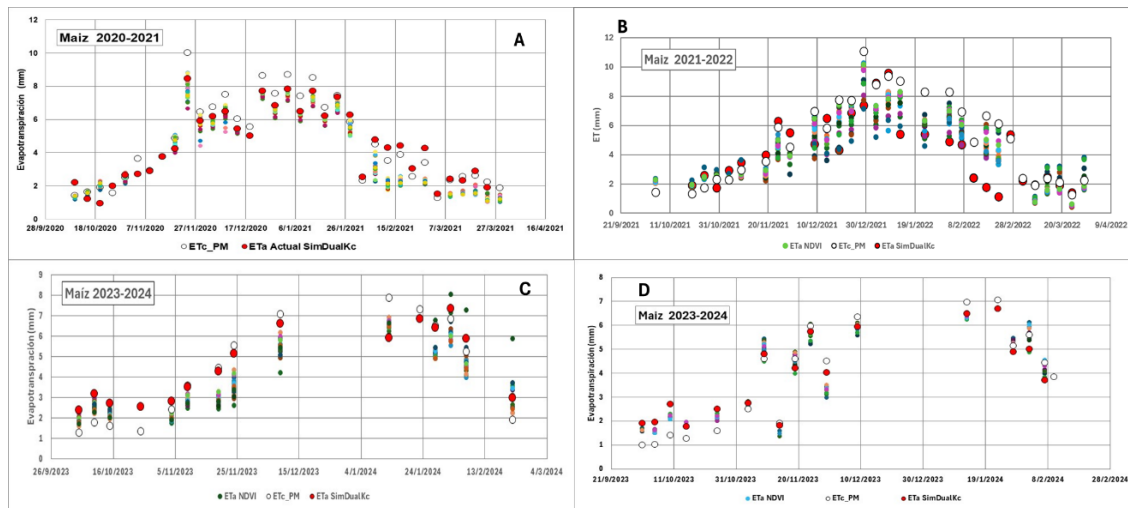


Figura 196. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (FAO-56) (círculos blancos), evapotranspiración actual estimada a través del BHS (SIMDualKc) (círculos rojos) y evaporación actual a través del NDVI-Kc (puntos). A) Pivot de maíz 2020-2021 (El Junco). B) Pivot de maíz 2021-2022 (El Junco). C) Pivot de maíz 2023-2024 (El Junco). D) Pivot de maíz 2023-2024 (Los Olivos).

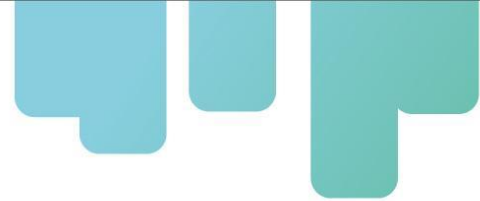
En la mayor parte de los años y situaciones la $ET_{aSIMDualKc}$ fue coincidente con los valores de $ET_{aAgriSat}$, el valor de $ET_{aSIMDualKc}$ estaba muy cercano a los puntos muestreados ($ET_{aAgriSat}$) (**Figura 196**). En los años en que el riego fue técnicamente mejor la concordancia entre los dos métodos de estimación de ET: $ET_{aSIMDualKc}$ y $ET_{aAgriSat}$ fue mayor (**Figura 196 D**).

Conclusiones

En condiciones del cultivo sin limitantes de agua en el suelo (un correcto manejo del riego) la estimación de los coeficientes del cultivo obtenidos a través de la reflectancia (NDVI) es una herramienta válida y de fácil acceso para evaluar el comportamiento del cultivo, el manejo del riego y la variación del cultivo dentro del área de riego (**Figura 196 D**).

En condiciones del cultivo con limitantes de agua en el suelo (un poco apropiado manejo del riego o seco) la estimación de los coeficientes del cultivo obtenidos a través de la reflectancia (NDVI) están afectados por el coeficiente de estrés (K_s) e integralmente podrían ser utilizados para calcular la ET_a del cultivo y ver su dispersión espacial dentro del área de riego (**Figura 196**).

Ambos casos fueron comparados con la estimación de la ET_a a través de un BHS, dando como resultado una importante concordancia entre este valor de ET_a con los valores de $ET_{aAgriSat}$ obtenidos a través del NDVI.



Piloto tecnológico en cultivo de pasturas permanentes.

Uruguay cuenta con una superficie de pasturas permanentes y verdeos anuales de aproximadamente 2.500.000 ha (MGAP, 2023). La producción de materia seca anual es muy dependiente de las lluvias principalmente en primavera, pero también en verano para mantener su persistencia y longevidad. Si bien hay diversos estudios en el país del beneficio del riego (Cardozo & Marchelli, 2017) en la producción de forraje, todavía la inclusión de esta tecnología no es muy difundida entre los productores ganaderos. El clima en Uruguay es muy variable entre años y también durante el año, en general hay estudios de Otero (2017) que muestran que todos los años durante los meses de primavera y verano existe un déficit hídrico que afecta la producción de los cultivos de verano en mayor o menor medida. Sumado a esto existen estudios que muestran que el cambio climático podría provocar cada vez más eventos seguidos de déficit hídrico, lo cual eso afectaría la disponibilidad de agua para riego en la región. Por lo tanto, es necesario realizar acciones que permitan mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos enfocados en maximizar la productividad del agua. En este sentido, la estandarización del cálculo de las necesidades de riego del cultivo de maíz permitiría aumentar la eficiencia en el uso de los insumos productivos como son el agua y los fertilizantes. En el presente trabajo se aplica la metodología FAO 56 asistida con información satelital con objeto de validar su uso en una parcela experimental de pastura permanente.

El objetivo de este piloto tecnológico es la puesta en marcha y la validación de un paquete conceptual-tecnológico que permita a los agricultores de la región contar con herramientas modernas para el manejo del riego dentro de sus predios. Al presente existen herramientas tecnológicas para el monitoreo del nivel de desarrollo de los cultivos, así como de las condiciones ambientales del sitio donde se desarrollan, que permiten implementar metodologías con un alto nivel de precisión en la definición de las necesidades de riego. A partir de los resultados obtenidos en la parcela piloto se validó la propuesta tecnológica propuesta, así como su operatividad a partir de fuentes de información pública.

Materiales y Métodos

El piloto tecnológico en riego se implementó en la Parcela Experimental “El Junco”, en Colonia Rubio, a 75 km aproximadamente de la ciudad de Salto. El piloto se desarrolló en una cuenca donde el sistema de producción es fundamentalmente ganadera con áreas de cultivos extensivos regados y en las zonas bajas se realiza la producción de arroz. La **Figura 197** muestra la infraestructura de riego y recursos de medición que se contaba en la parcela experimental.



Figura 197. *Infraestructura para el riego en la parcela “El Junco”.*

Esta parcela tiene una superficie de 6 ha aproximadas de pasturas permanentes, sembradas en marzo de 2015. El riego para la parcela se realiza por medio de un sistema de un canal principal superficial abierto, que proviene de una represa ubicada a aproximadamente a 3 km. Ese canal lleva agua para toda el área de riego del arroz por lo cual es un canal que puede transportar mucha agua (>200 l/s).

La parcela cuenta con un sistema de caudalímetro (aforador) electromagnético (

Figura 198) conectado a un panel solar que permite conocer la cantidad de agua aplicada en forma instantánea, así como el volumen de agua total aplicado en la temporada. Registra día y hora de encendido y volumen de agua. El encendido y apagado del equipo es automático con el ingreso del agua a la tubería. La lámina bruta aplicada era controlada con este equipo que almacenaba los datos en forma horaria del volumen de agua aplicado y la fecha y el tiempo del evento de riego. Al conocer el área de cada parcela se tenía la lámina en milímetros y la lámina total aplicada en cada temporada.

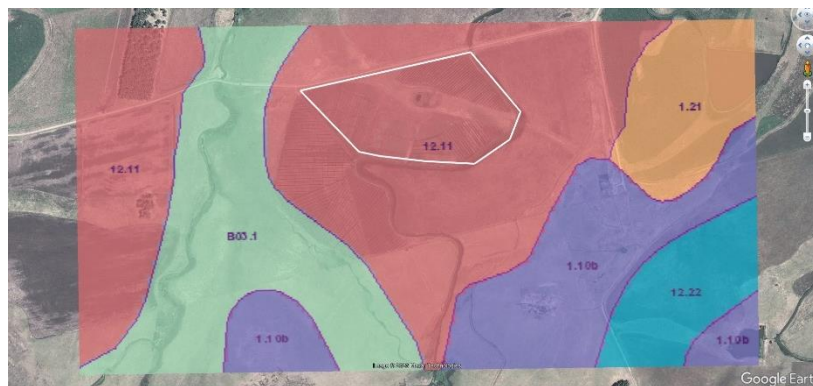


Figura 198. Detalle del medidor de caudal volumétrico e instantáneo de agua en la entrada de la parcela piloto (aforador volumétrico electromagnético).

Características del suelo en la parcela piloto

El suelo de la parcela piloto está clasificado como Vertisol Haplico (Duran, A., 1991), son suelos profundos (>70 cm de horizonte A), de fertilidad natural alta, con buen drenaje. La **Figura 199** muestra los suelos del área bajo riego y en recuadro marcado en blanco el suelo dominante de la parcela piloto tecnológico.

Figura 199. Unidades de suelo en la parcela piloto tecnológico.

El tipo de suelo predominante (figura 4) en la parcela piloto es el 12.11. El relieve es de lomadas suaves (1 a 3% de pendientes) con valles cóncavos asociados. Incluye también interfluvios ondulados convexos. Los suelos dominantes son Vertisoles Háplicos (Grumosoles) y Brunosoles



Éutricos Típicos (Praderas Negras mínimas). Como suelos asociados, ocupando las pendientes más fuertes, se encuentran Vertisoles Háplicos (Grumosoles), moderadamente profundos, Brunosoles Éutricos Típicos moderadamente profundos (Praderas Negras superficiales) y superficiales (Regosoles) y Litosoles Éutricos Melánicos (Litosoles Negros, a veces pardo rojizos). El uso actual es pastoril agrícola. En este grupo hay áreas donde se puede incentivar la agricultura, aunque los suelos presentan limitaciones. Se corresponde con la unidad Itapebí - Tres Árboles de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.). Se pueden mencionar como zonas típicas los alrededores de Tomás Gomensoro, Itapebí, Laureles y Palomas. Índice de Productividad 162.

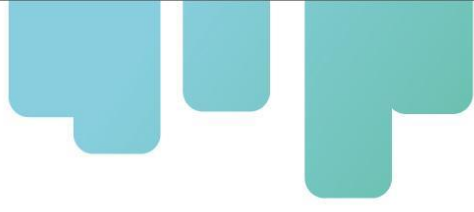
Figura 200. Perfil de suelo en calicata modal del suelo en piloto tecnológico (foto: museo virtual de suelos).

De acuerdo a la descripción del perfil de suelo, se identifican 2 horizontes bien contrastantes, 1 horizonte superior de alta fertilidad natural, negro con alto contenido de materia orgánica, bien drenado que va hasta los 70-80 cm de profundidad y luego el horizonte C (material madre). Por eso este tipo de suelo se define como Vertisol Háplico con las características química que se detallan en el siguiente cuadro (**Tabla 74**).

Se realizó la caracterización hídrica del perfil representativo del área de la parcela, determinando el contenido volumétrico de capacidad de campo (0,01 Mpa) y punto de marchitez permanente (1,5 MPa) de cada horizonte (**Tabla 74**). Las determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos de INIA-LB, con el método de ollas de presión (Richards, 1956).

Tabla 74. Contenido volumétrico promedio de agua (Hv%) a diferentes tensiones evaluadas del suelo del área piloto de la pastura.

Profundidad (cm)	Humedad Volumétrica (m ³ .m ⁻³)		Humedad Volumétrica (m ³ .m ⁻³)		Humedad Volumétrica (m ³ .m ⁻³)	
Tensión de agua (cm H ₂ O)	0-20	std*	20-40	std*	40-60	Std*



1	0.4110	0.0028	0.4325	0.0078	0.5370	0.0636
30	0.3930	0.0085	0.4050	0.0156	0.5085	0.0559
1000	0.3730	0.0085	0.3785	0.0177	0.4880	0.0523
5000	0.3210	0.0085	0.3165	0.0134	0.4405	0.0474
15000	0.3135	0.0092	0.3080	0.0141	0.4315	0.0460

*std. desvío estándar

Obtención de datos climáticos y seguimiento del riego.

Los datos climáticos fueron obtenidos a partir de los datos colectados en una estación meteorológica automática Davis (USA) instalada en el predio a menos de 2 km del experimento, usando las variables diarias de precipitación, temperatura del aire a 1,5 m del suelo, humedad del aire, velocidad promedio y máxima del viento, radiación global incidente y presión atmosférica. La evapotranspiración diaria de referencia (ET_o, PM-56) se calculó siguiendo el procedimiento de la guía FAO-56 y el software Ref-ET (Allen, et al. 2016). Se utilizó un K_CCuadro para la pastura de 0,40; 1,20; 0,50, para las etapas de inicio, medio y posterior al corte o cosecha por el animal (Allen, et al. 1998). Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c FAO-56) se utilizó la ecuación 1, compuesta por la ET_o de referencia diaria y el K_c obtenido de Allen et al. (1998).

Ec 1. $ET_c \text{ FAO-56} = ET_o \times K_{C\text{Cuadro}}$, sin limitantes de agua.

Índice de vegetación y K_c-K_{cb}.

Se seleccionó el índice normalizado de vegetación (NDVI) como el índice de reflectancia más apropiado para estimar el K_c y K_{cb} del cultivo (Campos et al. 2010; Calera et al 2016). Para el manejo de los datos satelitales del NDVI, en su dimensión de distribución espacial, se utilizó la plataforma AgriSatwebGIS®, desarrollada por la Universidad de Castilla La Mancha (2016). La misma trabaja con imágenes Sentinel 2 a/b, lo que permite una resolución espacial y radiométrica de calidad para el manejo del riego; así como el período de revisita suficientemente bueno para realizar un correcto manejo del agua de riego. Para el cálculo del NDVI se usaron las bandas radiométricas con una resolución de 20 m. Se descartaron los días con nubes.

Fueron seleccionados puntos de muestreo al azar, de manera de calcular el K_c y K_{cb} de cada punto de muestreo con las siguientes ecuaciones:

Ec 2. $K_{cb \text{ NDVI}} = 1,44 \text{ NDVI} - 0,1$ (Campos et al. 2010; Neale et al. 1989; Calera et al 2016)

Ec 3. $K_{c \text{ NDVI}} = 1,25 \text{ NDVI} + 0,1$ (Calera et al 2016)

Para obtener la ET_a instantánea del cultivo (ET_aAgriSat) o también la ET_c ajustada por el contenido de agua del suelo (K_s) en cada uno de los puntos muestreados se multiplicó el K_c estimado a través del NDVI (K_cNDVI), por la ET_o de referencia obtenida desde los datos meteorológicos diarios

a lo largo del desarrollo de la pastura, con la ecuación 4.

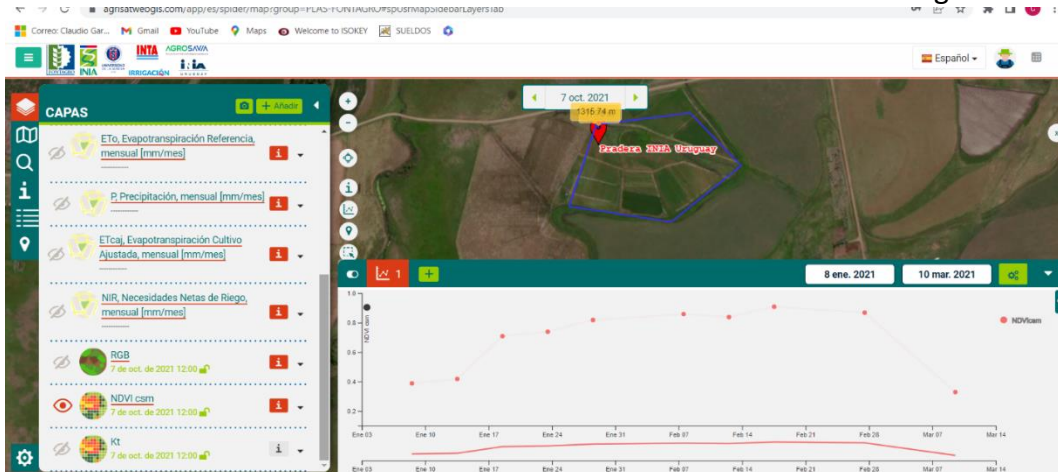
Ec 4. $ETa_{AgriSat} = K_{CNDVI} \times ETo$; $ETa_{AgriSat} \sim ETc$ ajustada.

Modelo de balance de agua en el suelo

Se realizó un balance de agua en el suelo con un modelo que permitiera configurar los parámetros del riego realizado. Se utilizó el modelo SIMDualKc (Rosa et al, 2010), ampliamente conocido por la investigación y la academia en Uruguay. Se obtuvo un balance promedio de cada sitio y año del cultivo, con los parámetros climáticos registrados, las condiciones del cultivo (K_c y K_{cb} de FAO-56), tomando en cuenta las fechas de corte de la pastura, las tolerancias permitidas de agotamiento de agua permitida (p) y las láminas de riego aplicadas en cada caso.

Monitoreo escala PLANTA

Para la consultar el nivel de desarrollo de los cultivos a través del índice de vegetación NDVI, se



implementó la plataforma satelital PLAS FONTAGRO (<https://www.agrisatwebgis.com/app/es/agrisat/map>). La plataforma permite la consulta de series temporales de imágenes multispectrales de los satélites Sentinel 2A y 2B del programa Copernicus, de la Agencia Satelital Europea – ESA.) y de la evolución temporal del índice de vegetación NDVI. Estos valores son transformados automáticamente a valores del coeficiente de cultivo (K_{cb}) y desplegada por medio de gráficos interactivos, permitiendo al usuario la definición de un rango de fechas para consultas y la descarga de los valores para su uso en la programación del riego. En la **Figura 201** se muestra la interfaz web de la plataforma PLAS Fontagro y la evolución temporal del índice de vegetación NDVI para una consulta en una parcela piloto de “El Junco” (pastura permanente).

Figura 201. Ejemplo de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO y la descripción gráfica del desarrollo de una pastura permanente.

En la **Tabla 75** se señalan las características de las imágenes disponibles en la Plataforma PLAS.

Tabla 75. Características de las imágenes satelitales disponibles para consulta en la Plataforma PLAS FONTAGRO.

Programa espacial	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días revisita)	Resolución espacial (metros)
Copernicus (ESA)	Sentinel	100 x 100	10 días	10
Copernicus (ESA)	Sentinel	100 x 100	10 días	10

Adicionalmente, la Plataforma PLAS permite identificar y diferenciar niveles de desarrollo entre sectores de la pastura/cultivo a través del agrupamiento de valores del índice NDVI en rangos. De este modo es posible establecer análisis de la variabilidad espacial de los cultivos (**Figura 202**).

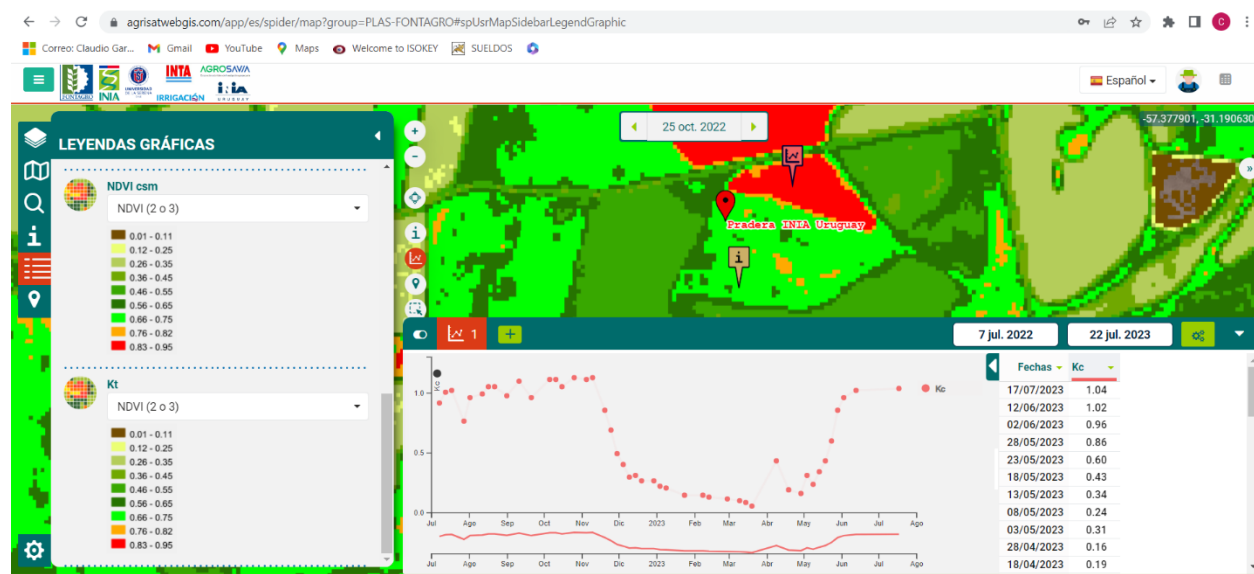


Figura 202. Ejemplo de imágenes del índice de vegetación NDVI desplegada con una escala de colores que permite diferenciar niveles del NDVI y su distribución espacial sobre la parcela de una pastura permanente.

Monitoreo Riego

El control del riego aplicado a las pasturas fue realizado a través de la evaluación de la eficiencia de aplicación y el coeficiente de distribución. Al ser riego por superficie que se realizó en las pasturas permanentes se trabajó con evaluaciones de avance y receso del agua en las parcelas en 2 o 3 riegos por temporada como se muestra en el siguiente esquema (**Figura 203**).

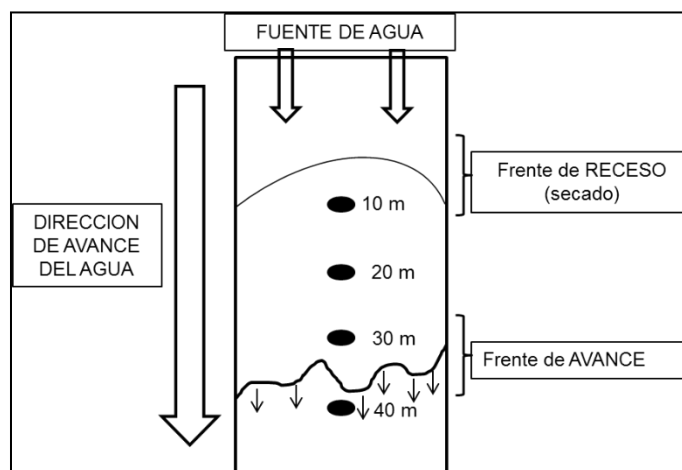


Figura 203. Esquema de la evaluación a campo del avance y receso del agua en las parcelas del piloto tecnológico. Fuente: Bourdin et al., 2015

Para la obtención de la eficiencia de aplicación, de la uniformidad de distribución, percolación profunda y el escurrimiento superficial del agua de riego, se utilizó el software de simulación WinSRFR v.4.13. En el módulo de Análisis de Evento se ingresaron los datos de campo requeridos por el software como son: largo de melga, ancho de melga, lámina máxima, pendiente, caudal, tiempo de corte, tiempo de avance acumulado cada 10 m, tiempo de receso acumulado cada 10 m, coeficiente de rugosidad de Manning, parámetro “a” de la función de Kostiakov. Este módulo con los datos ingresados calcula el tiempo de oportunidad, el parámetro K de la función de infiltración y luego al correrlo arroja resultados como eficiencia de aplicación (EA), uniformidad de distribución (UD), percolación profunda (P) y escurrimiento superficial (E) expresados en porcentaje (%) como en mm de lámina de agua según el caso. Ejemplo de la evaluación realizada a campo se presenta en la siguiente figura (**Figura 204**).

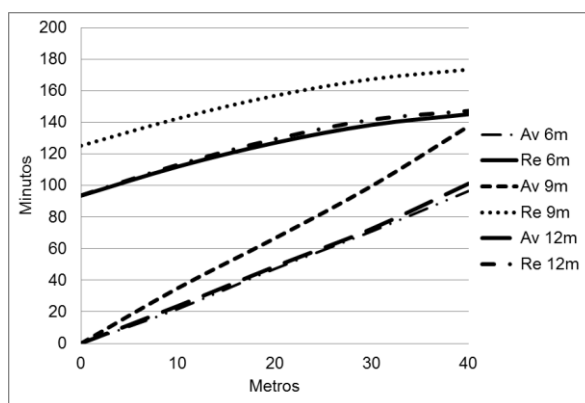


Figura 204. Curvas de tiempos de avance y receso del agua, resultante de la evaluación a campo. Establecimiento El Junco, Salto, Uruguay.

Monitoreo humedad de suelo

Para el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo (balance hídrico), se utilizaron equipos datalogger 5mb de Decagon (**Figura 205**), con 5 sensores FDR modelo 10HS en cada uno de los dataloggers, colocados a diferentes profundidades hasta los 60 cm (que es la profundidad efectiva radicular). La información obtenida de esta manera corresponde al contenido volumétrico de humedad en el suelo (%/%).



Figura 205. *Sondas FDR (Decagon) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.*

Monitoreo meteorológico

El monitoreo de la demanda atmosférica se realizó estimando la ecuación de evapotranspiración de referencia (ET_o) a partir de la utilización de las variables meteorológicas registradas en una estación meteorológica automática (**Figura 206**) colocada a 2 km de la parcela piloto tecnológico (Davis Vantage Pro).



Figura 206. *Estación meteorológica automática (EMA) en la parcela piloto tecnológico “El Junco”.*



Resultados

Pasturas permanentes bajo riego por melgas o fajas

Las pasturas fueron instaladas en marzo de 2015. Si bien se sembraron diferentes especies, en la parcela piloto tecnológico se sembró festuca a razón de 18 kg/ha y trébol blanco a razón de 5 kg/ha.

La superficie cultivada en este ensayo fue de 1,0 ha, fueron colocadas jaulas de exclusión para la evaluación del crecimiento de la pastura, donde se realizaron cortes para conocer la producción de materia seca cada 60 días.

El método de riego utilizado fue de melgas o fajas. Estas se ubicaron a favor de la pendiente permitiendo el desplazamiento uniforme del agua aprovechando la pendiente. Se reponía una lámina correspondiente a 60 mm de evapotranspiración. La misma fue estimada a partir de las variables registradas en una estación meteorológica automática como ya fuera descrito anteriormente.

La aplicación del riego comenzaba con la apertura de las compuertas ubicadas en las cabeceras de cada una de las melgas. Cada melga a regar tiene una superficie de 9 m de ancho por 45 m de largo en promedio (405 m²), por lo que para completar una lámina neta de 60 mm hay que aplicar 24.300 litros. De acuerdo al caudal de diseño de 0.6 l/s/m de ancho de faja, el tiempo de aplicación de riego es de 75 minutos. El período de riego promedio de los años va desde setiembre a marzo, dependiendo de la cantidad de precipitación ocurrida en la primavera y verano.

Monitoreo del desarrollo

En la Figura 70. se muestra la evolución temporal del desarrollo de la pastura durante año 2020-21, obtenido a partir de los valores del índice de vegetación satelital NDVI, disponible en la Plataforma PLAS Fontagro. Se observa un valor de NDVI bastante estable durante todo el período, promedio de 0.6. La estabilidad se debe a que durante ese periodo esa parcela estuvo con animales con pastoreo directo.

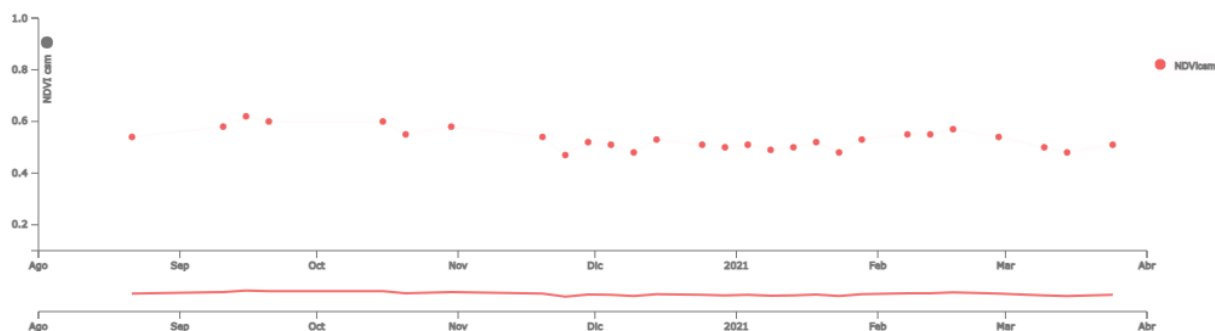


Figura 207. Curva de desarrollo de la pastura durante el periodo primavera-verano 2020-21 descrita a partir del índice de vegetación satelital NDVI.

Como se indicó en la descripción de la metodología utilizada, a partir de los valores de NDVI se establecieron los valores del coeficiente de cultivo basal (Kcb). En el caso de las pasturas el kcb en general es 1, pero en este caso al estar con animales como ya fuera explicado la planta no expresa su máximo crecimiento (**Figura 208**). Igualmente, para la determinación de las necesidades de riego se utiliza el kc 1 para que haya un crecimiento potencial máximo.

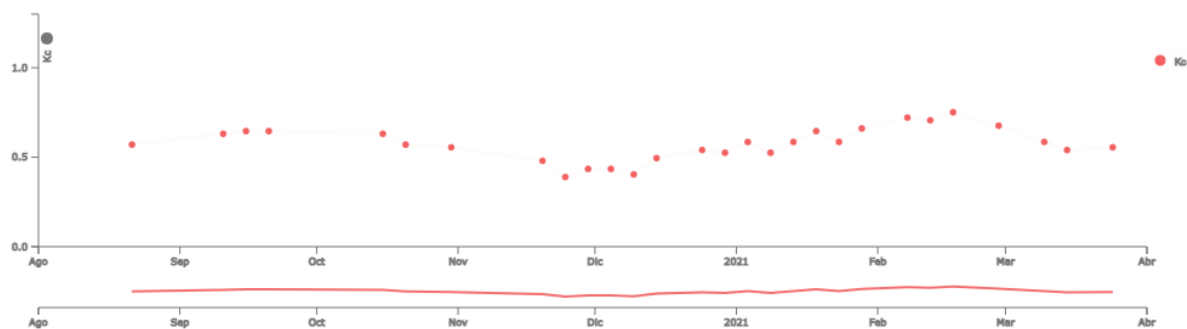


Figura 208. Valores de los coeficientes de cultivo basal (Kcb) para la programación del riego.

Monitoreo del riego

De acuerdo con la profundidad radicular de la pastura y la tolerancia a la disminución permisible de la humedad en el suelo (fracción de agotamiento, p) recomendado en FAO 56, el contenido de humedad en el suelo se mantuvo en torno al 50% de agotamiento. Para lograr mantenerse en este umbral se ajustó la frecuencia del aporte del riego (FAO 56, Allen *et al.*, 1998).

Como ya se indicó anteriormente, el monitoreo de la disponibilidad hídrica (o agotamiento permisible) se realizó mediante el registro continuo con sensores FDR colocados a diferentes profundidades. En la **Figura 209** se muestra el contenido de humedad en cada profundidad.

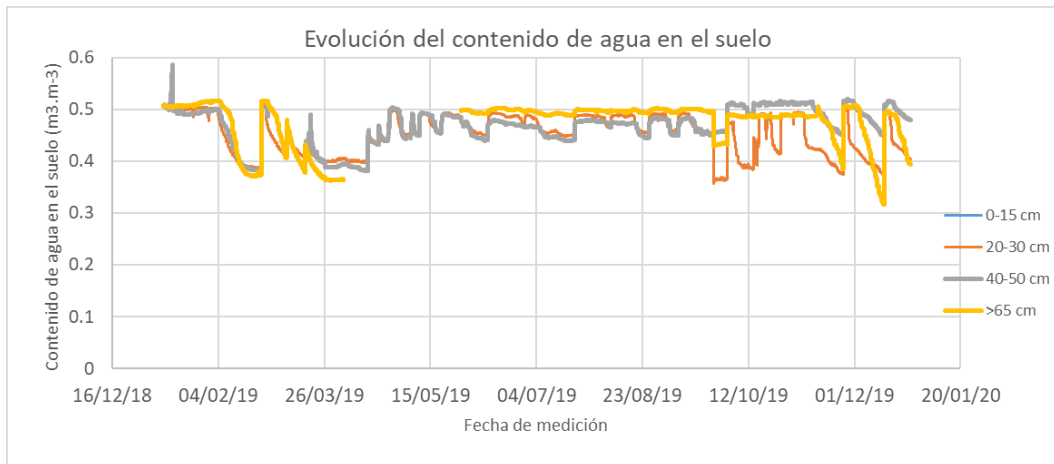


Figura 209. Registro el contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades del suelo en pasturas bajo riego. Establecimiento El Junco, Salto, Uruguay.

Monitoreo meteorológico

Los datos meteorológicos de los dos años evaluados se presentan a continuación a través de los datos de evapotranspiración y la precipitación (**Figura 210**).

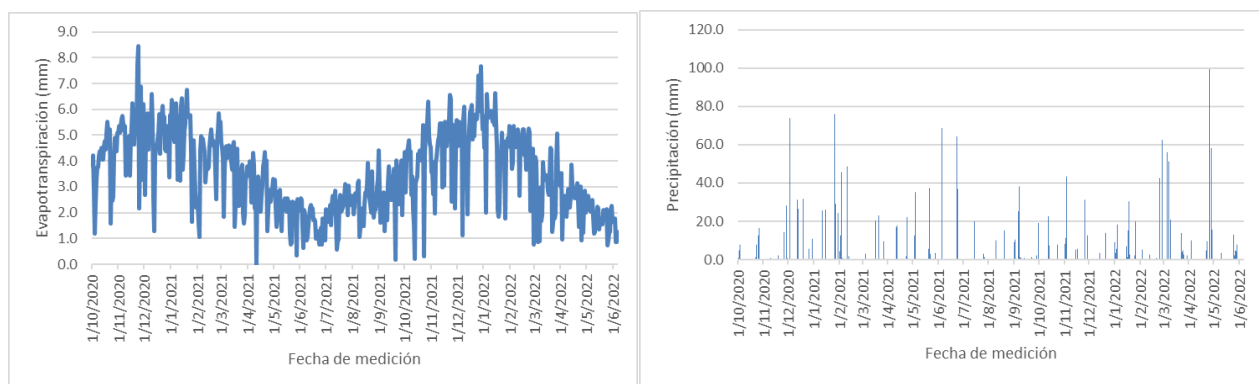


Figura 210. Evolución de la evapotranspiración y de la precipitación en los dos años de evaluación (2020-2022). Establecimiento El Junco, Salto, Uruguay.

Aportes de riego

El aporte de riego se efectuó en 3 oportunidades en la primera zafra (2020-21) y 7 riegos en la zafra 2021-22, cada uno de los riegos fue en promedio de 81 mm de lámina bruta. En la **Tabla 76** se muestra un resumen del manejo del riego efectuado en la parcela.

Tabla 76. Aplicación de riegos en pasturas durante las dos zafras del proyecto (2020-2022).

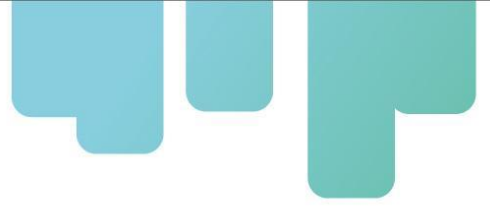
	Fecha	Riegos (mm)	Tiempo riego (minutos)	Riego (m ³ /ha)
Zafra 2020-21	01/10/2020	75	104	750
	15/11/2020	81	80	810
	06/01/2021	90	116	900
Zafra 2021-22	04/10/2021	77	110	770
	01/12/2021	81	120	810
	15/01/2021	75	105	750
	03/12/2021	80	120	800
	12/12/2021	83	125	830
	29/12/2021	87	141	870
	12/01/2022	81	120	810

Rendimientos

Los rendimientos alcanzados en la parcela piloto fueron evaluados a través de las jaulas de exclusión como fuera explicado con cortes cada 60 días (**Tabla 77**). La diferencia en producción de materia seca entre las pasturas bajo riego y las que solo reciben agua de lluvia es muy importante, en general más del 60 o 70% en promedio, pero además el efecto que tiene el riego es la persistencia de las plantas, lo cual es muy importante para poder continuar con los pastoreos luego en el otoño y en el invierno.

Tabla 77. Producción de materia seca (kg/ha) promedio acumulado anual de las 3 jaulas en la pastura bajo riego por superficie.

Tratamiento de riego (mm)	2020-21	2021-22
60	13662	12278



Conclusiones

La recomendación de la lámina de riego para el caso de riego por superficie es aplicar 60 mm toda vez que la evapotranspiración máxima alcanza ese valor. Esto permite un mejor aprovechamiento del agua de lluvia, no afectando los rendimientos de materia seca y ahorrando energía y mano de obra.

Los datos de producción de materia seca concuerdan con los resultados obtenidos en otros experimentos bajo riego y en otras localidades publicados en la SERIE TECNICA de INIA N° 231 en 2017.

En condiciones del cultivo sin limitantes de agua en el suelo (un correcto manejo del riego) la estimación de los coeficientes del cultivo obtenidos a través de la reflectancia (NDVI) es una herramienta válida y de fácil acceso para evaluar el comportamiento del cultivo, el manejo del riego y la variación del cultivo dentro del área de riego.

En condiciones del cultivo con limitantes de agua en el suelo la estimación de los coeficientes del cultivo obtenidos a través de la reflectancia (NDVI) están afectados por el coeficiente de estrés (K_s) e integralmente podrían ser utilizados para calcular la ET_a del cultivo y ver su dispersión espacial dentro del área de riego.



4. CONCLUSIONES Y REFLEXIONES FINALES

La contabilidad del agua de riego a escala de cuenca asistida por teledetección ha demostrado ser una herramienta eficaz para evaluar y gestionar los recursos hídricos en las cuencas agrícolas de América Latina y el Caribe. Esta metodología proporciona información espacial y temporal detallada, permitiendo a los gestores públicos y privados tomar decisiones más informadas sobre la distribución del recurso hídrico en sistemas agrícolas diversos. A través de este enfoque, se han identificado tanto patrones de demanda hídrica como áreas críticas donde se requieren mejoras en la eficiencia del uso del agua.

Los resultados obtenidos en las seis cuencas analizadas resaltan el valor de esta herramienta. En el Valle del Río Elqui (Chile), se lograron estimaciones precisas de las necesidades netas de riego (NIR), facilitando la comparación con los volúmenes brutos asignados por los gestores locales. En Villa Regina (Argentina), la metodología validó la concordancia entre las demandas hídricas observadas y las estimadas, especialmente al aplicar coeficientes de eficiencia del riego en escalas como tomeros y perímetros. En Tunuyán Inferior (Argentina), aunque los análisis se basaron en datos de uso del suelo desactualizados, se evidenció el potencial de la teledetección para complementar la gestión hídrica en esta cuenca. Por otro lado, en Colonia Fiscal Sarmiento (Argentina), se destacaron las discrepancias entre las demandas hídricas y los volúmenes disponibles, lo que pone de manifiesto la necesidad de un manejo más adaptativo bajo condiciones de escasez hídrica. En Arroyo del Tala (Uruguay), los datos generados permitieron caracterizar con precisión las necesidades hídricas de cultivos clave como arroz, maíz y soja, brindando una base sólida para mejorar la gestión del riego. Finalmente, en el Distrito RUT (Colombia), los resultados mostraron una alta correlación entre las estimaciones de riego y los volúmenes asignados, confirmando la aplicabilidad de la metodología en cultivos como caña de azúcar y maíz.

No obstante, se identificaron limitaciones en algunas cuencas, como la falta de actualización en los mapas de uso del suelo, lo que afecta la precisión de las estimaciones. Esta situación pone de relieve la importancia de contar con bases de datos más actualizadas y completas para maximizar el impacto de la teledetección en la planificación hídrica.

En perspectiva, los resultados de este estudio respaldan la expansión del uso de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección a otras cuencas de América Latina y el Caribe. La metodología requiere ajustes específicos para cada región, pero su implementación podría mejorar significativamente la sostenibilidad y la eficiencia del uso del agua en la agricultura. Además, la integración de sistemas de información más robustos garantizará que esta herramienta siga siendo relevante y efectiva a largo plazo.

Los pilotos tecnológicos implementados en Argentina demostraron que el monitoreo satelital en el cultivo de peras Williams, llevado a cabo en Villa Regina, Río Negro, demostró ser una herramienta valiosa para estimar las necesidades hídricas y optimizar el manejo del riego. A través de la metodología FAO 56 asistida por información satelital, se logró calcular con precisión la



evapotranspiración del cultivo (ETc), mostrando una alta correspondencia con los valores tabulados utilizados tradicionalmente. Aunque el manejo del riego dependió del turno asignado por el consorcio de riego y no estrictamente de las necesidades del cultivo, el rendimiento alcanzado en el cuadro evaluado (38 t/ha) superó el promedio regional, reflejando un desempeño productivo destacable. Este enfoque, además, permitió optimizar el uso del agua almacenada en el suelo, sugiriendo un importante ahorro del recurso hídrico y mejorando la eficiencia del riego en la región.

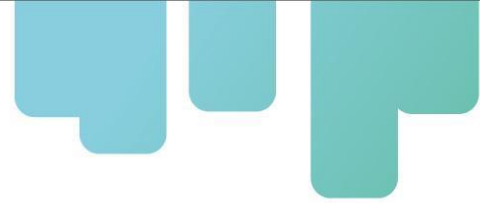
En el caso del cultivo de maíz, las parcelas evaluadas en Río Negro y General Conesa evidenciaron la utilidad del monitoreo satelital para caracterizar las necesidades de riego y ajustar las láminas aplicadas según las etapas fenológicas del cultivo. Con rendimientos promedio de 15.400 kg/ha, se garantizó un margen bruto positivo para los productores locales, a pesar de las condiciones climáticas adversas como temperaturas elevadas durante la floración. Sin embargo, la relación entre el agua aplicada y la ETc indicó un exceso promedio del 137%, lo que resalta la necesidad de mejorar el manejo del riego para evitar aplicaciones innecesarias. La estimación de la ETc basada en imágenes satelitales se mostró más precisa que los coeficientes tabulados, subrayando el potencial de estas herramientas para optimizar la gestión hídrica.

En los viñedos de Junín, Mendoza, el manejo del riego estuvo condicionado por la oferta hídrica a nivel de cuenca, lo que resultó en déficits hídricos en algunos periodos críticos del cultivo. A pesar de estos déficits, el viñedo no mostró signos de estrés hídrico severo, manteniendo rendimientos promedio de 18.900 kg/ha en la última temporada. El monitoreo satelital permitió determinar con precisión las necesidades de riego y comprender mejor las etapas de desarrollo del cultivo, mostrando su utilidad para manejar viñedos en condiciones de estrés hídrico moderado.

Finalmente, en el cultivo de tomate en Pocito, San Juan, la combinación de monitoreo satelital y la metodología FAO 56 permitió alcanzar altos niveles de eficiencia hídrica, logrando productividades del agua de hasta 14.47 kg/m³ en condiciones climáticas favorables. Durante temporadas adversas, como la 2023/24, las herramientas satelitales ayudaron a minimizar pérdidas de rendimiento, lo que resalta su utilidad para adaptarse a condiciones cambiantes. Además, la plataforma permitió al productor ajustar sus decisiones en función de los datos obtenidos, aunque estas no siempre se alinearon con las recomendaciones ideales, destacando la importancia del aprendizaje continuo en el manejo del riego.

Estas experiencias resaltan la relevancia de las tecnologías satelitales y metodologías estandarizadas para mejorar la gestión del riego en diferentes sistemas agrícolas en Argentina, promoviendo la sostenibilidad y la productividad en escenarios de creciente limitación hídrica.

El uso de tecnologías avanzadas, como el monitoreo satelital y la metodología FAO 56, se posiciona como una solución eficaz para enfrentar los desafíos hídricos en Chile, especialmente en las zonas áridas como la región de Coquimbo. Los pilotos tecnológicos implementados en cultivos estratégicos han demostrado que estas herramientas permiten optimizar el uso del agua,



logrando importantes reducciones en su consumo y manteniendo altos niveles de productividad. Esto es particularmente relevante en el contexto de escasez hídrica generada por el cambio climático y la creciente competencia por este recurso.

En todos los cultivos evaluados, como lechuga, habas, papas, poroto verde, maíz, uva de mesa y mandarina, la integración de información satelital y riego tecnificado permitió reducir el consumo de agua hasta en un 50% en comparación con los métodos tradicionales. Este ahorro no comprometió la calidad ni el rendimiento, y en muchos casos, la productividad del agua aumentó significativamente, con incrementos de hasta un 88%. Estas cifras refuerzan la viabilidad de estas tecnologías tanto desde una perspectiva económica como medioambiental.

El impacto de estas tecnologías es especialmente relevante en cultivos estratégicos para la economía chilena, como la uva de mesa y los cítricos. La adopción de sistemas de riego más eficientes, junto con herramientas como la plataforma PLAS Fontagro, fortalece la competitividad de los productos agrícolas chilenos en mercados internacionales, asegurando altos estándares de calidad y sostenibilidad. Además, la simplicidad y accesibilidad de las herramientas, como el monitoreo NDVI y los sensores de humedad, las convierten en opciones viables para pequeños y medianos agricultores, promoviendo la sostenibilidad del sector agropecuario en todo el país.

Otro aspecto destacado es la capacidad de estas tecnologías para ayudar al sector agrícola a adaptarse a escenarios climáticos adversos. Al optimizar el uso de los recursos hídricos y mejorar la eficiencia en los insumos productivos, se protege la producción agrícola y la calidad de los suelos, asegurando la sostenibilidad a largo plazo.

Desde una perspectiva socioeconómica, estas tecnologías también ofrecen beneficios tangibles. Reducir los costos operativos y mejorar la rentabilidad de los cultivos impacta positivamente en la calidad de vida de los agricultores y en la seguridad alimentaria del país. Asimismo, la promoción de estas herramientas en regiones vulnerables como el norte de Chile puede ayudar a disminuir las brechas productivas y sociales entre zonas agrícolas.

Para aprovechar al máximo estos avances, es fundamental promover políticas públicas que incentiven la adopción de tecnologías de riego eficientes, priorizando regiones afectadas por la escasez hídrica. También es necesario fortalecer los programas de capacitación y transferencia tecnológica liderados por instituciones como INIA, para garantizar que los agricultores puedan comprender y aplicar estas metodologías en sus predios. Por último, la creación de alianzas entre los sectores público, privado y académico facilitará la escalabilidad y replicabilidad de estos modelos en otras regiones y cultivos del país.

La implementación de tecnologías de riego avanzadas y el monitoreo satelital representan una oportunidad clave para transformar el sector agrícola chileno hacia un modelo más sostenible, eficiente y resiliente. Estas innovaciones no solo benefician al sector productivo, sino que también contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático y a garantizar un uso más responsable de los recursos hídricos, asegurando la sostenibilidad agrícola y ambiental del país.



La implementación de tecnologías avanzadas de riego y monitoreo ambiental, basadas en redes IoT y sensores capacitivos, ha demostrado ser una herramienta eficaz para optimizar el uso del agua en el sector agrícola de Colombia. En el distrito de riego RUT (D.RUT), estas tecnologías permitieron reducir significativamente el consumo hídrico, con ahorros que alcanzaron hasta el 97,9% en cultivos como maracuyá, y promovieron una mayor eficiencia en la gestión de los recursos, incluso en sistemas tradicionalmente considerados intensivos, como la caña de azúcar.

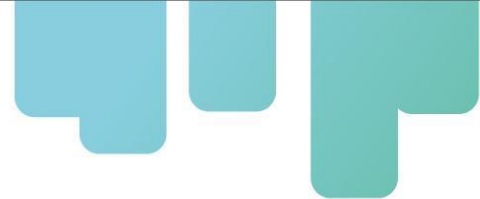
El proyecto piloto destacó la importancia de la agricultura 4.0 como una estrategia clave para enfrentar los retos del cambio climático y la alta demanda hídrica en el país. Los resultados obtenidos subrayan que la adopción de estas tecnologías no solo mejora la sostenibilidad ambiental, sino también la rentabilidad económica. Por ejemplo, cultivos como el maíz lograron un ahorro del 80% en agua y un aumento del 34,25% en la ganancia económica, al tiempo que se mantuvo el rendimiento productivo. Asimismo, en el caso de la lima ácida Tahití, se observó un ahorro del 65% en el consumo hídrico, alineando las prácticas de riego con las necesidades reales del cultivo.

Sin embargo, la experiencia también evidenció desafíos importantes, como la necesidad de mejorar la infraestructura de drenaje para evitar excesos de humedad, que afectaron negativamente el desarrollo de cultivos como la papaya y la guanábana. Además, se identificó una brecha significativa en el conocimiento y adopción de estas tecnologías por parte de algunos productores, lo que limitó su efectividad en ciertos casos. A pesar de estos retos, los cultivos priorizados mostraron una respuesta productiva adecuada, logrando mantener o incluso superar los rendimientos locales.

Un aspecto fundamental fue la transferencia de conocimiento y capacitación de los productores, quienes, tras el periodo experimental, quedaron mejor preparados para utilizar herramientas tecnológicas en sus sistemas productivos. La creación de plantillas prácticas y el desarrollo de un manual accesible facilitaron la toma de decisiones informadas, reduciendo la dependencia de prácticas tradicionales empíricas.

Este proyecto sienta las bases para futuras iniciativas en el manejo eficiente del agua en Colombia, posicionándose como un piloto de referencia para replicar en otras regiones del país. La continuidad de la red IoT y la integración de nuevas tecnologías, como dendrómetros de fruto y aplicaciones móviles, prometen ampliar el alcance y los beneficios de este enfoque innovador. La fase 2 del proyecto será crucial para consolidar estos avances, promoviendo un modelo sostenible de producción agrícola que responda a las demandas climáticas, sociales y económicas del país.

En Uruguay, el uso de tecnologías modernas como el índice de vegetación normalizado (NDVI), combinado con datos meteorológicos y modelos de balance hídrico como el SIMDualKc, ha demostrado ser una herramienta eficaz para la estimación de coeficientes de cultivo (Kc y Kcb). Estas tecnologías permiten una programación precisa del riego, optimizando los recursos hídricos y mejorando la producción en cultivos extensivos como maíz y soja, así como en pasturas permanentes. Este enfoque es especialmente relevante en el contexto de limitaciones hídricas



recurrentes y variabilidad climática asociada al cambio climático.

En cultivos como el maíz y la soja, la implementación de riego estratégico basado en las necesidades específicas del cultivo incrementó significativamente los rendimientos. Por ejemplo, en maíz, los rendimientos bajo riego alcanzaron hasta 11 toneladas por hectárea, mientras que los rendimientos promedio en secano se sitúan entre 5.500 y 7.600 kg/ha. Estos resultados subrayan la importancia de un manejo eficiente del agua, que puede hacer una diferencia sustancial en la productividad agrícola del país.

En cuanto a las pasturas permanentes, el riego por melgas permitió mantener altos niveles de producción de materia seca, incrementándola en un 60-70% en comparación con pasturas no regadas. Este beneficio no solo mejora la disponibilidad de forraje durante períodos críticos, como el otoño y el invierno, sino que también asegura la persistencia y longevidad de las plantas, un aspecto clave para la sostenibilidad del sector ganadero.

El enfoque adoptado en estos pilotos tecnológicos resalta la importancia de implementar herramientas modernas para el monitoreo del riego, que combinan datos satelitales y mediciones de campo. Aunque la nubosidad frecuente en Uruguay puede limitar la continuidad de los datos satelitales, esta limitación se puede mitigar mediante el uso de sensores en campo, como los empleados en estas experiencias. La validación del uso del NDVI y modelos como el SIMDualKc confirma su utilidad para ajustar la eficiencia hídrica y optimizar la producción, incluso en condiciones de estrés hídrico.

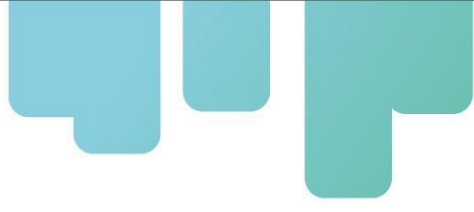
Por último, la capacitación de productores en el uso de estas tecnologías y la implementación a mayor escala de los paquetes tecnológicos validados en parcelas piloto, como en "El Junco", podrían transformar la agricultura uruguaya. Esto no solo ayudaría a aumentar la productividad, sino también a promover un uso sostenible de los recursos hídricos en un contexto de crecientes desafíos climáticos.

5. REFERENCIAS

- Agua Y Energía Eléctrica sociedad del Estado (AyEE); Consorcio Inconas Laticonsult S.A. (CIL): Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Informe Técnico. Río Negro. Argentina (1988).
- Abrisqueta, I., Tapia, L., Conejero, W., Sanchez-Toribio, M., Abrisqueta, J., Vera, J., & Ruiz-Sánchez, M. 2010. Response of early-peach [*Prunus pérsica* (L.)] tres to déficit irrigation. Spanish Journal of Agricultural Research, 8(S2), 30-39.
- ADR, FAO & Gobernación del Valle del Cauca. 2021. Plan Integral de Desarrollo Agropecuario y Rural con Enfoque Territorial departamento del Valle del Cauca: Tomo I. Disponible en: <https://bit.ly/3IEQg8E>.
- AgriSatwebGIS®. (2019). AgriSat Iberia S.L., Universidad de Castilla La Mancha. Recuperado de: <https://www.agrisatwebgis.com/app/es/agrisat/map?group=Plas#spUsrMapSidebarLayersTab>
- Agronet. 2018. Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. Disponible en: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements.
- Allen, R. G. (1998). FAO N° 56 Irrigation and drainage paper: Crop evapotranspiration. Rome, Italy.
- Allen, R. G. (2016). Reference Evaporation Calculator. Ref-ET. American Society of Civil Engineers, University of Idaho. Recuperado de: <https://www.uidaho.edu/cals/kimberly-research-and-extension-center/research/water-resources/ref-et-software>
- ASORUT. 2018. Características generales distrito de riego RUT. Valle del Cauca, Colombia. Segunda edición. Disponible en: <https://asorut.com/>
- ASORUT. 2024. Pagina oficial de ASORUT. Disponible en: <https://asorut.com/>
- Bautista, E., Strelkoff, T. S., Clemmens, A. J., & Schlegel, J. L. (2010). WinSRFR: current advances in software for surface irrigation simulation and analysis. In 5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings, 5-8 December 2010, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona USA (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Bioversity & CIAT. 2022. Diagnóstico. Nueva Economía para la Alimentación y Uso del Suelo. FOLU Valle del Cauca. alliancebioiversityciat.org; folucolombia.org. 159 pp. Disponible en: <https://folucolombia.org/wp-content/uploads/2022/03/Diagnostico-FOLU-Valle-de-Cauca.pdf>
- Bonet, L., Ferrer, P., Castel, J.R., & Intrigliolo. 2010. Soil capacitance sensors and stem dendrometers. Useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards?. Spanish



- Journal of Agricultural Research 2010 8(S2), 52-65.
- Campos I., Neale C. M. U., Calera A., Balbontín C, González-Piqueras J.: Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management* 98, 45–54 (2010). Calera, A., Campos, I., & Garrido, J. (2016). Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. Sección de Teledetección y SIG. Universidad Castilla La Mancha, España.
- Cardozo, G., & Marchelli, J. P. (2017). Pasto y carne en pasturas regadas. En: Producción intensiva de carne en pasturas regadas con pivot central. Serie Técnica INIA N°231, Cap. II, pp. 13-21.
- CIL-AyEE. 1991. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Etapa II. Informe edafológico, Río Negro.
- Comisión económica para América Latina y el Caribe - CEPAL. 2022. Digitalización y cambio tecnológico en las mipymes agrícolas y agroindustriales en América Latina. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46965/4/S2100283_es.pdf
- Consejo nacional de política económica y social – CONPES. 2018. Política de adecuación de tierras 2018-2038. Departamento Nacional de Planeación. República de Colombia. 76pp. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3926.pdf>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. Reyes, H., Moreno L., & Reyes H. 2020a. Agrosavia Fecunda y Agrosavia Tesoro: dos nuevos cultivares de guanábana como alternativa de producción para los agricultores colombianos. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404210>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. Murcia Riaño, N., Martínez, M. F., Orduz-Rodríguez, J. O., Ríos-Rojas, L., López Galé, Y., ... Andrea Onelia Rodríguez Roa. (2020b). Modelo productivo de lima ácida Tahití (*Citrus × latifolia* Tanaka ex Q. Jiménez) para Colombia. Mosquera, Colombia: 432 pp.
- CVC; Gobernación del Valle del Cauca & CIAT. 2017. PICC-Plan Integral de Cambio Climático para el Valle del Cauca. Cali: 311pp.
- Chambouleyron, J.. 2005. Riego y Drenaje. Técnicas para el desarrollo de una agricultura regadía sustentable. Tomo 1. Editorial de la Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza. 470 p.
- DeJonge, K. C., Taghvaeian, S., Trout, T. J., & Comas, L. H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*, 156, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.023>
- Devlin M., Brodie, J. 2023. Nutrients and Eutrophication. In: Reichelt-Brushett, A. (eds) *Marine Pollution – Monitoring, Management and Mitigation* . Springer Textbooks in Earth Sciences,

- 
- Geography and Environment. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10127-4_4
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Cuadroda, M., & Robledo, C. W. (2020). InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado de: <http://www.infostat.com.ar>
- Duran, A. 1991. Los suelos del Uruguay. 398 p. 2da Edición. Hemisferio del Sur.
- FAO, IIASA, ISRIC, ISSCAS, and JRC. 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). <https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/index.html?sb=1>.
- FAO.2015. Estudio del potencial de ampliación del riego en Argentina. UTF/ARG/017/ARG. Desarrollo institucional para la inversión. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina FAO-PROSAP. Buenos Aires. 120 p.
- Finagro. 2018a. Ficha de inteligencia. Aguacate. 14 pp. Disponible en: AGUACATE_julio_2018 (finagro.com.co)
- Finagro. 2018b. Ficha de inteligencia. Caña de azúcar. 14 pp. Disponible en: ficha_cana_de_azucar_version_ii.pdf (finagro.com.co)
- Finagro. 2022. Agroguía. Marco de referencia agroeconómico. Papaya. 5 pp. Recuperado de: https://www.finagro.com.co/sites/default/files/2022-05/papaya_santander.pdf
- <http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio>
- Galeazzi, J., and A. Requena. 2011. Proyecto INTA-AUDES-CONADEV: Aportes para mejorar la Operación de Distritos de Riego.
- Galeazzi J. O.: Informe Final- Asesoramiento y Capacitación para la adopción de técnicas racionales de manejo del agua, en pequeños y medianos productores frutícolas del Alto Valle de Río Negro. Proyecto de Extensión FaCA-UNCo. Cinco Saltos. Argentina. (2004).
- Garrido-Rubio, J. 2021. Teledetección aplicada a la contabilidad del agua de riego sobre diferentes escalas espaciales y temporales de gestión: desde la parcela hasta la demarcación hidrográfica. doi: <http://hdl.handle.net/10578/28728>.
- Garrido-Rubio, J., A. Calera, I. Arellano, M. Belmonte, L. Fraile, et al. 2020a. Evaluation of remote sensing-based irrigation water accounting at river basin district management scale. Remote Sens. 12(19): 3187. doi: 10.3390/rs12193187.
- Garrido-Rubio, J., J. González-Piqueras, I. Campos, A. Osann, L. González-Gómez, et al. 2020b. Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. Agric. Water Manag. 238: 106236. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106236.



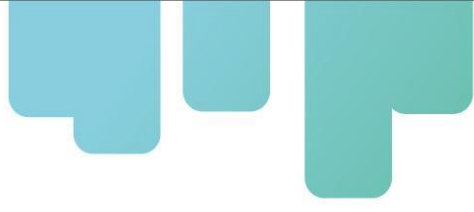
- Giménez, L. (2017). Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. *Agrociencia Uruguay*, 21(2), 77-90. Recuperado de: <http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio>
- Idso, S. B. (1982). Non-water-stressed baselines - A key to measuring and interpreting plant water-stress. *Agricultural Meteorology*, 27, 59–70.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 2017. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera comunicación nacional de cambio climático. Bogotá D.C.: 546pp.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. Jr. (1981). Canopy temperature as a crop water-stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4), 1133–1138.
- Jones, H. G. (2018). Thermal imaging and infrared sensing in plant ecophysiology. En Sánchez-Moreiras, A., & Reigosa, M. J. (Eds.), *Advances in Plant Ecophysiology Techniques* (pp. 157–176). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93233-0_8
- Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes. (2023, 3 de noviembre). Laboratorio PROMMRA entrega claves para la gestión hídrica. Recuperado de <https://www.rioelqui.cl/laboratorio-prommra-entrega-claves-para-la-gestion-hidrica/>
- Lara Pulgar, S., and G. Casanova. 2020. Resultados y lecciones en la Gestión hídrica del río Elqui para mejorar eficiencia del agua. Proyecto de innovación en Región de Coquimbo. Santiago de Chile.
- Liotta, M., O. Miranda, A. Olguin Pringles, and J.J. Aguilera. 2010. Demanda hídrica y eficiencia de riego en los valles de Tulúm, Ullúm y Zonda. *Ruralis* 3(12): 4–7. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/7043> (accessed 26 July 2024).
- Luo Y & Zhou X. 2006. Processes of CO₂ Production in Soil. *Soil Respiration and the Environment*. Academic Press. 978-0-12-088782-8. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088782-8.X5000-1>
- Mañueco L., Rodríguez A., Montenegro A., Galeazzi J., Del Brio D., Curetti M., Muñoz A. and Raffo D.: Quantification of capillary water input to the root zone from shallow water table and determination of the associated ‘Bartlett’ pear water status. XIII International Pear Symposium. Montevideo, Uruguay, 4 – 7 diciembre (2018).
- Meléndez, Y. P. L. y A. Chile Ltda. (1979). *Estudio de Suelos Valle del Elqui, República de Chile*. Comisión Nacional de Riego.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR. (2021a). Cadena de cacao. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Documentos/2020-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR. AGRONET. (2021b). Cadena de la Guayaba.



- Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Guayaba/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR. SIOC. (2021c). Maíz. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/AlimentosBalanceados/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales%20ma%C3%ADz.pdf>
- Montenegro, A., and J.A. Muñiz. 1991. Estudio para el aprovechamiento Integral del Río Negro. Etapa II. Informe edafológico. Consorcio Inconas Latinoconsult. Río Negro: AyE.
- Montoya, F., & Otero, A. (2019). Is irrigating soybean profitable in Uruguay? A modeling approach. *Agronomy Journal*, 111(2), 647–659.
- Montoya, F., García, C., Pintos, F., & Otero, A. (2017). Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 193, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.015>
- Montero, A. (2017). Aplicaciones de modelos de balance hídrico de suelos en Uruguay. En: Programación del Riego. Serie Técnica INIA N°232.
- Muangprathub J., Boonnam N., Kajornkasirat S., Lekbangpong N., Wanichsombat A. & Nillaor P. 2019. IoT and agriculture data analysis for smart farm. *Computers and Electronics in Agriculture*. 156: 467- 474. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.011>.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay). (2023). Anuario estadístico agropecuario 2023. Recuperado de: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2023>
- Neale CMU, Bausch WC, Heermann DF, 1989. Development of Reflectance-Based Crop Coefficients for Corn. *Trans. ASAE* 32(6): 1891-1899.
- Ojeda, H. 2007. Riego cualitativo de precisión en vid. Revista internet de viticultura y enología. [<https://www.infowine.com/wp-content/uploads/2024/04/libretto4415-01-1.pdf>]
- Otero, A. (2017). Aplicaciones de modelos de balance hídrico de suelos en Uruguay. En: Programación del Riego. Serie Técnica INIA N°232.
- Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector Agropecuario – PECTIA. 2022. Departamento del Valle del Cauca. Mesa de ciencia, tecnología e innovación agropecuaria (MESA DE CTIA). 14 pp. Disponible en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/38079/Ver_Documento_38079.pdf;jsessionid=7DF3A57527523661046B03FEDF70EC0F?sequence=1
- Polla, G.M. 2017. Metodología para optimizar el manejo de un distrito de riego, aplicable al Alto Valle de Río Negro.



- Ponce, V., J. Del Brio, L. Sanchez, A. Montenegro, J.O. Galeazzi, et al. 2015. Adquisición y sistematización de información de distritos de riego para un mejor aprovechamiento del agua en el Alto Valle. In: Asociación Internacional de Hidrogeólogos, editor, CONAGUA 2015. Congreso Nacional del Agua. "Agua como política de Estado." Paraná, Entre Ríos, Argentina
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. I Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical (IIFT) y al Grupo Agrícola (GAG) del Ministerio de la Agricultura. 2023. Instructivo técnico para el cultivo de la papaya. ISBN: 978-959-296-072-5. Editorial Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical©. La Habana Cuba
- PROSAP. 2015. Actualización de la cartografía de suelos del área piloto bajo riego de Colonia Fiscal, Departamento Sarmiento. Proyecto "Desarrollo de áreas bajo riego de la margen sur del río San Juan. Canal Céspedes -Sarmiento". Ministerio de Producción, Gobierno de la provincia de San Juan.
- Quichán, S, Martínez RS, Martínez RM, Esquercia, W, Lui Eduardo, Mazzieri, J. 2016. El riego por aspersión en la norpatagonia y su efecto sobre las propiedades del suelo, PILQUEN AGRONOMIA. Viedma: CURZA. 2016 vol.15 n°1. p1 – 10
- Requena A., Mañueco L., Montenegro A. y Castillo E.: Coeficientes de cultivo de manzanos y perales en el Alto Valle del Río Negro. Artículo de divulgación. INTA EEA Alto Valle. Centro regional Patagonia Norte. 5p. (2016).
- Reyes Calvo, G., Zamora Gatica, G., Torres, P., Gajardo, G., & Toledo, B. (2015). Estudio agrológico Región de Coquimbo: descripción de suelos materiales y símbolos, 2012. Sobre ortoimágenes a escala de salida 1: 10.000.(Pub. CIREN N° 196).
- Richards, L. A. (1956). Sample retainers for measuring water retention by soil. Soil Science Society of America Proceedings, 20(3), 301–303.
- Ríos-Rojas L., Ordonez-Córdoba J., Bulla B., Gómez O., Enciso R. & Martínez M. 2024a. IoT network to water management in an irrigation district: Study case in Colombia. Journal of Applied Research and Technology 22, 206-218. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2024.22.2.2274>
- Ríos-Rojas L., Cano-Benítez M., Castillo-Sánchez L., & Martínez M. 2024b. Agricultura 4.0: cuándo, cuánto y cómo regar. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7407112>
- Romero, M. (2012). Comportamiento fisiológico del aguacate (*Persea americana* mill.) Variedad Lorena en la zona de Mariquita, Tolima. Tesis de MSc. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9437>.
- Rosa, R. D., Paredes, P., Rodrigues, G. C., Alves, I., & Pereira, L. S. (2010). O Modelo SIMDualKc para simulação de irrigação e manejo de calendários de irrigação. En Pereira, L. S., Mexia, J. T., & Pires, C. A. (Eds.), Gestão do Risco em Secas. Métodos, Tecnologias e Desafios (pp. 279–

- 
- 300). Colibri e CEER, Lisboa.
- ROSSI, P.: Agua subterránea en el Alto Valle de la Provincia de Río Negro. Departamento Provincial de Aguas, Provincia de Río Negro. 37 p [en línea]. <https://dpa.rionegro.gov.ar/?contID=30234>. (2013).
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. 2020. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. DOI:10.3390/agronomy10020207
- Shackel, K.; Ahmadi, H.; Biasi, W.; Buchner, R.; Goldhamer, D.; Gurusinghe, S.; Hasey, J.; Kester, D.; Krueger, B.; Lampinen, B.; McGourty, G.; Micke, W.; Mitcham, E.; Olson, B.; Pellletrau, K.; Philips, H.; Ramos, D.; Schwankl, L.; Sibbett, S.; Snyder, R.; Southwick, S.; Stevenson, M.; Thorpe, M.; Weinbaum, S.; Yeager, J. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *Hort Thechnology* 7(1): 23-29.
- Seleiman M., Al-Suhaibani N., Ali N., Akmal M., Alotaibi M., Refay Y., Dindaroglu T., Abdul-Wajid H., Battaglia M. 2021. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants (Basel)*; 10(2):259. doi: 10.3390/plants10020259.
- SENASA: Anuario Estadístico 2023. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) (Argentina: Centro Regional Patagonia Norte). (2024).
- Temesgen B. 2020. Effects of Drought Stress on Crop Production and Productivity. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences (IJRSAS)*; Vol. 6, Issue 9, 2020, PP 34-43; ISSN No. (Online) 2454-6224. DOI: <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0609005>
- Taghvaeian, S., Comas, L. H., DeJonge, K. C., & Trout, T. J. (2014). Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. *Agricultural Water Management*, 144, 69-80.
- Torres, E.A. 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo bajo estrés hídrico y suelo desnudo Torres Prieto, E.A., 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo baj. Tesis Univ. Castilla-La Mancha. doi: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=894945>.
- Universidad de La Serena. (2017, 17 de enero). Laboratorio PROMMRA de la ULS crea herramienta web para seguimiento del uso de suelo agrícola. Recuperado de <https://www.userena.cl/actualidad/2257-laboratorio-prommra-de-la-uls-crea-herramienta-web-para-seguimiento-del-uso-de-suelo-agr%C3%ADcola.html>
- Walker, W. R., & Skogerboe, G. V. (1987). Surface irrigation. Theory and practice. Prentice-Hall.
- Zelmer, H, Barrionuevo, N, Martínez, RS y D'Onofrio, M. 2015. Área regada por pivot en la cuenca del Río Negro y caracterización de su funcionamiento. CONAGUA. Paraná, Argentina, p238.

Instituciones participantes



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org