

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**EVALUACIÓN DE SENSORES VÍA TELEMETRÍA E IMÁGENES
MULTIESPECTRALES COMO HERRAMIENTAS PARA EL MANEJO DEL
RIEGO EN UN HUERTO DE CLEMENTINAS EN LA COMUNA DE OVALLE**

NICOLÁS IGNACIO ASTROZA GONZÁLEZ

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO A
LA FACULTAD DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN, PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA

CHILLÁN – CHILE

2023

**EVALUACIÓN DE SENSORES VÍA TELEMETRÍA E IMÁGENES
MULTIESPECTRALES COMO HERRAMIENTAS PARA EL MANEJO DEL
RIEGO EN UN HUERTO DE CLEMENTINAS EN LA COMUNA DE OVALLE**

Aprobado por:

Octavio Lagos Roa

Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.

Profesor Asociado

Profesor Guía

Nicole Uslar Valle

Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.

Profesor Asistente

Profesor Asesor

Camilo Souto Escalona

Ingeniero Civil Agrícola, Dr.

Profesor Asistente

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera

Ingeniero Civil, Ph. D.

Profesor Titular

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez

Ingeniero Agrónomo, Ph. D.

Profesor Asociado

Decana

AGRADECIMIENTOS

En esta ocasión quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo brindado durante este ciclo, en especial a los más cercanos Juan Luis, Ximena, Camila, Alicia y Armando. También agradecer a mi profesor guía Dr. Octavio Lagos por la buena disposición a la hora de resolver mis dudas. A los amigos que me entregó la universidad y que hicieron la etapa universitaria mucho mas agradable y llevadera.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	11
SUMMARY	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo general.....	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	17
3.1. Sitio de evaluación	17
4. METODOLOGÍA.....	21
4.1. Estación meteorológica automática	21
4.2. Evapotranspiración de cultivo.....	22
4.3. Determinación coeficiente de cultivo (Kc).....	22
4.4. Sonda de humedad de suelo FDR.....	24
4.5. Sensor de potencial hídrico.....	26
4.6. Determinación lámina de riego.....	28
4.6.1. Riego registrado por Agrícola Camarico.....	28
4.6.2. Riego estimado a partir de ETo y Kc	29
4.6.3. Riego estimado mediante sonda de humedad.....	31
4.6.4. Riego estimado por Agrícola Camarico.....	32
4.6.5. Riego estimado a partir de un transductor de presión asociado al sensor de potencial hídrico.....	33

	Página
4.7. Relación entre humedad de suelo y potencial hídrico	33
4.8. Imágenes (UAVs)	34
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
5.1. Coeficiente de cultivo (Kc).....	37
5.2. Evapotranspiración de cultivo (ETc)	38
5.3. Determinación lámina de riego.....	41
5.4. Relación entre humedad de suelo y potencial hídrico	46
5.5. Variabilidad espacial del huerto	48
6. CONCLUSIONES.....	54
7. LITERATURA CITADA	57
8. ANEXO.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación geográfica (Datum WGS84, huso 19) correspondiente al sitio de evaluación en la región de Coquimbo, comuna de Ovalle sector de Camarico.....	17
Figura 2. Estación meteorológica automática (EMA) instalada en el huerto...	21
Figura 3. Relación entre el porcentaje de evapotranspiración de un árbol maduro, con respecto al porcentaje de suelo sombreado al mediodía.....	24
Figura 4. Captura de pantalla de la aplicación de riego de la plataforma web Lem System.....	25
Figura 5. Distribución de las sondas de humedad (FDR) instaladas en el predio de evaluación.....	26
Figura 6. Captura de pantalla de la plataforma web de Flora Pulse.....	27
Figura 7. Sensor de potencial hídrico Flora Pulse instalado en el huerto.....	28
Figura 8. Diferencia del contenido de humedad del suelo entre el inicio y el fin del riego.....	31
Figura 9. Captura de pantalla de la Plataforma Agrícola Satelital de Chile (PLAS) desplegada sobre el sitio de evaluación.....	35
Figura 10. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido por el drone eBee en el huerto analizado.....	36

Figura 11. Evapotranspiración estándar de referencia (ET _o) y evapotranspiración de cultivo (ET _c) durante los meses de estudio.....	40
Figura 12. Total acumulado de evapotranspiración estándar de referencia (ET _o) y evapotranspiración de cultivo (ET _c) durante los meses de estudio.....	40
Figura 13. Lámina de riego aplicada entre los meses de noviembre y marzo de la temporada 2022 – 2023.....	41
Figura 14. Lámina de riego acumulada entre los meses de noviembre y marzo de la temporada 2022 – 2023.....	42
Figura 15. Relación entre el riego acumulado estimado por Agrícola Camarico y los riegos estimados y corregidos por el sensor de potencial hídrico.....	44
Figura 16. Relación entre el riego acumulado estimado por Agrícola Camarico y los riegos estimados mediante la sonda de humedad con diferentes valores de capacidad de campo.....	45
Figura 17. Relación entre potencial hídrico del tallo del sensor 1 y la humedad del suelo.....	46
Figura 18. Relación entre potencial hídrico del tallo del sensor 2 y la humedad del suelo.....	47
Figura 19. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido del satélite Sentinel 2B en el huerto analizado.....	48
Figura 20. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) del huerto durante el periodo analizado.....	49

- Figura 21. Coeficiente de cultivo en píxeles cercanos a la sonda de humedad..... 50
- Figura 22. Etapa de cuajado del fruto durante el mes de noviembre con un valor de NDVI de 0,37 y Kc aproximado de 0,3151
- Figura 23. Etapa de crecimiento y desarrollo del fruto durante el mes de diciembre con un valor de NDVI de 0,44 y Kc aproximado de 0,39.....52
- Figura 24. Etapa de crecimiento y desarrollo del fruto durante el mes de enero con un valor de NDVI de 0,43 y Kc aproximado de 0,39.....52
- Figura 25. Etapa de crecimiento y desarrollo del fruto durante el mes de febrero con un valor de NDVI de 0,38 y Kc aproximado de 0,28.....53
- Figura 26. Etapa de crecimiento y desarrollo del fruto durante el mes de marzo con un valor de NDVI de 0,41 y Kc aproximado de 0,31.....53

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Antecedentes generales del diseño de riego del huerto.....	19
Tabla 2. Parámetros Físico – Hídricos del sitio de estudio.....	20
Tabla 3. Principales características de las imágenes satelitales disponibles en la plataforma PLAS.....	35
Tabla 4. Valores de coeficiente de cultivo Kc para cítricos en función del porcentaje de área sombreada y el control de malezas.....	37
Tabla 5. Total acumulado de evapotranspiración estándar de referencia medido (ETo) y evapotranspiración de cultivo estimada (ETc) para los meses de análisis.....	39
Tabla 6. Promedio diario de evapotranspiración estándar de referencia medido (ETo) y evapotranspiración de cultivo estimada (ETc) durante los meses de análisis.....	39

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Evapotranspiración de cultivo (ET_c).....	22
Ecuación 2. Coeficiente de cultivo clementinas (K_c).....	23
Ecuación 3. Caudal requerido (Q_R).....	29
Ecuación 4. Tiempo de riego (T_dR).....	30
Ecuación 5. Lámina de riego estimada (RE).....	30
Ecuación 6. Riego Agrícola Camarico (RC).....	32

EVALUACIÓN DE SENSORES VÍA TELEMETRÍA E IMÁGENES MULTIESPECTRALES COMO HERRAMIENTAS PARA EL MANEJO DEL RIEGO EN UN HUERTO DE CLEMENTINAS EN LA COMUNA DE OVALLE

Palabras claves: Potencial hídrico, humedad de suelo, lámina de riego.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue realizar una evaluación de sensores de humedad de suelo y potencial hídrico del tallo vía telemetría e imágenes multiespectrales, en un huerto de clementinas ubicado en la comuna de Ovalle, Chile. En el análisis se comparó la lámina de riego estimada por el agricultor, riego estimado a través del coeficiente de cultivo (K_c), riego registrado por el agricultor y el riego estimado a través de los sensores de potencial hídrico y humedad de suelo. También se determinó la correlación entre las lecturas de los sensores de potencial hídrico del tallo y humedad de suelo a una profundidad de 20 cm. Además, mediante imágenes satelitales obtenidas de la plataforma PLAS del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) se logró determinar la variabilidad espacial del huerto en estudio. La metodología empleada permitió establecer que existe una buena relación entre el riego aplicado por el agricultor y la lámina de riego estimada a partir de los sensores, los cuales son un buen apoyo para el manejo del riego. También se determinó que las lecturas de la sonda de potencial hídrico son un buen indicador para la evaluación de estrés hídrico de la planta. Finalmente, se estableció que es recomendable utilizar un coeficiente de cultivo variable, según la etapa fenológica en la que éste se encuentre.

**SENSORS EVALUATION USING TELEMETRY AND MULTISPECTRAL
IMAGES AS TOOLS FOR IRRIGATION MANAGEMENT AT A
CLEMENTINE ORCHARD IN THE MUNICIPALITY OF OVALLE**

Keywords: Water potential, soil moisture, irrigation depth

SUMMARY

This work objective was to carry out an evaluation of soil moisture sensors and stem water potential using telemetry and multispectral images in at a clementine orchard located in the Ovalle district, Chile. In this analysis, the irrigation depth estimated by the farmer, irrigation estimated through the crop coefficient (K_c), irrigation registered by the farmer and the estimated irrigation through the sensors of water potential and soil humidity were compared. The correlation between the readings of the stem water potential sensors and soil moisture at a depth of twenty centimeters was also determined. Besides, satellite images obtained from the PLAS platform of the Institute Agricultural Research (INIA), allowed us to determine the spatial variability of the orchard in research. Through the methodology used, it is possible to conclude that there is a good relationship between the irrigation method used by the farmer and the irrigation depth estimated by the sensors which are a good support for irrigation management. It was also determined that the readings of the water potential testing are a good indicator for the evaluation of water stress in the plant. So, the conclusion is that it is advisable to use a variable crop coefficient depending on the phenological stage in which it is in.

1. INTRODUCCION

El sector agrícola no solo se encuentra bajo presión de aumentar la producción de alimentos en consonancia con la creciente demanda, sino también de hacerlo de manera sostenible (FAO, 2020). En cuanto al escenario de los cítricos, a raíz de la pandemia de Covid-19 se generó un cambio en la tendencia de consumo hacia una alimentación más saludable priorizando los productos cítricos, lo que hizo que las importaciones mundiales aumentaran en un 15% (Luis Corvera, RedAgricola 2021).

En cuanto a la producción general de cítricos, considerando naranjas, mandarinas, tangerinas, pomelo, lima y limón, se posicionan China, Brasil y Estados Unidos como los principales productores a nivel mundial (USDA, 2022).

Chile tradicionalmente no era considerado como un país citrícola, la producción era solamente para abastecer el mercado local, pero en los últimos 20 años, se realizaron algunos cambios importantes como la migración de los cultivos hacia la zona centro norte, además del cambio varietal y el cambio en la importancia de las especies priorizando las mandarinas y limones. Esto ha permitido aumentar la producción, mejorar la calidad y diversificar los mercados (Betina Ernst, 2021). Actualmente las exportaciones chilenas se dirigen a Estados Unidos, siendo el principal importador de cítricos con un 87% seguido de China con un 8% y Europa con un 3% (Comité de cítricos, 2021).

A nivel local, la región de Coquimbo se posiciona como la principal productora de cítricos, dado que tiene la mayor superficie plantada, llegando a las 7563,2 hectáreas, donde principalmente dominan los mandarinos y limoneros con 5309,06 y 1628,35 hectáreas respectivamente (Ciren, 2021). Esta gran superficie productiva se debe principalmente a las condiciones climáticas de la región, donde las temperaturas promedio rondan los 13° grados Celsius en temporada de cosecha, no obstante, se debe tener cuidado con las temperaturas inferiores a 1° grado Celsius dado que dañan la fruta y cuando estas temperaturas duran lo suficiente pueden provocar daño permanente en las plantas, por lo tanto, hay que tener bastante precaución con las heladas. También los suelos francos y franco – arenoso de la zona, profundos y con buen drenaje generan condiciones ideales para la producción de cítricos (ViLab, 2022).

Como la producción se concentra en la zona centro norte de Chile, donde el agua no es un recurso en abundancia, el riego de los cultivos pasa a ser un factor fundamental. Cuando la humedad del suelo está más cerca de capacidad de campo, también se está más cerca de alcanzar el potencial productivo del cultivo, por ende, los cítricos requieren agua para producir un fruto de calidad exportable, a raíz de esto el criterio o umbral de riego no debe ser tan elevado.

La cantidad de agua que se debe reponer para el adecuado desarrollo del cultivo está dada por la suma entre la evaporación de agua desde el suelo y la transpiración de la planta, lo que se traduce en la evapotranspiración del cultivo (ETc) en la cual influyen factores climáticos como temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, además de factores del cultivo como el diámetro de sombreo, por lo tanto, la demanda de agua de los cítricos está dada por la evapotranspiración estándar de referencia para cultivo corto (ETo) y un coeficiente de cultivo (Kc) que varía según la etapa de desarrollo de la planta (INIA, 2011).

Como el país atraviesa una situación de escasez hídrica, la idea es producir cada vez más alimentos de calidad con la menor cantidad de agua posible y para esto es necesario conocer cómo funciona el suelo y la planta para poder tomar decisiones. Es por esta razón que se ha ido incorporando tecnología a la agricultura, como sensores de humedad de suelo, sensores de potencial hídrico de la planta, tensiómetros, estaciones meteorológicas automáticas (EMA) y vehículos aéreos no tripulados (UAVs).

Estas tecnologías que se han ido incorporando a la agricultura y que están disponibles para los agricultores cada vez a un menor costo, permiten conocer el estado en tiempo real del huerto y al estar bien calibradas y tomar las decisiones correctas en base a los datos que entregan, se puede incrementar la productividad del huerto y disminuir el consumo hídrico.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar sensores de humedad de suelo, potencial hídrico de la planta, variables climáticas e imágenes multiespectrales como instrumentos para el manejo del riego en un huerto de clementinas en la comuna de Ovalle.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la relación existente entre la lámina de riego aplicada por el agricultor, la lámina aplicada estimada a través de una sonda de humedad de suelo y la lámina teórica de riego requerida por el cultivo estimada a partir de datos medidos de ETo y Kc desde literatura.
- Analizar la correlación entre las lecturas de la sonda de humedad de suelo FDR y el sensor de potencial hídrico de la planta Flora Pulse.
- Estudiar la variabilidad espacial del huerto mediante el uso de imágenes multiespectrales.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Sitio de evaluación

El sitio de estudio está ubicado en la región de Coquimbo, en la comuna de Ovalle, sector de Camarico. El área de evaluación cuenta con 11,26 hectáreas de clementinas de la variedad Oro grande.

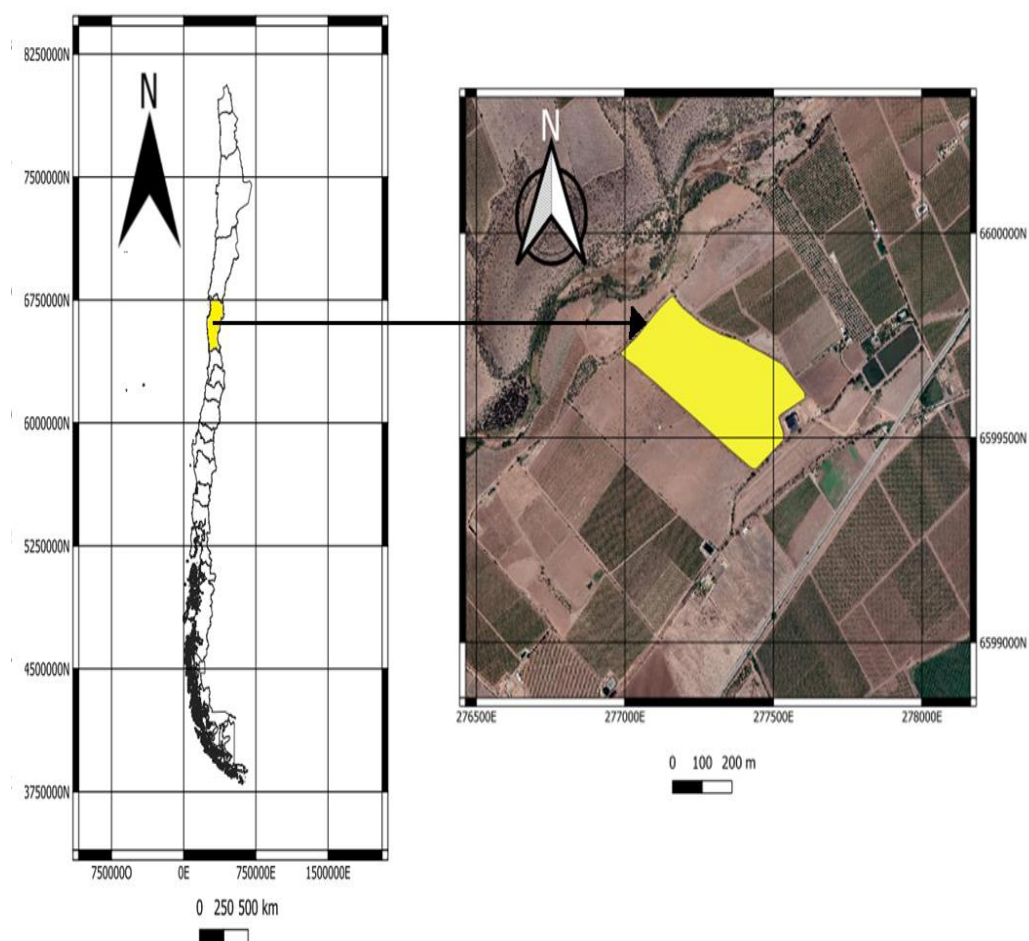


Figura 1. Ubicación geográfica (Datum WGS84, huso 19) correspondiente al sitio de evaluación en la región de Coquimbo, comuna de Ovalle sector de Camarico.

La comuna de Ovalle presenta dos tipos de clima según la clasificación climática de Köppen, los cuales son clima semiárido con nublados abundantes (BSn) y clima semiárido templado con lluvias invernales (BSks). La temperatura media en la comuna ronda los 17°C, con una evapotranspiración estándar de referencia (ETo) de aproximadamente 1350 mm al año y las precipitaciones anuales rondan los 155 mm, donde la mayor parte de la precipitación cae en los meses de junio y julio.

En el predio en evaluación, existen dos plantaciones de la misma variedad, pero con una diferencia de edad de las plantas de un año, la primera plantación se realizó en diciembre de 2019 y tiene una superficie de 8 hectáreas, mientras que la segunda fue en diciembre de 2020 abarcando una superficie de 3,26 hectáreas, las cuales ya tienen una altura aproximada de las plantas de 1,7 metros.

Como se mencionó, ambas plantaciones son de la variedad Oro grande, en un portainjerto *Citranges Carrizo* el cual tiene las características de que produce plantas vigorosas, de tamaño intermedio, productivas y con alta calidad de fruta.

Dicho portainjerto, tiene buen comportamiento en suelos profundos y por tal razón es que la plantación se encuentra sobre camellones de 60 centímetros de altura aproximadamente. El marco de plantación del huerto está distribuido a una distancia entre hileras (D_{EH}) de 5 metros y sobre hilera (D_{SH}) de 2 metros, alcanzando un total de 1000 plantas por hectárea.

El predio cuenta con un sistema de riego por goteo el cual está dividido en 4 sectores, el sector 1 tiene una superficie de 3,1 hectáreas, el sector 2 una superficie de 2,7 hectáreas, el sector 3 posee 2,9 hectáreas mientras que el sector 4 una superficie de 2,6 hectáreas. También cuenta con dos laterales por hilera con 8 goteros auto compensados por planta debido a la topografía del terreno, los cuales entregan un caudal de 2 L h⁻¹ (Tabla 1).

En cuanto a los parámetros físico – hídricos del suelo, según el análisis desarrollado por el laboratorio de diagnóstico nutricional de suelo y plantas del INIA, el sitio cuenta con un suelo de textura franco – arcillo – arenoso en los primeros 30 cm de suelo y un suelo de textura franco – arenoso en los segundos 30 cm analizados (Tabla 2).

Tabla 1. Antecedentes generales del diseño de riego del huerto.

Marco de plantación (m x m)	Densidad de plantas (plantas ha ⁻¹)	Laterales por hilera (N°)	goteros por planta (N°)	Caudal goteros auto compensados (L h ⁻¹)	goteros por hectárea (N°)
5 x 2	1000	2	8	2	8000

Fuente: Empresa Agrícola Camarico Ltda.

Tabla 2. Parámetros Físico – Hídricos del sitio de estudio.

Clase textural	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Cap. De campo (%vol)	Pto de marchitez (%vol)	ρ_{ap} (Mg m ⁻³)	Z (cm)
Franco-arcillo-arenoso	59,0	20,5	20,5	23,2	13,4	1,72	0 - 30
Franco-arenoso	61,6	17,9	20,5	22,3	12,9	1,81	30 - 60

Fuente: Laboratorio de diagnóstico nutricional de suelo y plantas INIA según sistema USDA.

4. METODOLOGÍA

4.1. Estación meteorológica automática (EMA)

En el sitio de estudio está instalada una estación meteorológica automática (EMA) perteneciente a la agrícola y monitoreada por un servicio de telemetría ofrecido por la empresa Lem System, a través de la cual se pueden registrar y observar variables climáticas relevantes como temperatura máxima y mínima del día, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, punto de rocío, precipitación y evapotranspiración diaria (ET_o), esta estación meteorológica registra el promedio de datos cada 10 minutos y sube dicha información a la plataforma online de Lem System.



Figura 2. Estación meteorológica automática (EMA) instalada en el huerto.

4.2. Evapotranspiración de cultivo (ETc)

Para obtener la evapotranspiración de cultivo, se utilizarán los datos de evapotranspiración estándar de referencia para cultivo corto (ET_o) que registra la estación meteorológica automática y que están disponibles en la plataforma de Lem System.

La evapotranspiración de cultivo se obtiene a partir del producto entre ET_o y K_c, como se expresa en la Ecuación 1.

$$ET_c = ET_o * K_c \quad [1]$$

De esta manera se puede determinar la cantidad de agua que es requerida por el cultivo, optimizando los recursos.

4.3. Determinación Coeficiente de cultivo (Kc)

Para lograr optimizar el uso del agua en la agricultura es necesario reponer la cantidad de agua exacta que requiere la planta, además, de considerar la eficiencia de aplicación del sistema de riego. La lámina de agua que se debe reponer está dada en parte por el coeficiente de cultivo (K_c). Dicho coeficiente incorpora las características particulares del cultivo como la altura, edad, reflectancia, área foliar y resistencia aerodinámica de la planta, además, de los efectos promedios de la evaporación en el suelo. El propósito de determinar el coeficiente de cultivo es realizar una planificación del manejo del riego y establecer calendarios básicos de riego. (FAO 56, 2006).

Para este análisis se utilizará un coeficiente de cultivo fijo el cual se determinó a partir del porcentaje de área sombreada del cultivo (%As) que tiene un valor de 24% el cual se obtuvo mediante el diámetro de sombreado del árbol medido al medio día. Este valor de (%As) se asociará con valores de K_c de literatura para cítricos en estado adulto.

En la región mediterránea de Sevilla, España, se estableció un coeficiente de cultivo de 0,65 para árboles cítricos maduros de 12 años y con una altura estimada de 3 metros. (Victoria González, 2018).

Por lo tanto, el coeficiente de cultivo de las clementinas se puede determinar a partir de la Ecuación 2.

$$K_{c_{clementinas}} = K_{c_{Literatura}} * \%Ev \quad [2]$$

Donde:

$\%Ev$: Porcentaje de evapotranspiración de un árbol adulto con respecto a un árbol joven (Figura 3).

$K_{c_{Literatura}}$: Coeficiente de cultivo obtenido de literatura para árboles maduros.

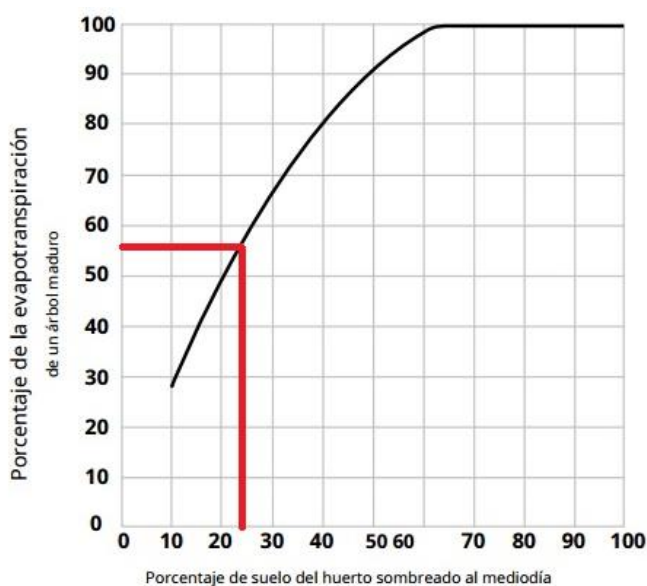


Figura 3. Relación entre el porcentaje de evapotranspiración de un árbol maduro, con respecto al porcentaje de suelo sombreado al mediodía.

4.4. Sonda de humedad de suelo FDR

Para monitorear la humedad del suelo y los riegos efectuados, se utilizan sondas de capacitancia FDR (Frequency Domain Reflectometry) las cuales relacionan la humedad del suelo con su constante dieléctrica, logrando transformar una señal eléctrica en un valor de contenido de humedad. En el sitio de estudio estas sondas están instaladas en el sector de riego 1 y 2, las cuales suben información actualizada a la plataforma de Lem System en un intervalo de tiempo de 10 minutos y muestra las curvas de humedad del suelo a profundidades de 10, 20, 40, 60, 80 y 100 centímetros. Si bien estas sondas son bien funcionales, la precaución que se debe tener en la instalación es que no debe quedar un espacio entre el sensor y el suelo dado que provocaría

flujos preferentes, por ende, el agua se drenaría en un menor tiempo, siendo contradictorio con lo que ocurre realmente en el resto de las plantas.

En la Figura 4 se muestra la pantalla principal de la aplicación de riego de la plataforma Lem System, en la cual se observan tres gráficos, el primero muestra el promedio de la curva de humedad de los sensores ubicados a diferentes profundidades, el segundo gráfico muestra la curva de humedad de cada sensor a profundidades de 10, 20, 40, 60, 80 y 100 centímetros y el tercer gráfico muestra la evapotranspiración estándar de referencia diaria (ET₀) y el porcentaje de cambio negativo que corresponde a la disminución de humedad día a día.

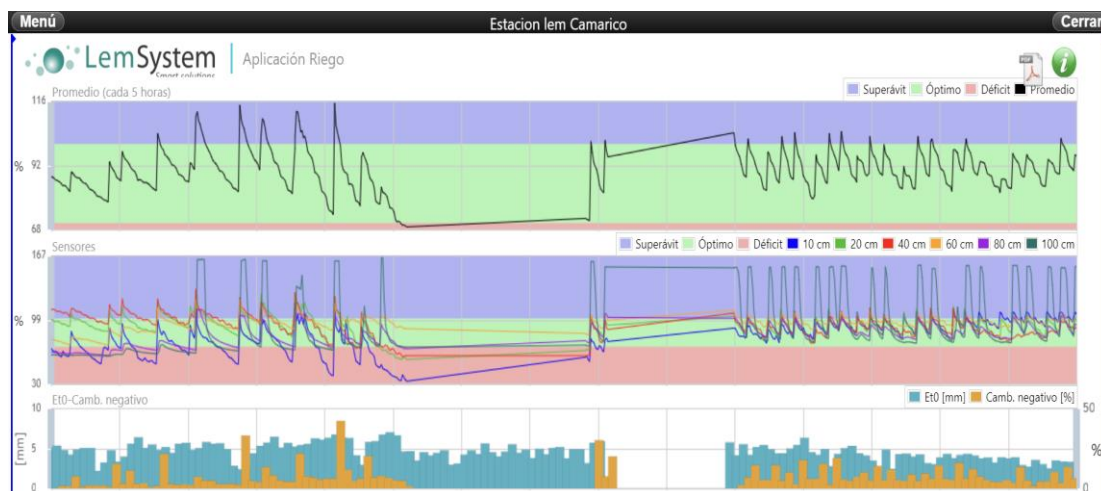


Figura 4. Captura de pantalla de la aplicación de riego de la plataforma web Lem System.



Figura 5. Distribución de las sondas de humedad (FDR) instaladas en el predio de evaluación.

4.5. Sensor de potencial hídrico

Con el objetivo de tener una visión más amplia respecto de lo que ocurre en el huerto y conociendo como es la variación de humedad del suelo, el conocer cómo está funcionando la planta es una ventaja para mejorar las aplicaciones de riego. Es por esto que en el sitio de estudio se encuentra instalado un sensor Flora Pulse (tensiómetro de microchip o microtensiómetro) el cual se incrusta en el tronco de la planta y mide directamente el estado del agua conocido como potencial hídrico en unidades de Bar. El sensor registra dos lecturas directamente dentro del tejido que transporta agua, generando una contramuestra de los valores obtenidos, lo que se traduce en una mayor confiabilidad de los datos. Una de las ventajas que presenta el sensor Flora Pulse, es que, de acuerdo con los datos obtenidos, se puede establecer una línea base de potencial hídrico de la planta, la cual se puede utilizar para

efectuar riegos deficitarios en los momentos pertinentes, lo que se traduce en un ahorro del recurso hídrico.

En la Figura 6 se muestra la pantalla principal de la plataforma online de la empresa Olivos (representa a Flora Pulse), en la cual se presentan dos gráficos, en el primero se muestran los valores horarios y diarios de potencial hídrico del sensor 1 y sensor 2. En el segundo gráfico se observan los valores mínimos diarios de potencial hídrico del sensor 1 y 2, además del tiempo de riego y el día de cada aplicación.



Figura 6. Captura de pantalla de la plataforma web de Flora Pulse.



Figura 7. Sensor de potencial hídrico Flora Pulse instalado en el huerto.

4.6. Determinación lámina de riego

Para establecer una relación entre los riegos registrados por el agricultor y los riegos estimados a partir de la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo, se analizaron las mismas fechas de las aplicaciones, por ende, la frecuencia de riego y evapotranspiración de cultivo acumulada entre riegos son iguales para ambos casos.

4.6.1. Riego registrado por Agrícola Camarico

En cuanto a los riegos registrados, se obtuvieron a partir de la planilla de riego proporcionada por el huerto en formato Excel. En este registro se indican los metros cúbicos aplicados por hectárea ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) durante cada riego, los cuales se transformaron a milímetros de riego para poder establecer la comparación.

4.6.2. Riego estimado a partir de ETo y Kc

Para determinar los riegos en base a ETo y Kc, se deben conocer algunos antecedentes generales del huerto y del sistema de riego, como el marco de plantación, distanciamiento entre emisores, número de emisores por planta, caudal de los emisores y la cantidad de laterales por hilera. De esta forma se pudo determinar el caudal requerido (Q_R), tiempo de riego (TdR) y lámina estimada de riego (RE), mediante las Ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente.

- Caudal requerido (Q_R)

$$Q_R = \frac{ETc * D_{EH} * D_{SH}}{Efa} \quad [3]$$

Donde:

ETc : Evapotranspiración de cultivo (mm día^{-1}).

D_{EH} : Distanciamiento entre hileras (m).

D_{SH} : Distanciamiento sobre hileras (m).

Efa : Eficiencia teórica de aplicación del sistema de riego (90%).

- Tiempo de riego (TdR)

$$TdR = \frac{Q_R * FdR}{q_e * N_e} \quad [4]$$

Donde:

Q_R : Caudal requerido (L día⁻¹ árbol⁻¹).

FdR : Frecuencia de riego (día).

q_e : Caudal del emisor (L h⁻¹).

N_e : Número de emisores por planta.

- Lámina de riego estimada (RE)

$$RE = \frac{q_e * N_L * TdR}{D_{EH} * D_{EE}} \quad [5]$$

Donde:

q_e : Caudal del emisor (L h⁻¹).

N_L : Número de laterales.

TdR : Tiempo de riego (h).

D_{EH} : Distancia entre hileras (m).

D_{EE} : Distancia entre emisores (m)

4.6.3. Riego estimado a partir de sonda de humedad

Para determinar la lámina de riego mediante la sonda de humedad FDR, se comprobó que las fechas de riego anotadas en la planilla del huerto coincidían con las fechas de riego que marcó la sonda. Posteriormente, se descargaron los datos de la humedad de Lem System y se analizó la variación en la humedad del suelo a la profundidad de 20 cm que es donde existe una mayor concentración de la zona radical del árbol según las calicatas realizadas.

Para esto se consideró la diferencia del contenido de humedad del suelo entre el inicio y el fin del riego, el cual se estableció cuando empieza a disminuir el contenido de humedad en la gráfica de los 20 cm. (Figura 8)

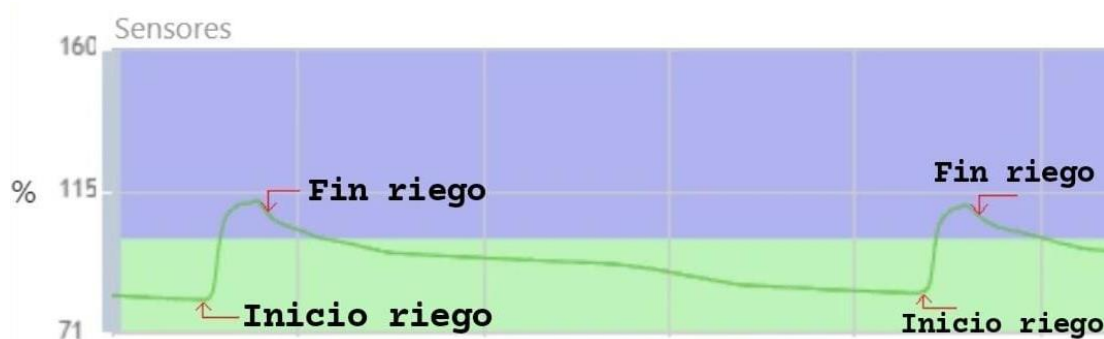


Figura 8. Diferencia del contenido de humedad del suelo entre el inicio y el fin del riego

4.6.4. Riego estimado por Agrícola Camarico

Con respecto al método utilizado por Agrícola Camarico para determinar la lámina de riego, se tiene que utilizan un coeficiente de cultivo para árbol adulto de 0,8 y un coeficiente de corrección por cubrimiento de 0,45 lo que entrega un coeficiente de cultivo de 0,36 además, de utilizar una eficiencia de aplicación del sistema de riego de un 80%.

- Riego Agrícola Camarico (RC)

$$RC = \frac{ET_o * K_c * K_r}{E_f a} \quad [6]$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración estándar de referencia (mm día⁻¹).

K_c : Coeficiente de cultivo árbol maduro.

K_r : Coeficiente de corrección por cubrimiento.

$E_f a$: Eficiencia de aplicación del sistema de riego.

4.6.5. Riego estimado a partir de un transductor de presión asociado al sensor de potencial hídrico

El sensor Flora Pulse, además de medir el estado de potencial hídrico de la planta, también cuenta con un transductor de presión el cual es capaz de registrar los cambios de presión en un lateral de riego y los tiempos de riego de cada aplicación. Esta información se encuentra en línea disponible en la plataforma O-Live de la empresa Olivos.

A partir de estos valores de tiempo de riego (TdR) y conociendo algunos antecedentes del sistema de riego se determinó la lámina aplicada según el sensor mediante la Ecuación 5.

4.7. Relación entre humedad de suelo y potencial hídrico

Para establecer la relación entre las lecturas de humedad de suelo y de potencial hídrico de la planta, se utilizó conjuntamente las plataformas web de las empresas Lem System y Olivos.

Para llevar a cabo este análisis, se registraron los valores mínimos diarios de potencial hídrico de los sensores P1 y P2 junto con ello, se elaboró un registro del horario en que estos valores ocurrían.

Posteriormente se analizaron los gráficos de humedad de suelo a la profundidad de 20 cm y se registraron los valores de humedad justo en la hora que se registraba el valor mínimo de cada sensor de potencial hídrico.

4.8. Imágenes UAVs

Las imágenes multiespectrales obtenidas a partir de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), mediante operaciones algebraicas entre las distintas bandas espectrales, entregan como resultado imágenes NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) cuya función es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación y el agua entre otros.

En estas imágenes se destacan gráficamente determinados píxeles los cuales están relacionados con parámetros de las cubiertas vegetales del huerto y se pueden relacionar con el funcionamiento del sistema de riego y la uniformidad que éste presenta.

Para la obtención de estas imágenes, se utilizó la Plataforma Agrícola Satelital de Chile (PLAS) del Ministerio de Agricultura (Figura 9), la cual muestra series temporales de imágenes obtenidas del satélite LANDSAT 8 de la NASA y los satélites SENTINEL 2A y SENTINEL 2B del programa Copernicus de la Agencia Satelital Europea (ESA). Esta plataforma tiene disponible capas de NDVI, Kc, RGB y valores históricos de ETo.

Para determinar la variabilidad espacial del huerto, se analizaron 24 imágenes satelitales comprendidas entre noviembre de 2022 y marzo de 2023 desde las cuales se obtuvo valores de NDVI y coeficiente de cultivo en los píxeles más próximos a la ubicación de la sonda FDR.

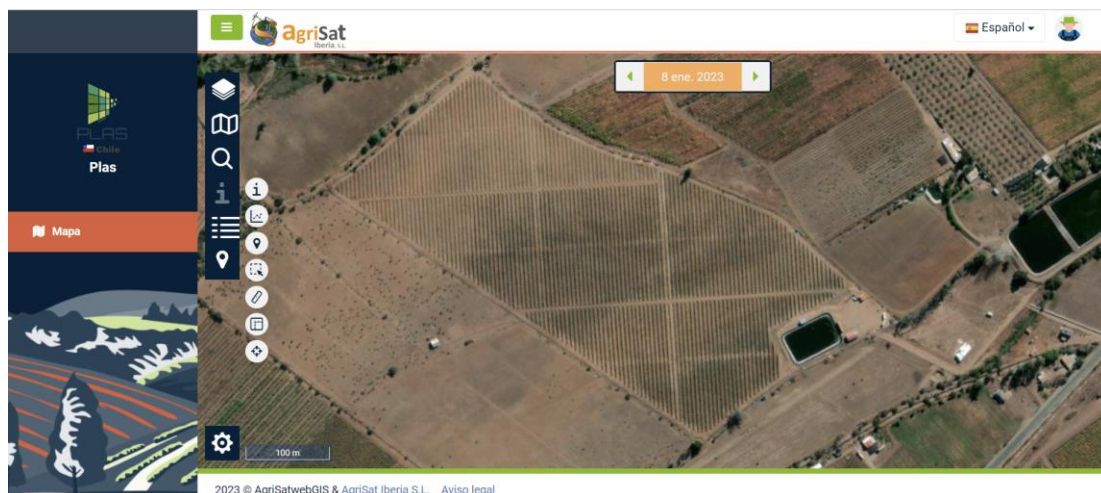


Figura 9. Captura de pantalla de la Plataforma Agrícola Satelital de Chile (PLAS) desplegada sobre el sitio de evaluación.

En la Tabla 3 se muestran las principales características de los satélites que utiliza la plataforma PLAS para obtener las imágenes, en ella se presentan el rango de cobertura de cada imagen, la resolución temporal que indica el tiempo de paso del satélite por sobre el sitio de estudio y la resolución espacial que corresponde a la distancia que puede cubrir el píxel medio de la imagen.

Tabla 3. Principales características de las imágenes satelitales disponibles en la plataforma PLAS.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (m)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A y 2B	100 x 100	10 días	10

Fuente: Claudio Balbontín, 2020.

En la Figura 10, se muestra el índice de vegetación de diferencia normalizada del sitio en evaluación obtenido a partir de imágenes capturadas por el drone eBee en el mes de abril del año 2022.

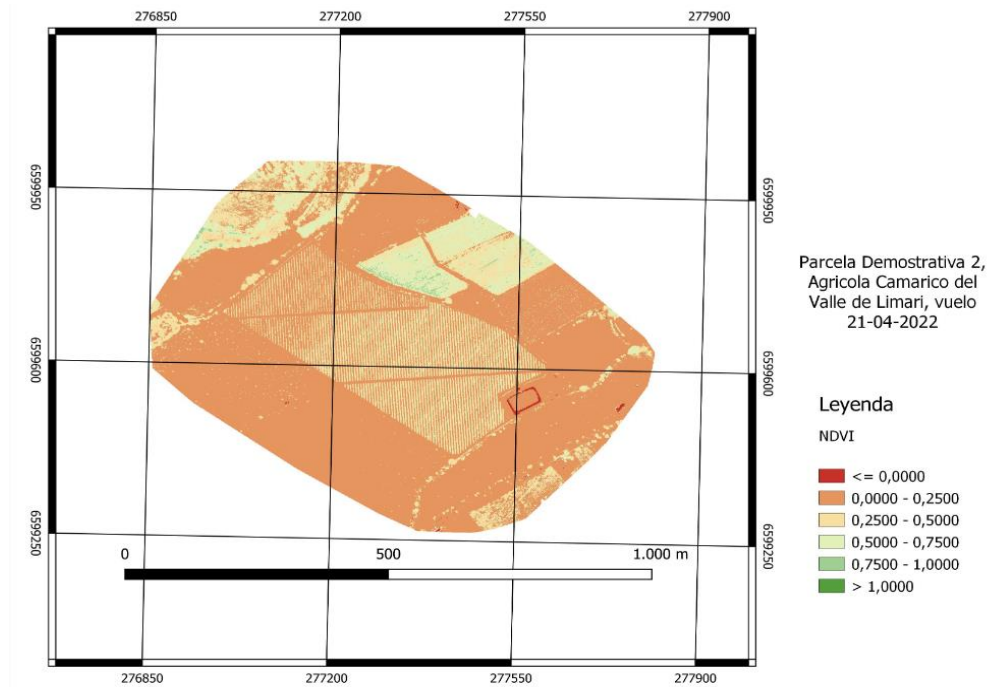


Figura 10. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido por el drone eBee en el huerto analizado.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Coeficiente de cultivo (Kc).

De acuerdo con la metodología empleada para determinar el coeficiente de cultivo, en la cual se considera la relación entre el porcentaje de evapotranspiración de un árbol maduro con respecto de uno joven, el porcentaje de área sombreada promedio de los árboles del huerto y el valor de coeficiente de cultivo para un árbol adulto, se obtuvo un valor de Kc fijo para el huerto en estudio de 0,36.

Por otra parte, Sánchez propone valores mensuales de coeficiente de cultivo en función del porcentaje de área sombreada y el control de malezas, los cuales fueron validados para riego localizado en cultivos de naranjos adultos de variedad Salustiana (Castel y Buj 1988) Washington Navel (Buj et al. 1990) y mandarinos regados por goteo (Castel 1991 y 1997) los cuales se incluyen en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de coeficiente de cultivo Kc para cítricos en función del porcentaje de área sombreada y el control de malezas.

% As	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
As > 70	0,79	0,74	0,84	0,73	0,63	0,66	0,65	0,66	0,62	0,55	0,62	0,68
As = 50	0,67	0,56	0,70	0,77	0,78	0,52	0,54	0,40	0,54	0,51	0,60	0,55
As = 20	0,44	0,49	0,66	0,62	0,42	0,33	0,39	0,22	0,20	0,35	0,31	0,40

Fuente: Castel et al. 1986 y Castel 1997.

Mediante interpolación entre valores de K_c para 20 y 70% de área sombreada se determinó un valor promedio de coeficiente de cultivo para el porcentaje de área sombreada del huerto (24%) obteniendo como resultado un K_c de 0,43 el cual es un valor superior al 0,36 obtenido previamente.

Esta diferencia entre los valores de K_c es atribuible principalmente a la diferencia entre las variedades analizadas y la ubicación del estudio. Además de que en Tabla 4 se considera un valor de K_c para las diferentes etapas del cultivo.

Es importante utilizar valores precisos de K_c dado que es fundamental para determinar la evapotranspiración del cultivo y lograr reponer la cantidad de agua que el cultivo realmente requiere. Por esta razón se utiliza el coeficiente de cultivo de 0,36 dado que atiende a las condiciones particulares del huerto analizado.

5.2. Evapotranspiración de cultivo (ETc)

Se sabe que los meses de mayor demanda hídrica en la zona centro – norte de Chile corresponden a los meses comprendidos entre noviembre y marzo, por ende, para establecer un calendario de riego y poder reponer la cantidad de agua que el cultivo requiere, se debe conocer cuánto es lo que el huerto está evapotranspirando. A continuación, en la Tabla 5 y Tabla 6, se presentan los valores de ET_o y ET_c acumulado mensual y promedio diario de la zona respectivamente.

Tabla 5. Total acumulado de evapotranspiración estándar de referencia medido (ET_o) y evapotranspiración de cultivo estimada (ET_c) para los meses de análisis.

Variable	Noviembre (mm mes ⁻¹)	Diciembre (mm mes ⁻¹)	Enero (mm mes ⁻¹)	Febrero (mm mes ⁻¹)	Marzo (mm mes ⁻¹)	Acumulado (mm)
ET _o	140,9	164,7	171,7	139,9	113,0	730,1
ET _c	50,7	59,3	61,8	50,4	40,7	262,8

Fuente: Estación meteorológica automática (EMA) instalada en el huerto.

Tabla 6. Promedio diario de evapotranspiración estándar de referencia medido (ET_o) y evapotranspiración de cultivo estimada (ET_c) durante los meses de análisis.

Variable	Noviembre (mm día ⁻¹)	Diciembre (mm día ⁻¹)	Enero (mm día ⁻¹)	Febrero (mm día ⁻¹)	Marzo (mm día ⁻¹)
ET _o	4,7	5,3	5,5	5,0	3,6
ET _c	1,7	1,9	2,0	1,8	1,3

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la estimación y medición de los valores de ET_c y ET_o respectivamente, (Figura 11 y Figura 12) es posible observar que los valores de ET_c durante el periodo en análisis son casi un tercio de los valores de ET_o, esto se debe básicamente al coeficiente de cultivo (0,36) el cual fue establecido para las condiciones particulares del huerto. Por lo tanto, el requerimiento hídrico del cultivo debería ser superior a la ET_c que ronda el acumulado de 263 mm durante los meses analizados.

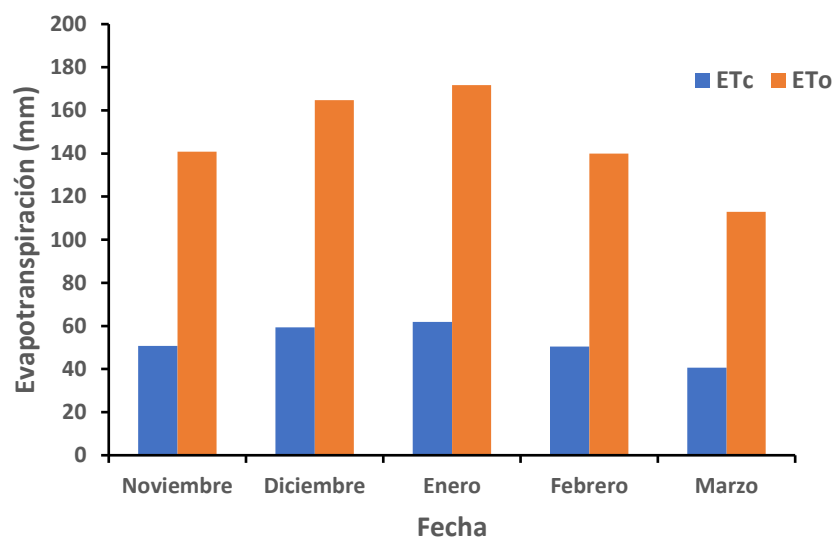


Figura 11. Evapotranspiración estándar de referencia (ETo) y Evapotranspiración de cultivo (ETc) durante los meses de estudio.

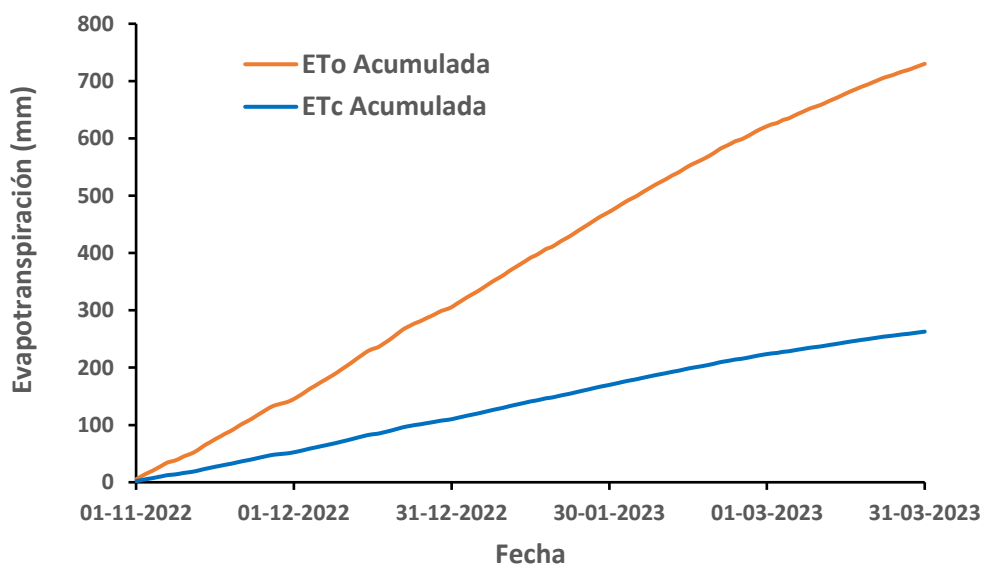


Figura 12. Total acumulado de evapotranspiración estándar de referencia (ETo) y evapotranspiración de cultivo (ETc) durante los meses de estudio.

5.3. Determinación lámina de riego

De acuerdo con la metodología utilizada para determinar la lámina de riego del cultivo, de las Ecuaciones 3, 4, 5 y 6 se obtuvieron los milímetros aplicados en cada riego durante la temporada. En la Figura 13 y 14 se puede observar la lámina aplicada y lámina acumulada de riegos respectivamente. Cabe mencionar que, desde la tercera semana de diciembre de 2022 hasta la primera semana de febrero de 2023, la sonda de humedad FDR tuvo problemas técnicos, por lo tanto, no quedó un registro de datos entre esas fechas.

También es importante comentar que, durante el periodo analizado, no hubo precipitaciones efectivas que pudieran influir en el contenido de humedad del suelo, pudiendo alterar la gráfica de la sonda FDR.

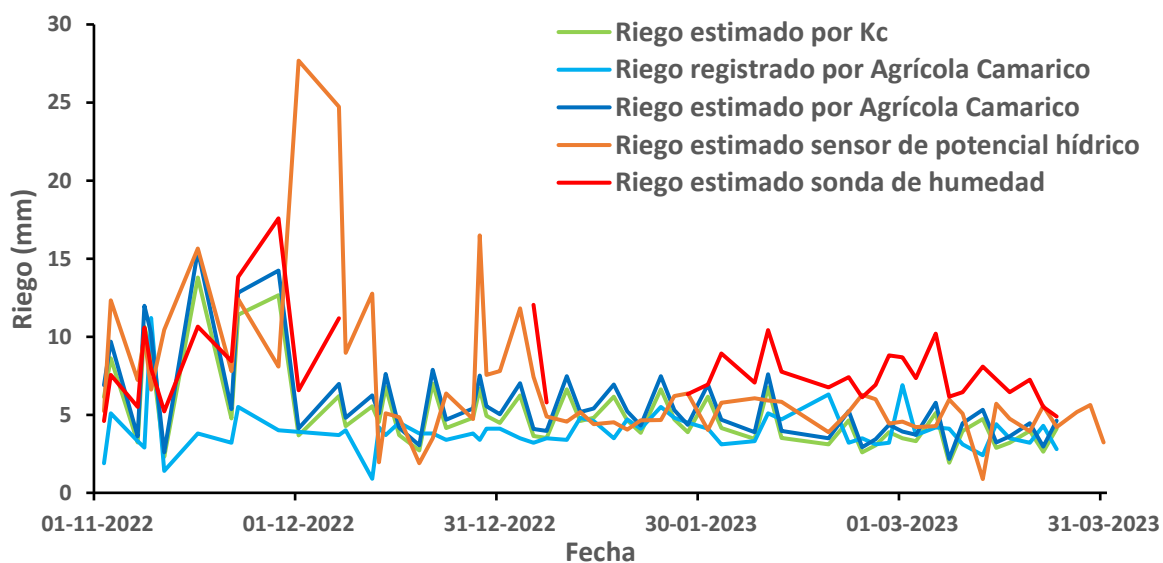


Figura 13. Lámina de riego aplicada entre los meses de noviembre y marzo de la temporada 2022 – 2023.

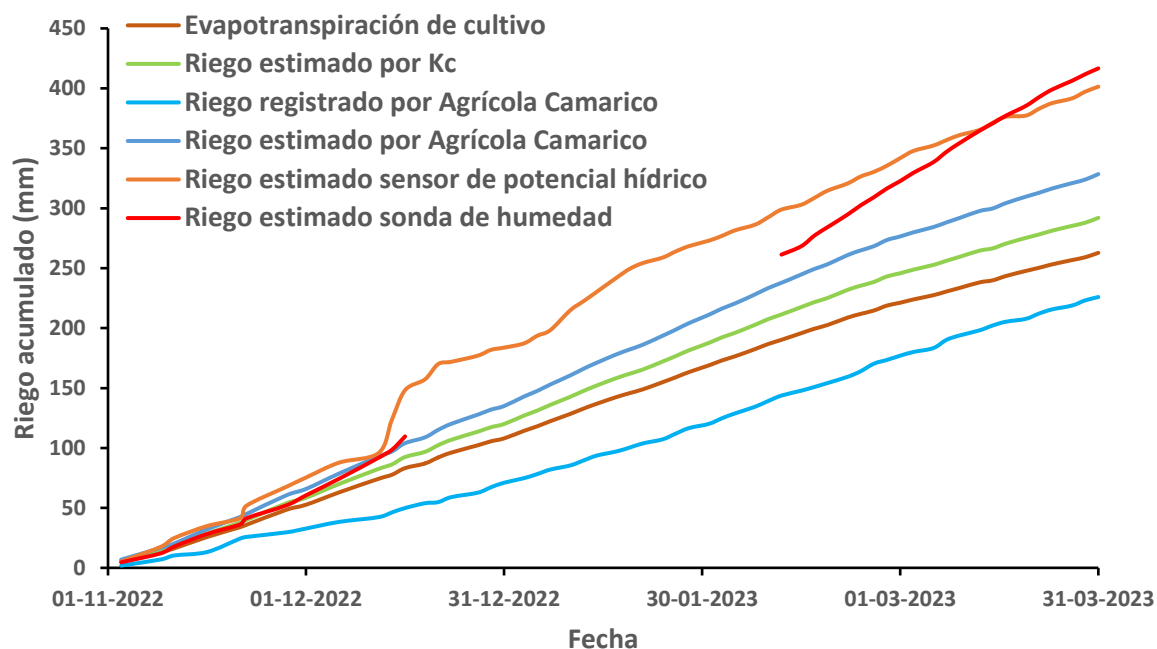


Figura 14. Lámina de riego acumulada entre los meses de noviembre y marzo de la temporada 2022 – 2023.

Al observar las Figuras 13 y 14, se aprecia que no existe relación entre los milímetros de riego aplicados durante la temporada, exceptuando la lámina de riego estimada mediante Kc y por Agrícola Camarico, los cuales se diferencian solamente por el parámetro de eficiencia de aplicación del sistema de riego (E_{fa}) empleado en la Ecuación 6.

De igual manera se observa que el riego estimado por Agrícola Camarico, riego estimado por Kc y el riego estimado por las sondas de humedad y potencial hídrico, están por sobre el valor de evapotranspiración del cultivo, por lo tanto, se estaría cumpliendo con el requerimiento hídrico.

También es de esperar que la lámina de riego estimada y registrada por Agrícola Camarico tuvieran el mismo comportamiento y existiera una similitud entre ellas, pero ocurre lo contrario, existe una gran diferencia entre ambos valores, considerando también que el riego registrado está por debajo del valor de evapotranspiración de cultivo. Esta diferencia entre riego estimado y registrado por la agrícola puede atribuirse principalmente a una incorrecta toma de datos del caudalímetro y registro de los cuarteles regados.

La gran diferencia entre el riego estimado por la agrícola y el sensor de potencial hídrico (Figuras 13 y 14) se debe principalmente a una anomalía en las horas de riego registradas por el sensor, ya que durante los meses de noviembre y diciembre se registraron tres riegos de 17,3 15,5 y 10,3 horas respectivamente los cuales están muy por sobre el promedio de horas y hacen que la lámina de riego aumente considerablemente en comparación a la estimada por Camarico. Para realizar un mejor análisis de esta situación, mediante la Ecuación 4 se determinó el tiempo que se debió regar durante esos días y se reemplazó el tiempo de riego realizando una corrección a la lámina estimada por el sensor en primera instancia (Figura 15).

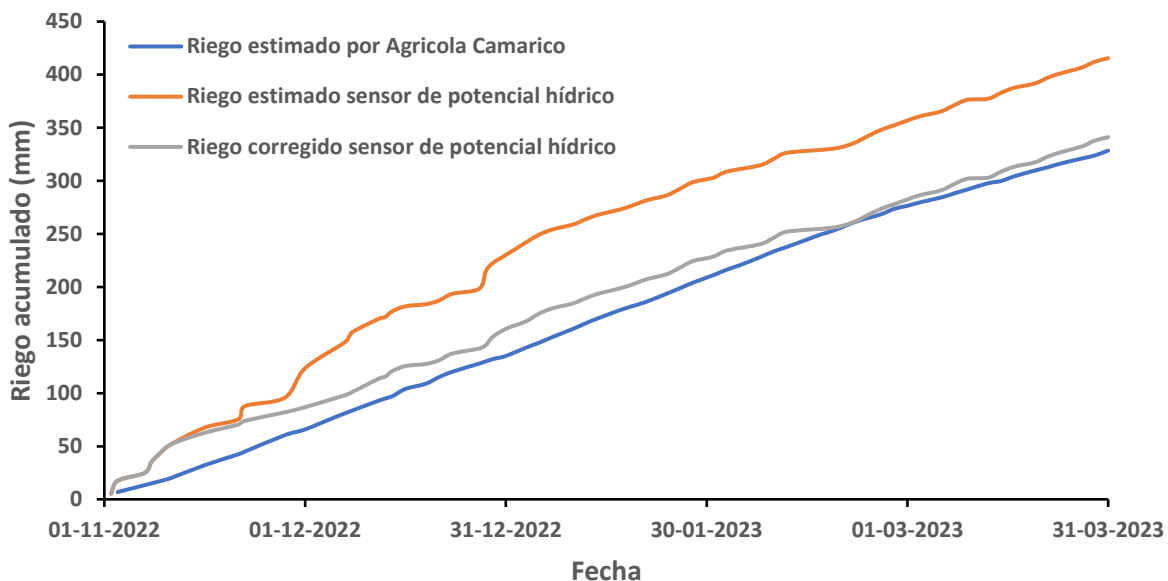


Figura 15. Relación entre el riego acumulado estimado por Agrícola Camarico y los riegos estimados y corregidos por el sensor de potencial hídrico.

En la Figura 15, se observa que al reemplazar las horas de riego (Riego corregido sensor de potencial hídrico) el riego acumulado disminuye logrando asimilarse al riego acumulado estimado por Agrícola Camarico.

También se observa que existe diferencia entre el riego estimado por Agrícola Camarico y el riego estimado a partir de la sonda de humedad (Figuras 13 y 14) donde se aprecia que el riego estimado por la sonda está muy por sobre del valor de riego estimado por la agrícola y el sensor de potencial hídrico.

Para analizar esta situación se realizó una comparación de la lámina acumulada de riego (Figura 16) considerando el valor de capacidad de campo que la aplicación Lem System tenía registrado y el valor de capacidad de campo que se presenta en la Tabla 2.

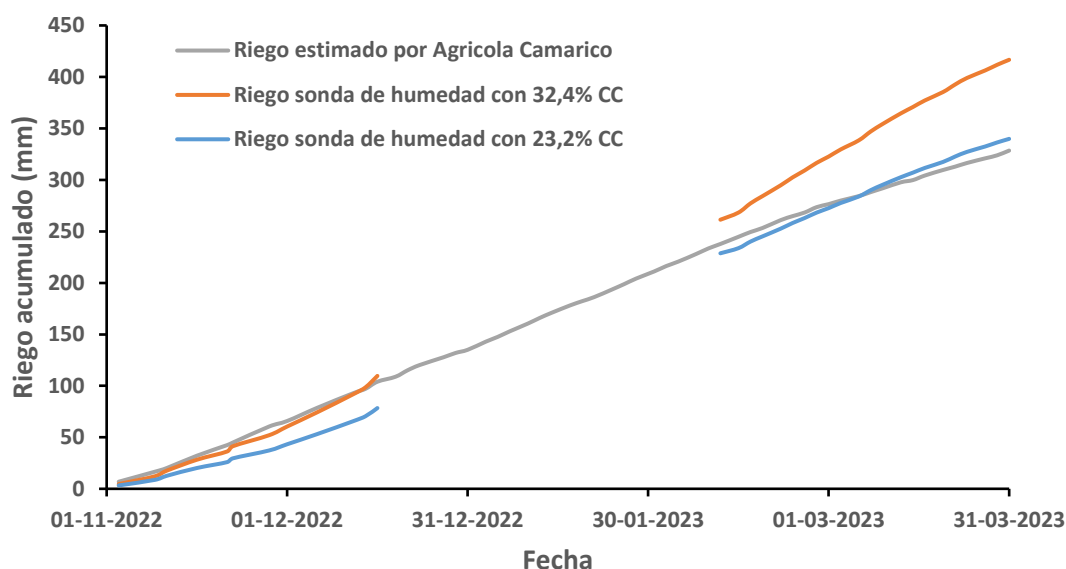


Figura 16. Relación entre el riego acumulado estimado por Agrícola Camarico y los riegos estimados mediante la sonda de humedad con diferentes valores de capacidad de campo.

En la Figura 16, se observa que al disminuir el valor de capacidad de campo registrado en la aplicación (32,4%) al valor obtenido del programa Soil Water Characteristics del USDA (23,2%) también disminuye la curva de riego acumulado, logrando asimilarse de mejor manera al riego estimado por la agrícola. Por lo tanto, de acuerdo con las Figuras 15 y 16, existe una similitud entre los sensores analizados y el método de la empresa para determinar el riego, lo cual indica que se estaría haciendo un buen manejo del riego en el huerto. Sin embargo, se debe tener presente el revisar los valores que arrojan los sensores de potencial hídrico y humedad, además de registrar meticulosamente los valores de caudalímetro y el sector que se está regando.

5.4. Relación entre humedad de suelo y potencial hídrico

A continuación, se establece la relación entre los valores mínimos diario de potencial hídrico del tallo obtenidos del sensor de Flora Pulse y el porcentaje de humedad de suelo a la profundidad de 20 cm entregado por la sonda FDR de Lem System.

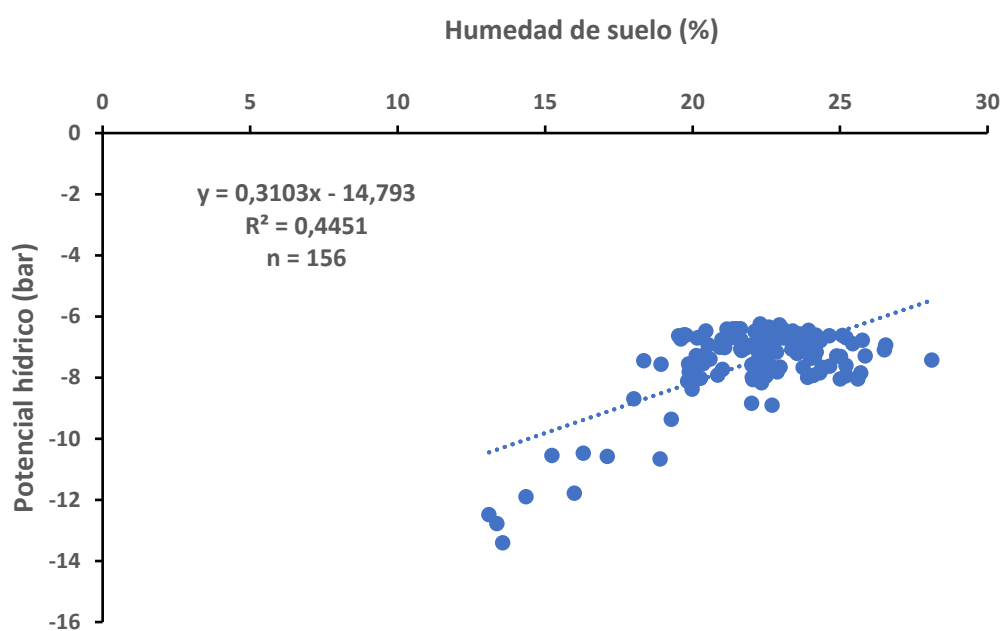


Figura 17. Relación entre potencial hídrico del tallo del sensor 1 y la humedad del suelo.

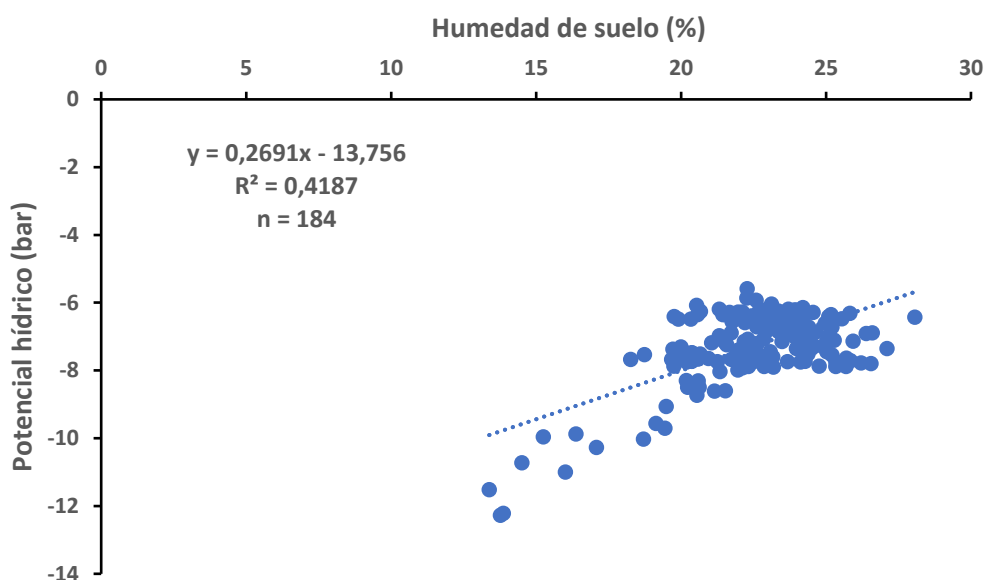


Figura 18. Relación entre potencial hídrico del tallo del sensor 2 y la humedad del suelo.

De las Figuras 17 y 18, se observa que a medida que disminuye la humedad del suelo, disminuyen los valores de potencial hídrico del tallo, salvo en algunas ocasiones que se aprecia que la humedad de suelo se mantiene, pero disminuye el potencial hídrico. También se observa que, de acuerdo con el ajuste de bondad, existe una relación moderada entre humedad de suelo y potencial hídrico del tallo de ambos sensores.

La correlación entre potencial hídrico y humedad de suelo del sensor 1 ($R^2 = 0,445$) fue levemente mayor a la del sensor 2 ($R^2 = 0,416$). Esto se atribuye principalmente a la cantidad de datos utilizados para el análisis, donde se eliminaron algunos valores “fuera de tipo” que indicaban disminución de potencial hídrico cuando los valores de humedad de suelo mostraban que la

estrata estaba en valores de saturación. También se aprecia que, durante el mes de diciembre, disminuyó el potencial hídrico, lo que indica que hubo un estrés en la planta producido por encontrarse en etapa de crecimiento y desarrollo del fruto, por ende, se debió incrementar el riego aplicado. A raíz de esto, se considera que el potencial hídrico del tallo es un buen indicador, sensible para la evaluación de estrés hídrico en el huerto.

5.5. Variabilidad espacial del huerto

De acuerdo con la metodología empleada para analizar la variabilidad espacial del huerto, de la plataforma PLAS se obtuvieron los valores de NDVI y Kc durante los meses comprendidos entre noviembre de 2022 y marzo de 2023.

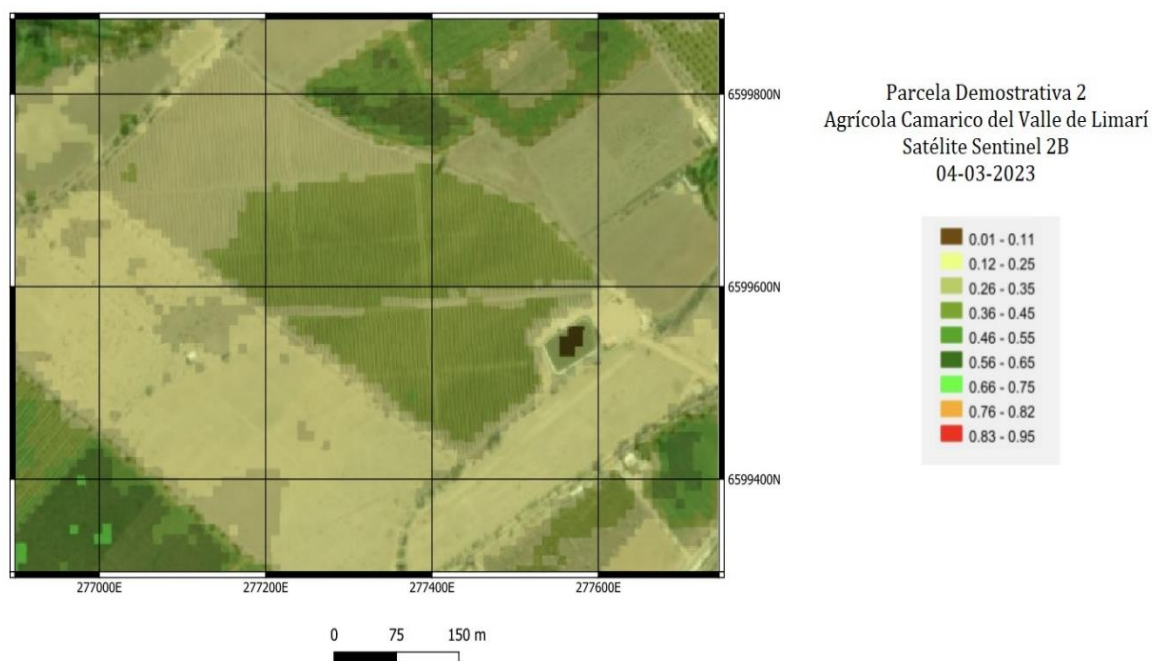


Figura 19. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido del satélite Sentinel 2B en el huerto analizado.

A continuación, en las Figuras 20 y 21 se muestra la variación de los valores NDVI y coeficiente de cultivo del huerto en estudio. Cabe recordar que para esto se analizaron los píxeles más cercanos a la sonda de humedad.

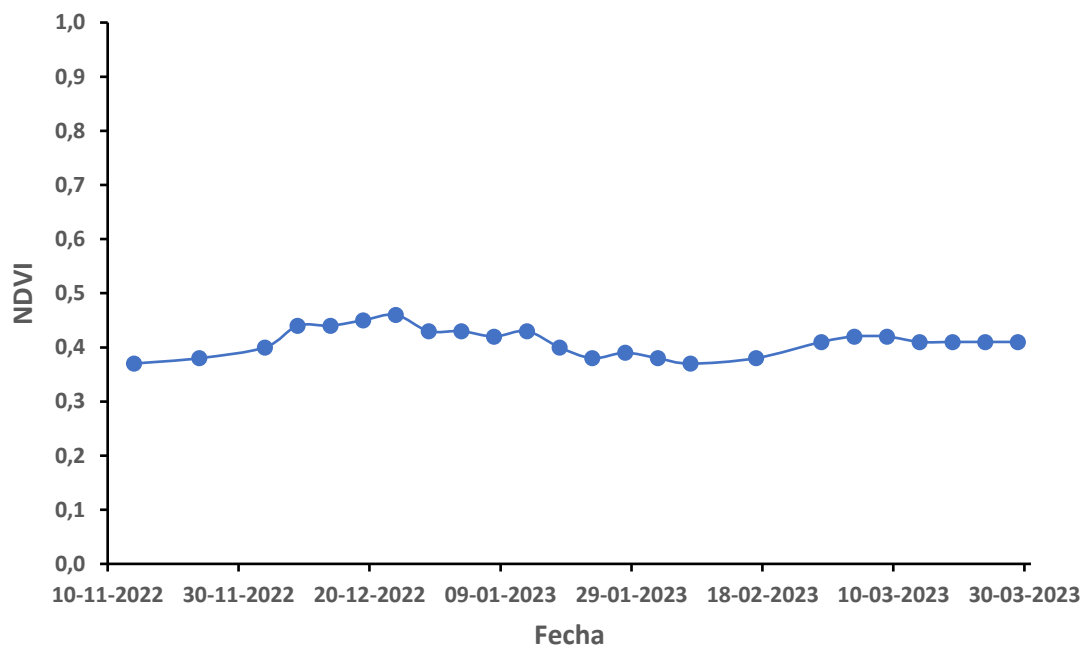


Figura 20. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) del huerto durante el periodo analizado.

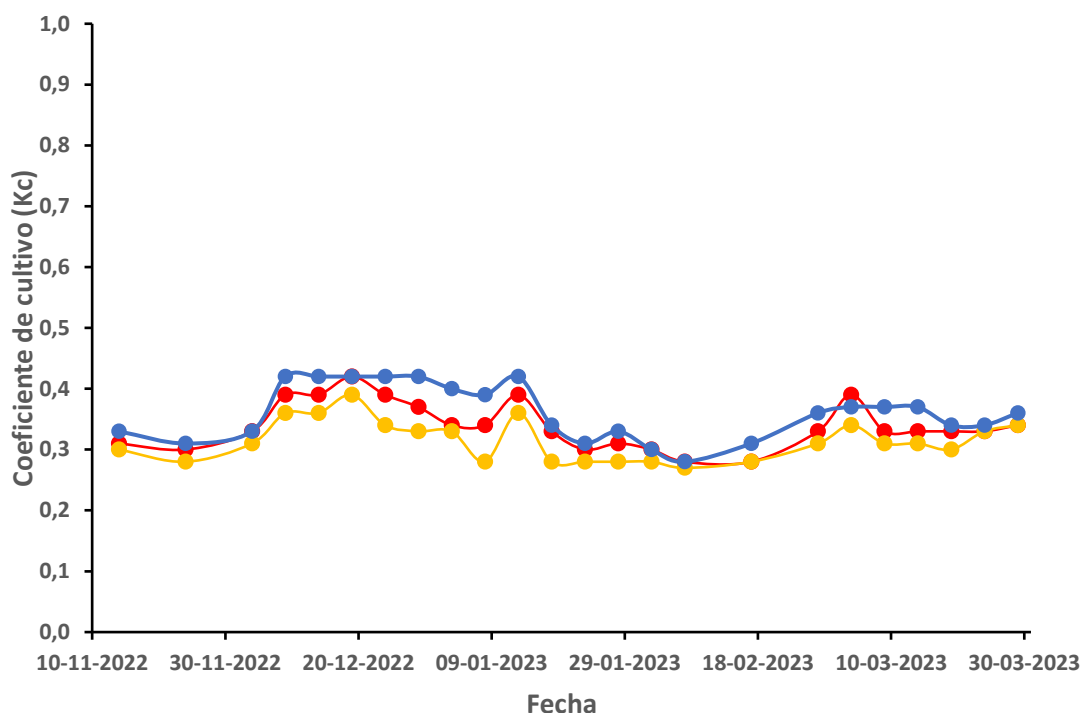


Figura 21. Coeficiente de cultivo en pixeles cercanos a la sonda de humedad.

Al analizar conjuntamente la Figura 20 y Figura 21 se observa que existe un comportamiento similar entre los valores de NDVI y Kc del huerto.

En las figuras analizadas se aprecia un leve aumento en los valores de NDVI y Kc durante el mes de noviembre, que corresponde al proceso de cuajado (Figura 22) que es cuando los frutos comienzan a desarrollarse a partir de las flores fecundadas, por eso el requerimiento hídrico del cultivo es menor, dado que está recién iniciando. Posteriormente durante principios de diciembre hasta mediados de enero se observa que ambos valores aumentan y tienden a mantenerse constante durante ese periodo, que es en el cual aumenta la evapotranspiración de referencia debido a las condiciones climáticas y también

comienza el crecimiento y desarrollo del fruto (Figuras 23 y 24), por lo tanto, la planta va a requerir mayor cantidad de agua y nutrientes para que el fruto se desarrolle de buena manera. Luego se observa que a principios del mes de febrero ocurre un notorio cambio en la coloración de la planta (Figura 25), por lo tanto, disminuye la reflectancia del cultivo y con esto los valores de NDVI y Kc conjuntamente, posteriormente durante marzo aumentan los valores y se mantienen hasta abril, donde de acuerdo con las imágenes proporcionadas por la agrícola, se aprecia un color más verde en la vegetación del cultivo (Figura 26).



Figura 22. Etapa de cuajado del fruto durante el mes de noviembre con un valor de NDVI de 0,37 y Kc aproximado de 0,31.



Figura 23. Etapa de crecimiento y desarrollo del fruto durante el mes de diciembre con un valor de NDVI de 0,44 y Kc aproximado de 0,39.



Figura 24. Etapa de crecimiento y desarrollo del fruto durante el mes de enero con un valor de NDVI de 0,43 y Kc aproximado de 0,39.



Figura 25. Etapa de crecimiento y desarrollo del fruto durante el mes de febrero con un valor de NDVI de 0,38 y Kc aproximado de 0,28.



Figura 26. Etapa de crecimiento y desarrollo del fruto durante el mes de marzo con un valor de NDVI de 0,41 y Kc aproximado de 0,31.

6. CONCLUSIONES

El objetivo general de esta investigación fue evaluar sensores de humedad de suelo, potencial hídrico de la planta, factores climáticos e imágenes multiespectrales como instrumentos para el manejo del riego en un huerto de clementinas en la zona centro norte de Chile.

El primer objetivo de este trabajo se enfocó en determinar la relación entre la lámina de riego registrada y aplicada por el agricultor, lámina estimada a través de los registros de una sonda de humedad de suelo, de un transductor de presión y la lámina de riego requerida por el cultivo estimada a partir de datos de ETo y Kc. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede establecer que, existe relación entre el riego determinado con valores de ETo y Kc y el riego determinado por el agricultor, ya que solo se diferencian por el parámetro utilizado de eficiencia de aplicación del sistema de riego, los cuales fueron 90% y 80% respectivamente. También se establece que existe una buena relación entre el riego aplicado por el agricultor y la lámina de riego estimada mediante las sondas de humedad y el transductor de presión, por ende, se puede decir que se hizo una buena gestión del riego ya que se repuso la cantidad de agua que el cultivo requería, exceptuando el mes de diciembre, donde se observó un estrés en el cultivo donde se debió aumentar el riego aplicado. También se establece que los sensores sirven como herramientas para el manejo del riego del huerto, sin embargo, se debe mencionar que para que los sensores sean realmente un apoyo, en cuanto a la sonda de humedad se debe trabajar con

el valor correcto de capacidad de campo de la estrata y también se debe analizar el tiempo de riego que el sensor de potencial hídrico registra, ya que, al estar instalado en terreno, no están ajenos a que ocurran fallas técnicas.

El segundo objetivo se centró en determinar la relación que existe entre los valores de humedad de suelo y los valores de potencial hídrico que las sondas registran. Se observó que el potencial hídrico del tallo es sensible a los cambios de humedad de suelo, además de que existe una correlación moderada entre las lecturas de la sonda 1 ($R^2 = 0,445$) y sonda 2 ($R^2 = 0,416$). De acuerdo con los resultados obtenidos, las lecturas de la sonda de potencial hídrico podrían ser potencialmente un buen indicador para la evaluación de estrés hídrico de la planta.

El tercer objetivo buscó analizar la variabilidad espacial del huerto durante la temporada de riego 2022 – 2023, de acuerdo con los resultados, se observó que existe relación entre los valores de NDVI y Kc obtenidos, los cuales varían dependiendo de la etapa fenológica en la que el cultivo se encuentre. El analizar el huerto mediante imágenes satelitales permite conocer el coeficiente de cultivo para la etapa fenológica en que éste se encuentra, lo que se traduce en que se pueda incrementar o disminuir el riego cuando sea pertinente y lograr una mayor eficiencia en el uso del agua.

También se estableció que el monitoreo satelital del huerto es una herramienta sumamente útil para evaluar el estado del cultivo y dado los resultados

obtenidos, se recomienda utilizar un K_c variable que se ajuste a las condiciones del huerto (cada vez que pase el satélite).

Finalmente se puede establecer que el uso de sensores de humedad de suelo y potencial hídrico del tallo, en conjunto con las imágenes satelitales, son herramientas que facilitan y pueden mejorar la gestión del riego en un cultivo, siempre y cuando se trabaje con los parámetros correctos. No obstante, se debe mencionar que, para complementar el uso de sensores, se debe monitorear constantemente el campo en terreno e ir corroborando que la información que los sensores entregan tenga relación con lo que ocurre en el campo.

Dadas las condiciones de sequía por las cuales atraviesa el país, se recomienda utilizar un coeficiente de cultivo variable, el cual se adecúe a la etapa vegetativa en la que el cultivo se encuentre para poder optimizar el recurso hídrico.

También se recomienda mayor énfasis en el registro del riego, donde se debe ser meticuloso en los datos del caudalímetro y los cuarteles que se riegan.

7. LITERATURA CITADA

1. Allen, R.G., L. Pereira, D. Raes y M. Smith. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y drenaje N°56. FAO. Roma, Italia.
2. Anderson, Catalina M. Banfi, Guillermo. Beñatena, Horacio. et all. (1996) Manual para productores de naranja y mandarina de la región del río Uruguay. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). no. 2. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmpinta_manual_citricultura_cap6.pdf
3. Corvera Luis (marzo 2021). Cítricos, los grandes beneficiados por la pandemia. RedAgrícola. no. 71. Disponible en: <https://www.redagricola.com/cl/citricos-los-grandes-beneficiados-con-la-pandemia/>
4. Ferreyra E, Raul y Selles van S, Gabriel (Jun/Jul-2011) Algunas consideraciones para el manejo de riego en cítricos [en línea]. Tierra Adentro. no. 94. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/5246> (Consultado: 20 noviembre 2022).
5. James Verdin, Diego Pedreros, Gary Eilerts (2003). "[Índice Diferencial de Vegetación Normalizado \(NDVI\)](#)", *FEWS - Red de Alerta Temprana Contra la Inseguridad Alimentaria, Centroamérica*, USGS/EROS Data Center, 2003.
6. Simonetta Bruno (febrero 2021). Recursos naturales. Centro de información de recursos naturales (CIREN). Disponible en: https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2021/05/Ovalle_rec_nat.pdf

7. Mike Morris, Larry Schwankl. (2008). Guía de bolsillo de microirrigación californiana. Centro Nacional de tecnología apropiada (NCAT).
8. González-Dugo. V., Ruz, C. Testi, L. et all. (2018). Impacto del riego deficitario en la transpiración y el rendimiento de mandarinas y naranjas tardías. Instituto Agricultura Sostenible (IAS).
9. Sayan Sdoodee, Junjira Somjum. (2007). Medición del potencial hídrico del tallo como indicador sensible del estrés hídrico en el cuello de naranja (*Citrus reticulata* Blanco). Facultad de Recursos Naturales, Universidad Prince of Songkla. Tailandia.