

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERIA AGRÍCOLA**



**MANEJO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE MICRORRIEGO EN  
CEREZOS CON SUELOS DE ALTA PEDREGOSIDAD**

**ALEJANDRO THOMAS ENRIQUE GONZÁLEZ LINCOLAO**

HABILITACIÓN PROFESIONAL  
PRESENTADA A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

**CHILLÁN – CHILE**

**2025**

**MANEJO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE MICRORRIEGO EN  
CEREZOS CON SUELOS DE ALTA PEDREGOSIDAD**

Aprobada por:

Eduardo Holzapfel Hoces  
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
Profesor Emérito

---

Profesor Guía

Camilo Souto Escalona  
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.  
Profesor Asociado

---

Profesor Co-Guía

Luis Octavio Lagos Roa  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera  
Ingeniero Civil, PhD.  
Profesor Titular

---

Director Departamento

Luis Octavio Lagos Roa  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Decano

## **AGRADECIMIENTO**

Primero agradecer a mi familia por el apoyo incondicional durante toda la etapa universitaria, a mis padres, abuelos, tíos. A mis Profesores Guías Dr. Eduardo Holzapfel y Dr. Camilo Souto por toda la disposición de resolver dudas, formar y enseñar en todo momento, a todos los demás profesores y funcionarios de la facultad que ayudaron a mi formación.

A los amigos que hice en la facultad, por enseñarme que la universidad no solo son libros y cuadernos, haciendo más agradable la vida universitaria.

Agradecer también al Centro de Recursos Hídrico para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), por el beneficio de la beca que me brindaron al realizar este trabajo por el proyecto ANID/FONDAP/1523A0001.

Agradezco igualmente a la empresa SOLAGRI, por el apoyo, disposición y confianza al permitirme realizar este estudio en el predio de San Ramon dando las condiciones necesarias para el desarrollo de mi investigación.

Finalmente agradecer al proyecto VRID de iniciación N°2024001184INI.

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN	1
ABSTRACT	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo general.....	7
2.2. Objetivos específicos.....	7
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	8
3.1. Área de estudio.....	8
3.2. Clima.....	11
4. METODOLOGÍA.....	11
4.1. Suelo.....	11
4.1.1. Análisis de suelo.....	11
4.1.2. Características del suelo.....	12
4.1.3. Determinación de la capacidad de retención de agua del suelo en la zona radicular extractante.....	14
4.1.4. Monitoreo de contenido humedad del suelo.....	15
4.2. Mediciones de área Humedecida.....	16
4.3. Demanda hídrica.....	17
4.3.1. Evapotranspiración de referencia.....	18
4.3.2. Estación de referencia.....	18
4.3.3. Evapotranspiración de cultivo.....	21
4.4. Tiempo de riego.....	22
4.4.1. Volumen de agua a aplicar.....	22
4.4.2. Medición del caudal del emisor mediante aforos.....	23
4.5. Uso de imágenes multiespectrales para el riego.....	24
4.6. Medición de producción.....	27
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5.1. Análisis de la pedregosidad del suelo.....	28
5.2. Análisis de evapotranspiración de referencia y demanda hídrica del cultivo.....	32
5.2.1. Análisis de evapotranspiración de referencia.....	32
5.2.2. Análisis de evapotranspiración de cultivo.....	34
5.3. Análisis de programación de riego con respecto a la capacidad de retención de suelo.....	36
5.4. Análisis del comportamiento de humedad de suelo y su distribución en el perfil.....	40
5.4.1. Sitio con microaspersión (TMA).....	40
5.4.2. Sitio con goteo (TG).....	45
5.5. Comportamiento de índices de monitoreo a través de imágenes multiespectrales.....	50
5.6. Análisis de área humedecida y producción.....	57

6.	CONCLUSIONES.....	62
7.	Referencias.....	64
8.	Anexo.....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Antecedentes de los tratamientos del estudio.....	9
Tabla 2.	Clase textural del sistema USDA, obtenida según el laboratorio de facultad de agronomía.....	11
Tabla 3.	Antecedentes físico-hídricos obtenidos de las calicatas realizadas en los diferentes sectores del estudio.....	13
Tabla 4.	Profundidad suelo (Z) en la instalación de sensores de humedad para el sitio TMA y TG.....	16
Tabla 5.	Valores de F1 y F2 para diferentes tipos de frutales.....	21
Tabla 6.	Interpretación de valores del NDVI.....	25
Tabla 7.	Retención de agua del suelo en los sectores del estudio correspondiente a cada tratamiento.....	30
Tabla 8.	Resumen comportamiento de humedad del suelo en diferentes profundidades para los tratamientos de microaspersión en la temporada 2024/25.....	45
Tabla 9.	Resumen comportamiento de humedad del suelo en diferentes profundidades para los tratamientos de goteo en la temporada 2024/25.....	49
Tabla 10.	Rendimientos promedio y área humedecida promedio de los tratamientos de microaspersión.....	59
Tabla 11.	Rendimientos promedio de los tratamientos de goteo.....	60
Tabla 12.	Área humedecida según los aforos realizados en antes y después de cosecha.....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Sectores de riego en estudio en el campo SOLAGRI, en la comuna de Curicó, sector Los Niches, en la Región del Maule.....	9
Figura 2. Distribución de los tratamientos de microaspersión (TMA) en el cuartel 6 sector 5.....	10
Figura 3. Determinación de Porcentaje de pedregosidad, mediante método de Arquímedes.....	15
Figura 4. Localización de la estación de referencia a utilizar “Estación meteorológica los niches y la zona de estudio (Comuna Curicó, sector los niches).....	20
Figura 5. Esquema de selección de árboles muestreados (círculos verdes), dejando fuera las hileras bordes (círculos rojos), utilizados para la estimación de producción por hectárea.....	28
Figura 6. Efecto de la pedregosidad en el volumen efectivo de la planta en el sitio TMA (10, 20, 30 y 40), correspondiente al tratamiento bajo riego microaspersión (TMA).....	30
Figura 7. Efecto de la pedregosidad en el volumen efectivo de la planta en el sitio TG, correspondiente al tratamiento TG3.....	31
Figura 8. Efecto de la pedregosidad en el volumen efectivo de la planta en el sitio TG, correspondiente al tratamiento TG2 y TG4 bajo riego goteo.....	31
Figura 9. Evapotranspiración de referencia (ET <sub>r</sub> semanal) obtenida de la estación meteorología Los niches, Agrochile (ET <sub>r</sub> -PM) y Evapotranspiración de referencia estimada con modelo Hargreaves – Samani (ET <sub>r</sub> -HS).....	34
Figura 10. Relación 1:1 de evapotranspiración obtenida mediante Estaciones meteorológica (ET <sub>r</sub> -PM) con respecto a la Evapotranspiración de referencia mediante el modelo de Hargreaves – Samani (ET <sub>r</sub> -HS).....	34
Figura 11. Variación semanal de la evapotranspiración de cultivo (ET <sub>c</sub> ) para los tratamientos de riego durante la semana 2024/25.	35
Figura 12. Volumen de agua promedio diario recomendado y la retención máxima de agua para el periodo de riego (oct – mar) en el sitio TMA.....	36
Figura 13. Comparación entre el volumen recomendado (V.R) en relación con la capacidad de retención de suelo (RS) considerando una retención de 35.6 L en el tratamiento (TG2).....	37
Figura 14. Comparación entre el volumen recomendado (V.R) respecto a la capacidad de retención del suelo (RS) en tratamiento (TG3).....	38

Figura 15. Comparación entre el volumen recomendado (V.R) en relación con la capacidad de retención de suelo (RS) considerando una retención de 35.6 L en el tratamiento (TG4).....	38
Figura 16. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024-2025 para el tratamiento TMA10.....	40
Figura 17. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TMA20.....	41
Figura 18. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TMA30.....	43
Figura 19. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TMA40.....	44
Figura 20. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TG2.....	46
Figura 21. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TG3.....	47
Figura 22. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TG4.....	48
Figura 23. Variación temporal del valor promedio del índice NDVI en el sitio TMA bajo distintos tratamientos de manejo (TMA10, TMA20, TMAA30 y TMA40) durante la temporada 2024-2025..	51
Figura 24. Variación temporal del valor promedio del índice SAVI en el sitio TMA bajo distintos tratamientos de manejo (TMA10, TMA20, TMA30 y TMA40) durante la temporada 2024-2025...	52
Figura 25. Variación temporal del valor promedio del índice GNDVI en el sitio TMA bajo los tratamientos de manejo (TMA10, TMA20, TMA30, TMA40) durante la temporada 2024-2025.....	53
Figura 26. Variación temporal del valor promedio del índice NDVI en el sitio TG bajo los tratamientos de manejo (TG2, TG3 y TG4) durante la temporada 2024-2025.....	54
Figura 27. Variación temporal del valor promedio del índice SAVI en el sitio TG bajo los tratamientos de manejo (TG2, TG3 y TG4) durante la temporada 2024-2025.....	55
Figura 28. Variación temporal del valor promedio del índice GNDVI en el sitio TG bajo los tratamientos de manejo (TG2, TG3 y TG4) durante la temporada 2024-2025.....	56
Figura 29. Rendimiento de los tratamientos de microaspersión invertidos a diferentes alturas de elevación del suelo.....	58

Figura 30. Rendimiento de los tratamientos de Goteo diferentes números de laterales por hilera..... 60

## ÍNDICE DE ECUACIONES

		Página
Ecuación 1.	Porcentaje de pedregosidad.....	13
Ecuación 2.	Volumen de Agua aprovechable total del suelo.....	14
Ecuación 3.	Volumen de Agua aprovechable para la planta.....	15
Ecuación 4.	Modelo lineal, que relaciona la descarga de un emisor y el diámetro de humedecimiento.....	16
Ecuación 5.	Área humedecida por todos los emisores.....	17
Ecuación 6.	Estimación evapotranspiración mediante modelo de Penman – Monteith.....	19
Ecuación 7.	Estimación evapotranspiración mediante modelo Hargreaves – Samani.....	20
Ecuación 8.	Evapotranspiración de cultivo.....	21
Ecuación 9.	Factor de cobertura.....	21
Ecuación 10.	Porcentaje de cobertura.....	22
Ecuación 11.	Volumen requerido por planta.....	23
Ecuación 12.	Volumen de agua aplicar.....	23
Ecuación 13.	Tiempo de riego.....	23
Ecuación 14.	Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI).....	25
Ecuación 15.	Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI).....	26
Ecuación 16.	Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI).....	27

## **MANEJO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE MICRORRIEGO EN CEREZOS CON SUELOS DE ALTA PEDREGOSIDAD**

MANAGEMENT AND OPERATION UNDER MICRO-IRRIGATION SYSTEMS  
IN STONE SOILS IN CHERRY TREES

**Palabras claves:** Pedregosidad, microaspersión, goteo, área humedecida, optimización de riego.

### **RESUMEN**

Este estudio evaluó el manejo y operación de sistemas de microrriego en cerezos sobre suelos con alta pedregosidad, analizando su efecto en la retención de agua, el área humedecida y la producción. La investigación se realizó durante la temporada 2024-25 en el predio San Ramón (SOLAGRI), Curicó, Región del Maule, considerando dos sitios: microaspersión (TMA) en la variedad Lapins, con emisores ubicados a 10, 20, 30 y 40 cm desde el suelo (TMA10, TMA20, TMA30 y TMA40) y goteo (TG) en la variedad Santina, con 2, 3 y 4 laterales por hilera (TG2, TG3 y TG4). Se caracterizaron las propiedades físico-hídricas del suelo y el porcentaje de pedregosidad mediante el principio de Arquímedes. La evapotranspiración de referencia ( $ET_r$ ) se estimó mediante Penman–Monteith y Hargreaves-Samani. Para el monitoreo, se instalaron sensores de humedad y se realizaron vuelos con dron multiespectral para evaluar el vigor. Los resultados mostraron altos porcentajes de pedregosidad ( $P > 40\%$ ) lo que redujo hasta un 65% la

capacidad de retención de agua, aumentando la frecuencia de riego. En TMA, las alturas TMA20 y TMA30 presentaron mayor uniformidad de humedad del suelo, y los mejores rendimientos ( $32 \text{ t ha}^{-1}$ ). En goteo, TG3 mostró el mejor equilibrio hídrico y productivo, con rendimientos promedio de  $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ , sin diferencias con TG4. El análisis multiespectral evidenció una relación directa entre el contenido de agua en el suelo y el vigor del cultivo, destacando los tratamientos TMA20 y TMA30 para valores mayores de NDVI y SAVI (37,5% en ambos casos). Finalmente, se concluye que incorporar la pedregosidad en el cálculo de la capacidad de retención y en la programación del riego, optimiza el uso del agua, mejora la productividad y reduce pérdidas por percolación.

## MANAGEMENT AND OPERATION UNDER MICRO-IRRIGATION SYSTEMS IN STONE SOILS IN CHERRY TREES

**Keywords:** Stoniness, cherry, micro-sprinkler, drip irrigation, wetted area, irrigation optimization.

### ABSTRACT

This study evaluated the management and operation of micro-irrigation systems in cherry trees established on soils with a high stoniness content, assessing their effect on water retention, wetted area, and yield. The research was conducted during the 2024-25 season at San Ramón farm of SOLAGRI Company, Curicó, Maule Region, considering two sites: micro-sprinkler irrigation (TMA) in the Lapins variety with emitters at 10, 20, 30, and 40 cm heights (TMA10, TMA20, TMA30, and TMA40), and drip irrigation (TG) in the Santina variety with 2, 3, and 4 laterals per row (TG2, TG3 and TG4). The soil's physical and hydraulic properties and stoniness percentage were characterized using the Archimedes principle. Reference evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) was estimated using the Penman–Monteith and Hargreaves–Samani models. Soil moisture sensors were installed at different depths, and multispectral drone flights were performed to assess canopy vigor. Results showed that high stoniness levels ( $p > 40\%$ ) reduced soil water retention capacity by up to 65%, increasing irrigation frequency. In the TMA site, the TMA20 and TMA30

exhibited greater wetting uniformity and the highest yields ( $32 \text{ t ha}^{-1}$ ). In drip irrigation, TG3 showed the best hydric and productive balance, with average yields of  $7.5 \text{ t ha}^{-1}$  and no differences compared to TG4. multispectral analysis revealed a direct relationship between soil water content and crop vigor, highlighting TMA20 and TMA30 for their higher NDVI (37,5%) and SAVI values (37,5%) in both cases. It is concluded that stoniness should be incorporated into the calculation of soil water retention capacity and irrigation scheduling, as it optimizes water use, increase productivity, and reduces percolation losses.

## 1. INTRODUCCIÓN.

En el contexto actual, la variabilidad climática representa uno de los factores más significativos que enfrenta la agricultura, ya que genera alteraciones persistentes en los patrones de precipitación y temperatura que repercuten directamente en la disponibilidad de agua para los sistemas productivos. En Chile central, por ejemplo, la denominada mega sequía ocurrida entre 2010 y 2018 evidenció una fase prolongada de déficit pluviométrico – asociada a anomalías de la circulación atmosférica y reforzada por el calentamiento global – puede reducir de manera sostenida los recursos hídricos superficiales y subterráneos, afectando la productividad agrícola y la gestión del riego (Garreaud, y otros, 2020).

Por otro lado, en el contexto agrícola nacional según los datos del Catastro Frutícola Odepa-Ciren existe un importante incremento en la superficie de diferentes especies frutales tales como: cerezo, nogal, avellano y vid uva de mesa del 3.1% en los últimos 3 años. Específicamente, la exportación de cerezas ha alcanzado valores 625 mil toneladas siendo la principal fruta fresca en lo que la temporada entre septiembre 2024 - abril 2025, generando un incremento del 51.1% en el volumen exportado respecto a la temporada anterior, siendo su principal destino China con el 90.8% del volumen de cereza fresca exportada (Villagrán, 2025). El cerezo es sensible a déficit y exceso de agua en el endurecimiento del carozo y durante el desarrollo rápido del volumen del fruto etapas fenológicas, en especial en el llenado de fruto.

Es así como la gestión eficiente del recurso hídrico es fundamental para garantizar productividad y sostenibilidad del cerezo, en particular las variedades Lapins y Santina. La variedad Santina se caracteriza por ser un árbol vigoroso de difícil ramificación, autofértil, buena precocidad y de estación media a tardía. Mientras que la variedad Lapins se caracteriza por ser autofértil, semi-vigoroso y de estación temprana a media. En la temporada 2019-2020 en Chile, la variedad Lapins alcanzó el mayor volumen de exportación, mientras que la variedad Santina fue la segunda (Barros, Rodríguez, & Ivelic, 2021). Ambas variedades en el sector de estudio están bajo portainjerto colt, se caracterizan principalmente en tener buena productividad, con buenos índices de calidad de la fruta, sin embargo, no se adapta a suelos delgado o riegos deficientes (Viveros copequen, s.f.).

Los sistemas de microriego son esenciales para optimizar el uso del agua en la agricultura, debido a la presión constante por la escasez del recurso hídrico y la competencia por el agua entre diferentes sectores del país. El diseño y manejo de estos sistemas tiene como objetivo fundamental mantener el volumen humedecido en la zona radical de las plantas con un nivel de humedad de suelo cercano a capacidad de campo (Allen, 2006). Un sistema de riego con un diseño e instalación óptima y que se utiliza de manera eficiente, contribuye de forma significativa al desarrollo y beneficio de la agricultura. Esto es aún más crítico en microrriego donde sus costos de instalación y operación son elevados.

Se evaluaron diferentes reposiciones de agua (4 tratamientos; 100%, 67%, 50% y 33%) y fertiirrigación en naranjos cv. *Thompson Navel*, y se observó un aumento en la producción de un 17% respecto al tratamiento de reposición completa (100%) y un 24.1% entre la reposición de los tratamientos 50% y el 67% (de 57.3 a 71.1 t ha<sup>-1</sup>), con mejoras de un 24% en el peso medio del fruto (de 204,3 a 253,4 g) con un aumento en el diámetro ecuatorial (de 7,5 a 7.9 cm) entre otras mejoras de los parámetros de calidad de fruto. Esto se asocia a que, bajo riego por goteo y microaspersión se aplican los volúmenes de agua requerido por el cultivo en forma más precisa y, además, se pueden controlar los niveles de agua en diferentes estados de desarrollo, para lograr los objetivos de calidad y producción esperados (Holzapfel, Hepp, & Mariño, Effect of irrigation on fruit production in blueberry, 2004). En general, se ha encontrado que bajo microriego se obtienen mayores producciones y un incremento en la calidad del fruto (Holzapfel, Lopez, Joublan , & Matta, 2001). Según, Wu, X. 2021, menciona que la presencia de pequeños fragmentos de roca puede tener un gran impacto en las propiedades de retención de agua del suelo, así como en la infiltración del agua en el perfil de suelo. El resultado es una redistribución del agua muy heterogénea, con infiltración y flujo preferencial muy dependiente de la pedregosidad (Wu, 2021).

En sistemas de microriego, tales como microaspersión, goteo y sistema de goteo subterráneo (SDI), se traduce en bulbos húmedos más irregulares, sensibles a los patrones de humectación al caudal emisor, humedad inicial y

ubicación del emisor en las zonas de alta pedregosidad (Ben-Gel, Lazorovitch, & Shani, 2004)

Por estas razones, clave realizar diferentes estudios específicos de manejo de riego en suelos pedregosos, que cuantifique geometría del bulbo, uniformidad, estrategias de riegos adecuadas que se adapten al desarrollo óptimo de la planta, ajustándose a los parámetros de retención de agua en suelo.

## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1. Objetivo general.**

Analizar el manejo y operación de riego por goteo y microaspersión en cerezos para suelos con alta pedregosidad.

### **2.2. Objetivos específicos.**

- Examinar el efecto de la pedregosidad del suelo en el manejo de riego por goteo y microaspersión.
- Analizar la producción y área humedecida bajo riego por goteo y microaspersión en cerezos para suelos con alta pedregosidad.
- Analizar el estado vegetativo del cerezo para los diferentes tratamientos durante la temporada 2024-2025 usando imágenes multiespectrales obtenidas con un dron.

### **3. ANTECEDENTES GENERALES.**

#### **3.1. Área de estudio.**

El estudio se llevó a cabo en un huerto de cerezos regado por microaspersión (TMA) y goteo (TG) en el fundo San Ramón de la empresa SOLAGRI ubicada en la Región del Maule, sector Los Niches (Figura 1), durante la temporada de riego 2024-2025. El sector TMA tiene una superficie de 2 ha de la variedad Lapins, el que es regado con un emisor por árbol con un caudal nominal de diseño de  $25 \text{ L h}^{-1}$ . En el sitio TMA los tratamientos consideran la ubicación de los emisores a cuatro alturas 10 (TMA10), 20 (TMA20), 30 (TMA30), y 40 cm (TMA40) desde el suelo con la finalidad de evaluar el área humedecida y el rendimiento de la temporada. La distribución espacial de los tratamientos se observa en la Figura 2.

El sector TG tiene una superficie de 5 ha, en la que se establecieron tres tratamientos de riego por goteo con dos (TG2), tres (TG3) y cuatro (TG4) laterales por hilera, donde cada emisor tiene un caudal nominal de diseño de  $2.5 \text{ L h}^{-1}$ . En la Tabla 1, se muestra los antecedentes para ambos estudios de microaspersión y goteo.

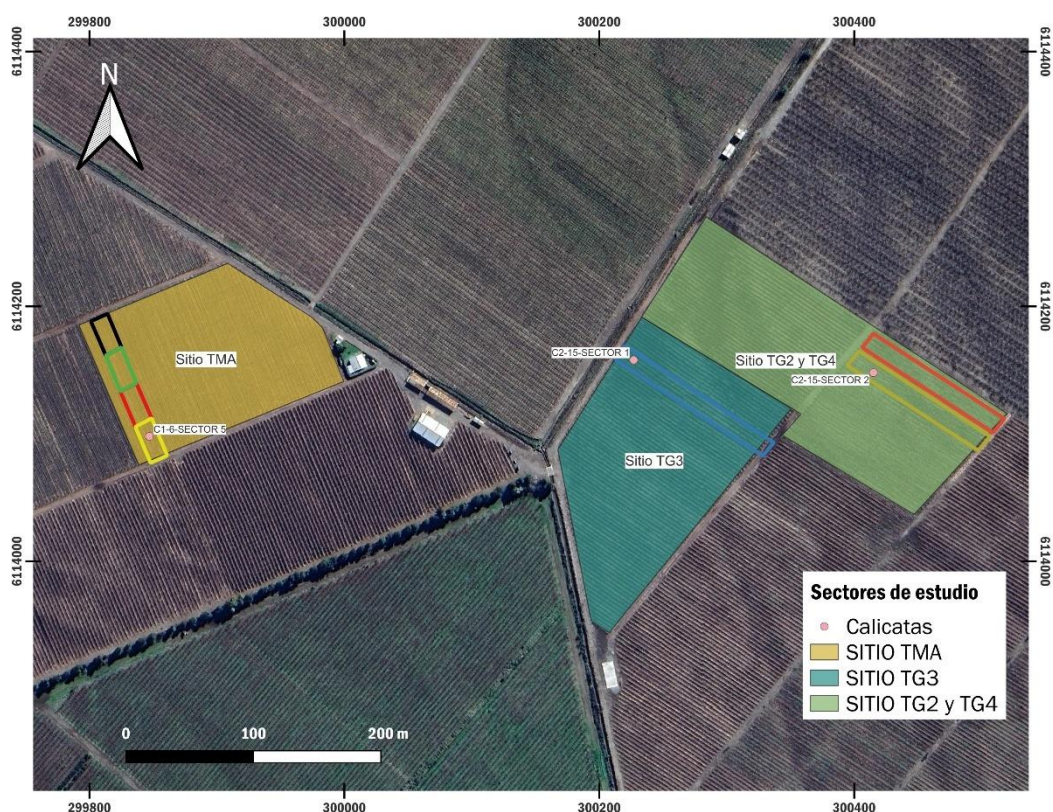


Figura 1. Sectores de riego en estudio en el campo SOLAGRI, en la comuna de Curicó, sector Los Niches, en la Región del Maule. Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Antecedentes del sistema de riego del sitio de estudio.

Tratamiento	TMA	TG2	TG3	TG4
Cuartel	6	15	15	15
Sector de riego	5	2	1	2
Distancia sobre hilera (m)	2	2	2	2
Distancia Entre hilera (m)	3	3	3	3
Sistema de riego	Microaspersión	Goteo	Goteo	Goteo
Caudal emisor de diseño (L h <sup>-1</sup> )	25	5	2.5	2.5
Emisores por planta	1	8	12	16
N° de Laterales por hilera	1	2	3	4
Distancia entre emisores (m)	2	0.5	0.5	0.5

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Distribución de los tratamientos de microaspersión (TMA) en el cuartel 6 sector 5.

### 3.2. Clima.

El clima del área de estudio se encuentra en el DISTRITO 6-8-1: Coihueco que tiene un tipo templado cálido mesotermal con régimen de humedad subhúmedo seco según el atlas agroclimático de Chile. Las temperaturas varían entre un máximo de enero de 28,7°C y una mínima de 3,4°C. El periodo de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 7 meses. Registra anualmente 1.433 días grado y 1.023 horas de frío acumuladas. La precipitación media anual es el 1.393 mm y un periodo seco de 5 meses, con un déficit hídrico de 693 mm año<sup>-1</sup> (Santibañez Q., 2017).

## 4. METODOLOGÍA.

### 4.1. Suelo.

#### 4.1.1. Análisis de suelo.

Se obtuvo los análisis de suelo de tres calicatas en dos estratas de 30 centímetros (0 – 30 cm y 30 – 60 cm). La calicata del sector 6 del estudio correspondiente a la ubicación del tratamiento 1 (Microaspersión), con una textura franca en la primera estrata y franco arenoso entre los 30 y 60 centímetros del suelo. En la calicata del tratamiento 2, 3 y 4 la clase textural predominante en el sector de estudio es franco arenoso (Tabla 2).

Tabla 2. Clase textural del sistema USDA, obtenida según el laboratorio de facultad de agronomía

Sitio	Cuartel	Profundidad (cm)	ID muestra	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
TMA	6	0-30	1	43,9	36,6	19,5	Franco
		30 - 60	2	64,7	21,9	13,4	Franco arenoso
TG3	15	0-30	3	54,8	29	16,2	Franco arenoso
		30 - 60	4	74,1	15,7	10,2	Franco arenoso
TG2 – TG4	15	0-30	5	62,2	23,2	14,7	Franco arenoso
		30 - 60	6	72,8	17	10,2	Franco arenoso

Fuente: Laboratorio de suelo – Facultad de Agronomía UdeC.

Además, se obtuvo las variables necesarias para el cálculo de retención de suelo (Tabla 3).

Tabla 3. Antecedentes físico-hídricos obtenidos de las calicatas realizadas en los diferentes sectores del estudio.

Sitio	Cuartel	Profundidad (cm)	ID muestra	Da g cm <sup>3</sup>	CC	PMP
					% (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	% (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
TMA	6	0-30	1	1,07	45,8	29,9
		30 - 60	2	1,16	38,9	25,0
TG3	15	0-30	3	1,18	41,2	26,4
		30 - 60	4	1,36	35,8	21,4
TG2 – TG4	15	0-30	5	1,18	36,4	23,8
		30 - 60	6	1,3	34,0	20,4

Fuente: Laboratorio de Suelo – Facultad de Agronomía UdeC.

Se puede observar que el comportamiento de la capacidad de retención de las capas superficiales (muestra 1,3,5) es mayor que las estratas entre los 0,3 y 0,6 m (muestra 2,4,6) en general para todas las calicatas realizadas.

#### 4.1.2. Características del suelo

Las características del suelo del predio son básicas para establecer el manejo de los diferentes sistemas de riego, y entregar los niveles de agua que se requieren aplicar con la capacidad que el suelo puede retener.

El volumen de suelo útil en la zona de extracción radical se ha considerado un área de 4 m<sup>2</sup> para obtener el volumen de retención en la zona de raíces del cerezo, ya que, las raíces de una planta no cubren toda el área del marco de plantación. Además, se considera una profundidad radical máxima de extracción de 0.6 m.

Con muestras de suelo a través de calicatas en los diferentes sectores para los tratamientos establecidos, se realizarán análisis de suelo para determinar las propiedades del suelo, como textura, densidad aparente del suelo, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Además, se realizará una medición del porcentaje de pedregosidad mediante el método de desplazamiento de aguas, basado en el principio de Arquímedes que permite determinar el volumen ocupado por la pedregosidad (% de pedregosidad). Para determinar el porcentaje de pedregosidad, se obtiene el volumen ocupado por esta fracción en un estanque de volumen conocido. Primero se mide el volumen inicial de agua en el estanque y luego se introduce la fracción correspondiente a la pedregosidad (Figura 3). Finalmente, el porcentaje de pedregosidad se obtiene relacionando el volumen desplazado por la pedregosidad respecto al volumen inicial de agua en el estanque tal como indica la ecuación [1]:

- **Porcentaje de pedregosidad:**

$$\%Ped = \frac{V_i - V_f}{V_i} * 100 \quad [1]$$

Donde:

- $V_i$ : Volumen inicial de agua en el estanque (L).
- $V_f$ : Volumen final de agua en el estanque, luego de introducir la pedregosidad (L).
- %Ped: Porcentaje de pedregosidad ( $0\% < P < 100\%$ ).



Figura 3. Determinación de Porcentaje de pedregosidad, mediante método de Arquímedes.

#### 4.1.3. Determinación de la capacidad de retención de agua del suelo en la zona radicular extractante.

La capacidad de retención de agua en el suelo ( $V_a$ ) representa el volumen de agua aprovechable para la planta en la zona radicular.  $V_a$  se puede determinar usando la Ecuación [2].

$$V_a = \frac{CC - PMP}{100} * Da * Z * A * (1 - P) * 10 \quad [2]$$

Donde:

- $V_a$ : Volumen aprovechable total para la planta (L).
- CC: Capacidad de campo del suelo (%).
- PMP: Punto de marchitez permanente (%).
- $D_a$ : Densidad aparente del suelo ( $\text{g m}^{-3}$ ).
- Z: Profundidad del suelo (m).
- A: Área efectiva de la zona radicular de la planta ( $\text{m}^2$ ).
- P: Pedregosidad de suelo como factor ( $0 < P < 1$ ).

Los datos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) se obtuvieron del Laboratorio de Suelos del Departamento de Suelos y Recursos Naturales de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción.

Con los antecedentes Físico-Hídricos (CC, PMP), la pedregosidad obtenidos y los requerimientos hídricos propios del cerezo (*Prunus Avium L.*), se definió el criterio de riego utilizado en este estudio.

Este enfoque permite determinar la frecuencia máxima y los tiempos de aplicación y los tiempos de riego, ajustados a la fenología de la planta, finalmente se obtiene la Ecuación [3].

- **Volumen de agua aprovechable para la planta**

$$V_a = \frac{CC - PMP}{100} \cdot D_a \cdot Z \cdot A \cdot (1 - P) \cdot 10 \cdot C_r \quad [3]$$

Donde:

- $C_r$ : Criterio de riego como factor ( $0 < C_r < 1$ ).

#### **4.1.4. Monitoreo de contenido humedad del suelo**

El contenido de humedad fue monitoreado usando 3 sensores de humedad a profundidades de 0.3, 0.6 y 0.9 m en cada tratamiento (Tabla 3). Los datos de humedad de suelo fueron almacenados cada 1 h durante la temporada 2024-2025 mediante un datalogger (ZL6, Meter Group, Pullman, USA). Además, se instalaron contadores volumétricos verificándolos semanalmente los volúmenes programados.

Tabla 4. Profundidad suelo (Z) en la instalación de sensores de humedad para el sitio TMA y TG.

Z (m)	Sensor	Medición
0.3	TEROS 12 (Meter Group, Pullman, USA)	CAPACITANCIA
0.6		CAPACITANCIA
0.9*	ECH2O 10HS/ECH2O EC-5 (Meter Group, Pullman, USA)	CAPACITANCIA

*\*Para el sitio TMA se instalaron a los 0.9 m un sensor ECH2O 10HS y para el sitio TG se instalaron sensores ECH2O EC-5).*

#### 4.2. Mediciones de área Humedecida

El cálculo de área humedecida de los tratamientos se realizó con el radio de alcance del emisor en caso de microaspersión a lo largo del periodo de estudio.

Por otro lado, el área de humedecimiento para los tratamientos de goteo se analizó con un método que describe la descarga de un emisor de gotero y el diámetro de humedecimiento para suelos finos, medianos y gruesos. Modelo lineal, que relaciona la descarga de un emisor y el diámetro de humedecimiento, Ecuación [4].

$$D_h = m * q_e + b \quad [4]$$

Donde  $D_h$  es el diámetro de humedecimiento (m),  $q_e$  es el caudal del emisor (l/h),  $m$  es la pendiente de la recta según el tipo de suelo y  $b$  el intercepto en el eje. Dado que es un método de diseño de sistema de riego por goteo, se usará de forma inversa para verificar el comportamiento del área humedecida según el caudal de aforo que se medirá en terreno. (Sotomayor, 2022)

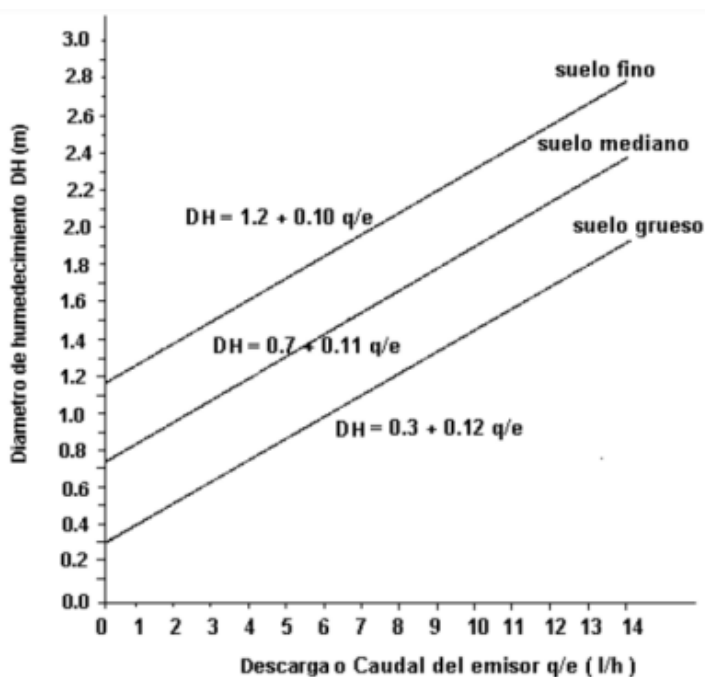


Figura 3. Diámetro de humedecimiento para tres tipos de suelo de la ecuación lineal. Fuente: (Karmeli, 1985)

En general los suelos de nuestro estudio se representaron en su mayoría por suelos gruesos, luego de obtener el diámetro humedecido, se calcula el área humedecida por todos los emisores, según la Ecuación [5].

$$A_h = \left( \frac{\pi * D_h^2}{4} \right) * N_e \quad [5]$$

Donde,  $A_h$  es el área humedecida,  $D_h$  el diámetro humedecido y  $N_e$  el número de emisores obtenido por tratamiento.

### 4.3. Demanda hídrica

La demanda de agua es necesaria estimarla porque permite conocer con precisión los requerimientos hídricos del cultivo en función de sus condiciones fisiológicas y ambiente, esta estimación adquiere relevancia en casos con

suelos de alta pedregosidad, ya que, modifica la capacidad de retención de agua en el suelo condicionando la duración óptima de los riegos. Conociendo la demanda de agua es posible realizar la programación de riego de manera eficiente, utilizando solo la cantidad de agua requerida por la planta, evitando exceso a través de escorrentía o por drenaje de la zona de raíces extractante.

#### **4.3.1. Evapotranspiración de referencia**

Para la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), se analizó considerando el modelo de Penman – Monteith (PM) con datos registrados desde una estación de referencia cercana.

#### **4.3.2. Estación de referencia**

La estación de referencia debe ser representativa al sitio de estudio, lo más cercano, o en una zona climática similar, con las condiciones estándar. Para la investigación se utilizó la base de datos de agrometeorología del INIA, con la estación Los niches, Agrochile, situada en los niches ( $35^{\circ}2'0''$  S,  $71^{\circ}8'24''$  W, 273 msnm).

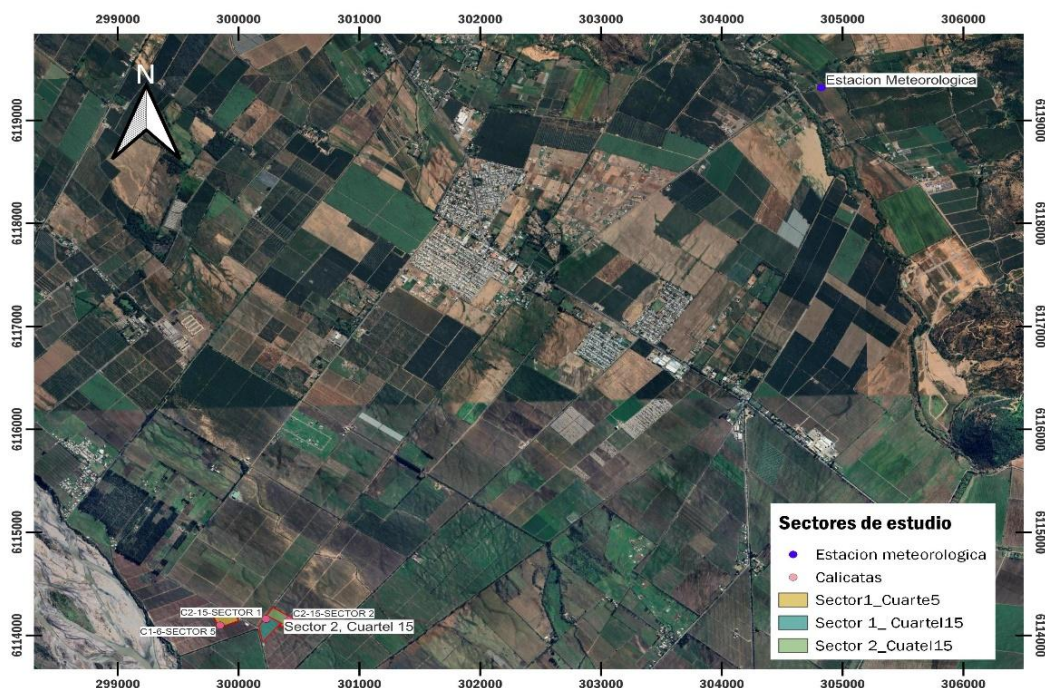


Figura 4. Localización de la estación de referencia a utilizar “Estación meteorológica los niches y la zona de estudio (Comuna Curicó, sector los niches). Fuente: Elaboración Propia. Donde está el punto de la estación

### Modelo de Penman – Monteith

Según, la FAO 56, mediante la ecuación combinada de Penman – Monteith y la resistencia aerodinámica y superficial, se obtuvo la Ecuación [6] (Allen, 2006):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad [6]$$

Donde:

- $ET_o$ : Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).
- $R_n$ : Radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ).

- G: flujo del calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).
- T: Temperatura media del aire a 2 metros de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $u_2$ : Velocidad del viento a 2 metros de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ).
- $e_s$ : Presión de vapor a saturación (kPa).
- $e_a$ : Presión real de vapor (kPa).
- $e_s - e_a$ : Déficit de presión de vapor (kPa).
- $\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).
- $\gamma$ : constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

**Modelo Hargreaves – Samani:** (Hargreaves & Samani, 1982)

El modelo de Hargreaves – Samani (Ecuación 7) se pronosticó la  $ET_r$  mediante un ajuste entre ambos métodos semana a semana para tener una mejor representatividad con el modelo estándar (PM), para la demanda hídrica.

$$ET_r = \frac{\alpha\beta^2\sqrt{\Delta T_a}(T_{med} - 17.78)R_0}{2.45} \quad [7]$$

Donde:

- $ET_r$ : Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm dia}^{-1}$ )
- $\alpha$ : Coeficiente de corrección de ubicación geográfica (adimensional).
- $\beta$ : Coeficiente de corrección de humedad relativa (adimensional).
- $T_{med}$ : Temperatura media del periodo de tiempo analizado ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $\Delta T_a$ : Diferencia de Temperatura máxima y mínima del periodo de tiempo ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $R_0$ : Radiación Solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

### 4.3.3. Evapotranspiración de cultivo

Una vez analizada la  $ET_r$  de forma semanal se obtuvo la evapotranspiración de cultivo ( $ET_c$ ) con factores de cultivo ( $F_c$ ) para los diferentes tratamientos estudiados. Este factor relaciona principalmente la cobertura del frutal al medio día con el área total (Holzapfel , Orrego , Jara, Salgado, & Souto, 2021).

La Ecuación [8] junto con la Ecuación [9] que permite determinar el requerimiento hídrico es la siguiente:

$$ET_c = ET_o * F_c \quad [8]$$

$$F_c = F_1 * P + F_2 \quad [9]$$

Donde:

- $ET_c$ : Evapotranspiración de cultivo o frutal ( $\text{mm día}^{-1}$ ).
- $ET_o$ : Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ).
- $F_c$ : Factor de cobertura.
- $P$ : Porcentaje de cobertura ( $20\% < P < 70\%$ ).

Los factores  $F_1$  y  $F_2$ , para los diferentes tratamientos del estudio se pueden obtener de la Tabla 2.

Tabla 5. Valores de  $F_1$  y  $F_2$  para diferentes tipos de frutales.

Frutal	Riego	Factor $F_1$	Factor $F_2$
Cerezos	Microaspersión	0,0124	0,25
Cerezos	Goteo (2 laterales)	0,0124	0,11
Cerezos	Goteo (3 laterales)	0,0124	0,16
Cerezos	Goteo (4 laterales)	0,0124	0,20

Fuente: Holzapfel, Orrego, Jara, Salgado, & Souto, 2021.

- **Porcentaje de cobertura**

Donde P, es el porcentaje de cobertura y se obtiene mediante la siguiente Ecuación [10]:

$$P = \frac{\pi * D_s^2}{4 * E_{eh} * E_{sh}} * 100 \quad [10]$$

Donde:

- $D_s$ : Diámetro de la sombra proyectada en el suelo por el follaje del árbol al medio día solar (m).
- $E_{eh}$ : Espaciamiento del frutal entre hilera (m).
- $E_{sh}$ : Espaciamiento del frutal sobre hilera (m).

#### **4.4. Tiempos de riego**

##### **4.4.1. Volumen de agua a aplicar**

Para determinar los tiempos de riego, se calculó el volumen requerido por la planta usando la Ecuación [9]. En suelos con alta pedregosidad, es crucial evitar pérdidas por percolación. Además, la alta pedregosidad puede provocar una distribución irregular del agua en el perfil del suelo, generando zonas con menor humedad y dificultando que las raíces accedan al agua de manera uniforme. Por lo tanto, es clave maximizar la frecuencia de riego optimizando el diseño de riego que tiene el predio.

El volumen requerido por la planta está dado por la siguiente Ecuación [11]:

- **Volumen Requerido por planta**

$$V_r = ET_c * E_{eh} * E_{sh} \quad [11]$$

Considerando el  $V_r$ , el volumen total ( $V_t$ ) de agua aplicar a la planta se puede obtener de la Ecuación [12].

$$V_t = \frac{V_r}{EDT} \quad [12]$$

Donde:

- $V_r$ : Requerimiento de agua en litros por día árbol ( $L \text{ dia}^{-1} \text{ árbol}^{-1}$ ).
- $V_t$ : Volumen total que se debe aplicar con el sistema de riego ( $L \text{ dia}^{-1} \text{ árbol}^{-1}$ ).
- EDT: Eficiencia de distribución total ( $0 < EDT < 1$ ).

Finalmente, el tiempo de riego se puede obtener usando la Ecuación [13].

$$TdR = \frac{V_t}{N_e Q_e} \quad [13]$$

Donde:

- TdR: Tiempo de riego (h).
- $V_t$ : Volumen total que se debe aplicar con el sistema de riego ( $L \text{ dia}^{-1} \text{ árbol}^{-1}$ ).
- $N_e$ : Numero de emisores por árbol.
- $Q_e$ : Caudal emisor ( $L \text{ h}^{-1}$ ).

#### 4.4.2. Medición del caudal del emisor mediante aforos

Un aspecto clave al determinar los tiempos de riego es asegurarse de que los caudales de los emisores sean los correctos, ya que, por diversas razones, es

posible que los caudales reales no coincidan con los establecidos con los teóricos que se diseñó el sistema de riego.

Esto se debió a modificaciones efectuadas en el diseño original del sistema de riego, al cual se incorporaron laterales antes del inicio del estudio, sin realizar un análisis hidráulico previo. Dichos cambios generaron pérdidas de carga adicionales y una disminución de presión, afectando el caudal de los emisores. En consecuencia, fue necesario efectuar aforos de caudal y ajustar el programa de riego para compensar estas variaciones durante la temporada.

Para ello, se establece el siguiente procedimiento para medir de manera representativa los caudales de los diferentes emisores. En este análisis, se realizaron mediciones dentro de las parcelas correspondientes a cada tratamiento del diseño experimental.

Holzapfel, (2024) recomienda que para su determinación se necesita seleccionar cinco hileras de estudio, y las mediciones se deben realizar en la hilera central y las dos adyacentes. Para cada uno de los laterales seleccionado se evalúan 15 emisores, distribuidos en tres grupos de 5 emisores ubicados al inicio, medio y final de cada lateral con respecto al punto de entrada del agua.

Se determinó el caudal a través del método volumétrico, recogiendo agua entregada por el emisor con un tiempo mínimo de 1 min para microaspersión y 5 min para goteros. Finalmente se miden los volúmenes en una probeta graduada.

#### 4.5. Uso de imágenes multiespectrales para manejo de riego.

El uso de imágenes multiespectrales es una herramienta que ayuda a correlacionar variables de interés en el monitoreo de los cultivos, como por ejemplo el vigor de las plantas. Uno de los índices más utilizados para este propósito es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El NDVI es una variable que permite observar la presencia de vegetación y evaluar el estado de desarrollo de esta mediante la intensidad de radiación reflejada o emitida por la superficie a través de bandas del espectro electromagnético, específicamente la banda de rojo e infrarrojo cercano. (Chacon Cruz, 2019).

El NDVI se puede obtener mediante la Ecuación [14].

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad [14]$$

Donde:

- $\rho_{NIR}$ : Reflectividad del infrarrojo cercano (0,845 – 0,885  $\mu\text{m}$ ).
- $\rho_{red}$ : Reflectividad del rojo (0,630 – 0,680  $\mu\text{m}$ ).

De acuerdo con Earth Observing System et al. 2025, el NDVI tiene una relación directa con el riego, ya que permite comparar el comportamiento del área foliar con la cantidad de agua aplicada durante la programación del riego. Los valores comunes del NDVI, comunes en condiciones donde de la cubierta terrestre y los cultivos van en el rango de -1 y 1. Donde en una escala representa lo siguiente.

Tabla 6. Interpretación de valores del NDVI.

Índice	Rango	Interpretación rápida
NDVI	-1 a -0,1	Agua Libre
	0 a 0,1	Suelos desnudos, zonas rocosas o desiertos
	0,2 a 0,5	Vegetación escasa, estrés
	0,6 a 1	Vegetación sana, densa cubierta vegetales

El índice de vegetación de diferencia normalizada es una herramienta que permite monitorear el desarrollo de los cultivos mediante el análisis del reflejo de la radiación solar en el espectro visible e infrarrojo cercano. Al combinarlo con datos de monitoreo de humedad del suelo, es posible identificar zonas con diferente grado de humedecimiento y optimizar el manejo de riego en sistemas de microrriego a partir de la respuesta de la vegetación (Earth Observing System Data Analytics, 2025).

- **Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)**

El SAVI es un índice de vegetación que resalta la interacción del suelo con la planta. Por esta razón, se le agrega un factor de ajuste del suelo (L) al NDVI, con el fin de mitigar el impacto del brillo del suelo, depurando el ruido (como color, humedad, la variabilidad del suelo entre regiones). El SAVI se puede obtener mediante la Ecuación [15].

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + L} * (1 + L) \quad [15]$$

Según (Huete, 1988), L varía entre 0 y 1, con L = 0 en zonas con mucha vegetación y L = 1 con zonas de vegetación verde baja. Para el caso más común a utilizar en huertos agrícolas es L = 0,5 para la mayoría de los suelos.

Valores de 1 representa el estado de sanidad y optima de cultivo por otra parte, donde 0 a 0.2 aproximadamente representa la ausencia de actividad vegetal.

- **Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)**

El GNDVI es un índice que incluye la respuesta del cultivo en la banda verde, que utiliza el infrarrojo cercano. Esta banda reemplaza a la roja en la fórmula de NDVI. El GNDVI se puede obtener mediante la Ecuación [16].

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}}{\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}} \quad [16]$$

Donde:

- $\rho_{GREEN}$ : Reflectividad del verde (0,525 – 0,600  $\mu\text{m}$ ).

Para este índice, los valores oscilan entre 0,6 y 1, que corresponde a las variaciones presentes en la cubierta vegetal, permitiendo ver la sanidad dentro de un mismo cultivo. Los valores negativos corresponden a superficies cubiertas de agua o suelo desnudo.

Se realizaron vuelos con un dron cada quince días durante la temporada de riego, cubriendo los distintos sectores con los tratamientos establecidos. El objetivo es observar el comportamiento de la vegetación a través NDVI, SAVI y GNDVI y poder discretizar el suelo expuesto de zonas con áreas de vegetación con la influencia de las diferentes estrategias de riego realizadas.

#### **4.6. Medición de producción**

Para la medición de producción se cosecharon completos cinco árboles al azar y se pesó la cantidad de fruta obtenida entre las tres hileras centrales de los tratamientos, dejando fuera las hileras bordes (Figura 5).

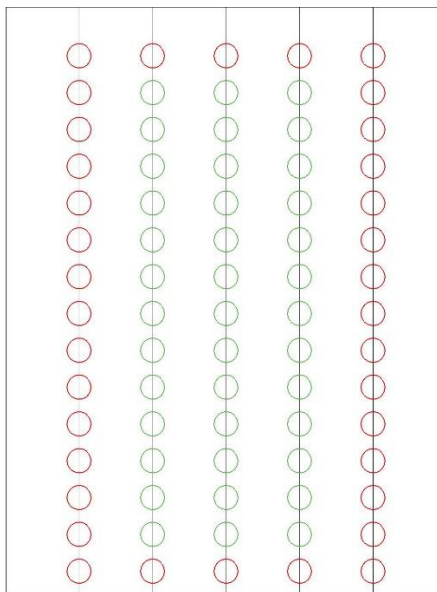


Figura 5. Esquema de selección de árboles muestreados (círculos verdes), dejando fuera las hileras bordes (círculos rojos), utilizados para la estimación de producción por hectárea.

A los cinco árboles se cosechará toda la fruta, con esa cantidad se estimará la producción por ha promedio.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Análisis de la pedregosidad del suelo.

La pedregosidad por estrata de las tres calicatas (Figura 3) usando el método volumétrico basado en la determinación de desplazamiento de agua (principio de Arquímedes); los resultados de pedregosidad por sitio se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de pedregosidad del sitio de estudio.

Sitio	Sector	Profundidad (m)	Volumen balde (L)	Volumen balde con grava (L)	Pedregosidad (%)	Pedregosidad Promedio (%)
TMA	sector 6	0,0 – 0,3	80	63,4	20,75	43
		0,3 – 0,6	80	28	65	
TG3	Sector 1 cuartel 15	0,0 – 0,3	80	50	38	44
		0,3 – 0,6	80	39	51	
TG2 - TG4	Sector 2 cuartel 15	0,0 – 0,3	80	28	65	63
		0,3 – 0,6	80	32	60	

*Fuente: Elaboración Propia.*

Se observo que existe una gran cantidad de pedregosidad, se comporta de manera similar en el sector 6 (Sitio TMA) y sector 1 – cuartel 15 (Sitio TG3), y muestra una tendencia menores porcentaje de pedregosidad en la estrata superficial (20.75% y 38% respectivamente en cada sector), generándose una disminución de capacidad de retención de agua en la estrata entre los 0.3 a 0.6 metros de profundidad, el sector con menor de capacidad de retención de agua es el sector 2 – cuartel 15 (Sitio TG2 – TG4), que es relativamente homogéneo en porcentaje de piedra para todo en el perfil.

Debido a la gran cantidad de pedregosidad del suelo se debe considerar este porcentaje para determinar la capacidad de retención de agua. .

Tabla 7. Retención de agua del suelo en los sectores del estudio correspondiente a cada tratamiento.

Sitio	Sector	Profundidad (cm)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CC (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	PMP (%)	Pedregosidad (%)	estrata (cm)	Capacidad de retención del suelo	Volumen Total de la planta
								(L m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup> )	(L)
TMA	Sector 5 Cuartel 6	0 – 30	1,07	45,8	29,9	20,8	30	38,0	152,1
		30 – 60	1,16	38,9	25,0	65,0	30	14,6	58,3
TG3	Sector 1 Cuartel 15	0 – 30	1,18	41,2	26,4	37,5	30	27,8	111,2
		30 - 60	1,36	35,8	21,4	51,3	30	20,9	83,7
TG2-TG4	Sector 2 Cuartel 15	0 – 30	1,18	36,4	23,8	65	30	13,3	53,1
		30 - 60	1,30	34,0	20,4	60	30	16,3	65,4

Fuente: *Elaboración Propia. (contenido de humedad m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>).*

Se comparó el volumen total de agua retenido por planta con respecto al volumen total de retención con pedregosidad, el criterio de riego y área efectiva de las raíces del cerezo en cada sector. Se observa en general que la capacidad de retención de agua disminuyó considerablemente en todos los sectores (Figura 6, 7, 8).

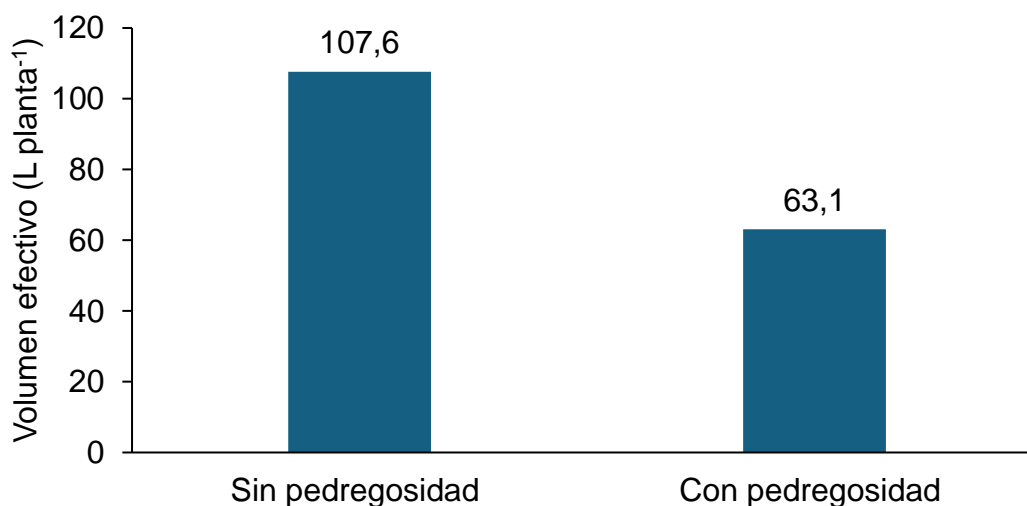


Figura 6. Efecto de la pedregosidad en el volumen efectivo de la planta en el sitio TMA (10, 20, 30 y 40), correspondiente al tratamiento bajo riego microaspersión (TMA).

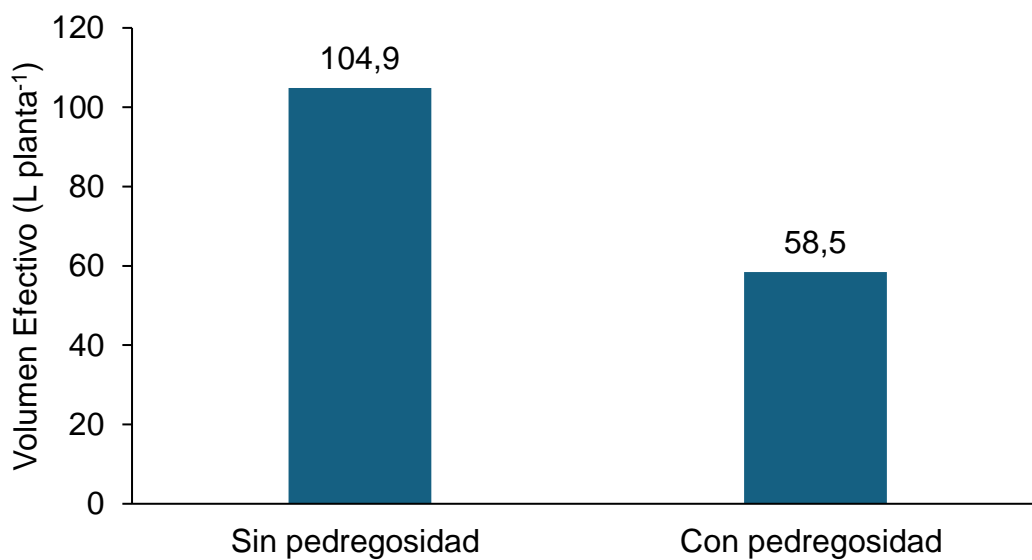


Figura 7. Efecto de la pedregosidad en el volumen efectivo de la planta en el sitio TG, correspondiente al tratamiento TG3.

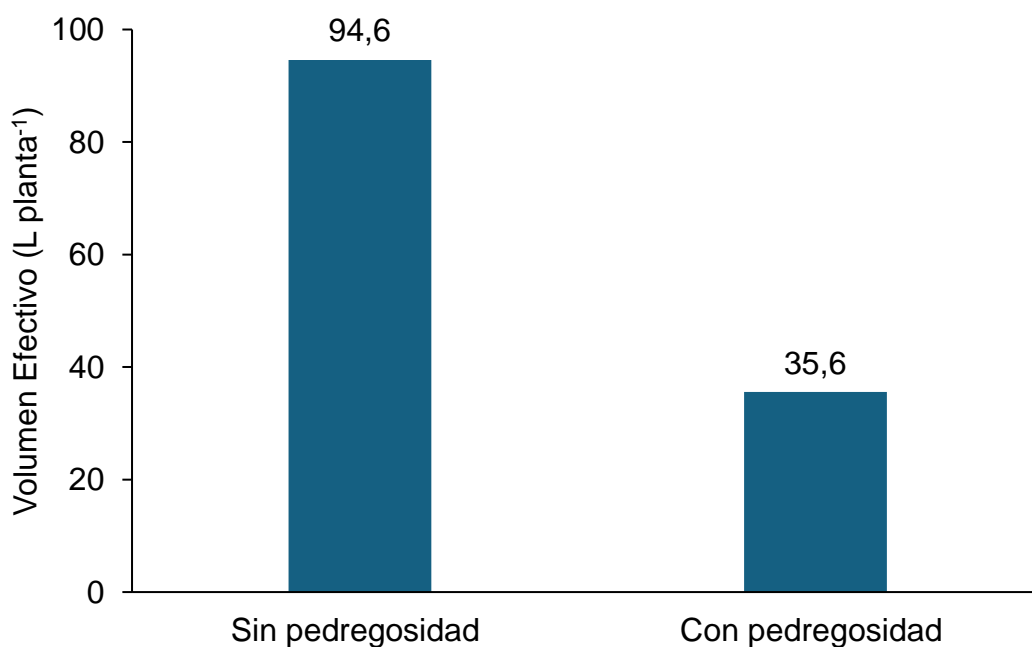


Figura 8. Efecto de la pedregosidad en el volumen efectivo de la planta en el sitio TG, correspondiente al tratamiento TG2 y TG4 bajo riego goteo.

En las Figuras 6, 7 y 8 se observa el efecto de la pedregosidad en la cantidad de volumen de agua retenido para la planta. Específicamente, en la Figura 8

(TG2 y TG4) se observa una disminución de 62.37% del volumen efectivo para la planta (94,6 L a 35,6 L), mientras que el tratamiento TMA (Figura 6), la disminución fue de 41,3% (107,6 L a 63,1 L) y en Figura 7 (TG3), se observó la reducción en un 44.3% (104,9 L a 58,5 L), siendo estos dos últimos sitios los que presentan menores porcentajes de pedregosidad. Sin embargo, pese a que los valores de pedregosidad en dichos sitios (TMA y TG3) son menores en comparación con el tratamiento TG2 y TG4, siguen representando una reducción significativa en la capacidad de retención de agua en el suelo.

Considerar la pedregosidad en el volumen de retención ayuda a estimar con precisión la frecuencia y tiempos de riego y así evitar pérdidas de agua por percolación y escurrimiento dentro de los sectores estudiados, además de no provocar un déficit hídrico asociado al requerimiento de la planta.

## **5.2. Análisis de evapotranspiración de referencia y demanda hídrica del cultivo.**

### **5.2.1. Análisis de evapotranspiración de referencia.**

El análisis semanal de la  $ET_r$  se obtuvo mediante la estación más cercana y representativa de la zona agroclimática (INIA, 2009 - 2023), utilizando el modelo de Penman-Monteith y el modelo Hargreaves – Samani. La variación semanal de la  $ET_r$  usando ambos modelos se puede observar en la Figura 9.

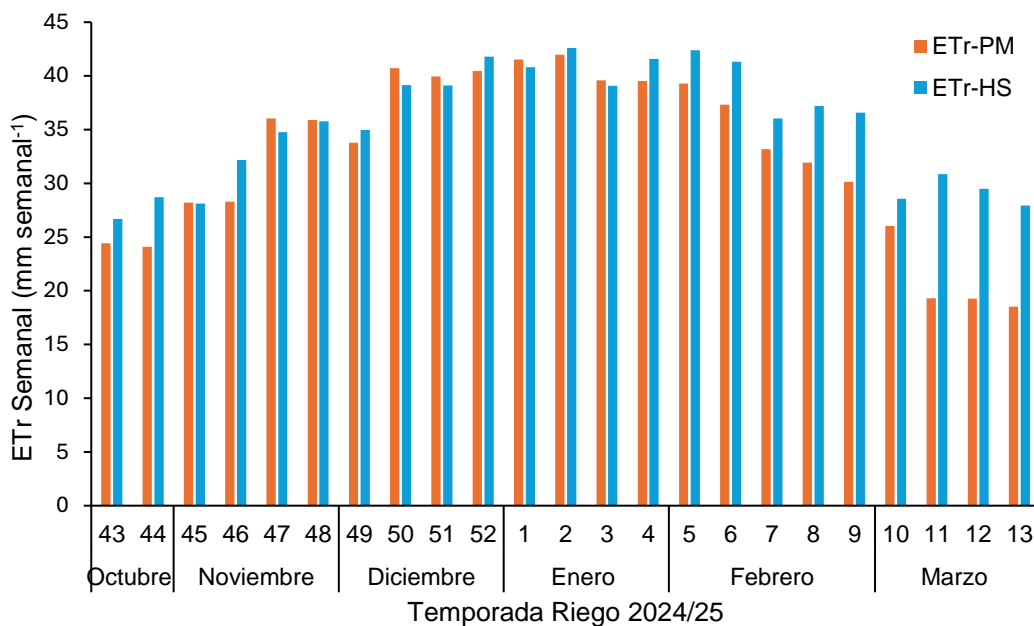


Figura 9. Evapotranspiración de referencia (ETr semanal) obtenida de la estación meteorología Los niches, Agrochile (ETr-PM) y Evapotranspiración de referencia estimada con modelo Hargreaves – Samani (ETr-HS).

Se observó que a inicios del periodo de estudio la ETr-PM obtenida de las estaciones meteorológicas tuvo comportamientos similares con la ETr-HS estimada (Figura 9). Sin embargo, la ETr-HS tiende a sobrestimarse con respecto a ET P-M a finales del periodo de estudio (Febrero – Marzo). Esto puede ser atribuible a que no se tienen calibrados los coeficientes de ubicación geográfica y de humedad relativa del modelo ETr-HS donde se encuentra el sitio de estudio.

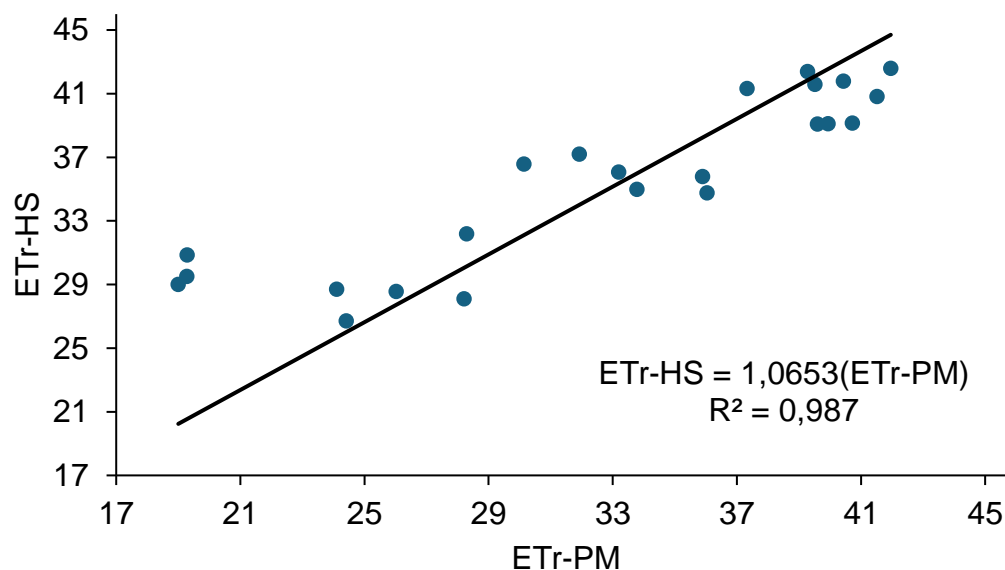


Figura 10. Relación 1:1 de evapotranspiración obtenida mediante Estaciones meteorológica (ETr-PM) con respecto a la Evapotranspiración de referencia mediante el modelo de Hargreaves – Samani (ETr-HS).

De la Figura 10 se observa que ETr-HS presento valores ligeramente superiores a los del modelo ETr-PM, con una sobrestimación promedio cercana al 6%, con el ajuste de correlación ( $R^2=0,987$ ), nos indica que las estimaciones de ET de ambos modelos se comportan de manera muy similar. Hacia a fines del periodo del estudio estas diferencias tienden a aumentar, alcanzando valores sobre el 10%. Sin embargo, la relación entre ambos modelos se mantiene lineal en el periodo donde el cerezo tiene mayor demanda hídrica y en el llenado de fruta (periodo donde no le puede faltar el agua).

### 5.2.2. Análisis de Evapotranspiración de cultivo

El análisis de evapotranspiración de cultivo ( $ET_c$ ) se estimó semanalmente con los factores F1 y F2 correspondiente a cada tratamiento previamente definidos,

los riegos se iniciaron la semana 43 (21-10-2024), para el sitio TMA se entregó para cada tratamiento el mismo volumen de agua (TMA10, TMA20, TMA30, TMA40). Además, se midió el porcentaje de cobertura de los árboles y el área humedecida de los diferentes tratamientos.

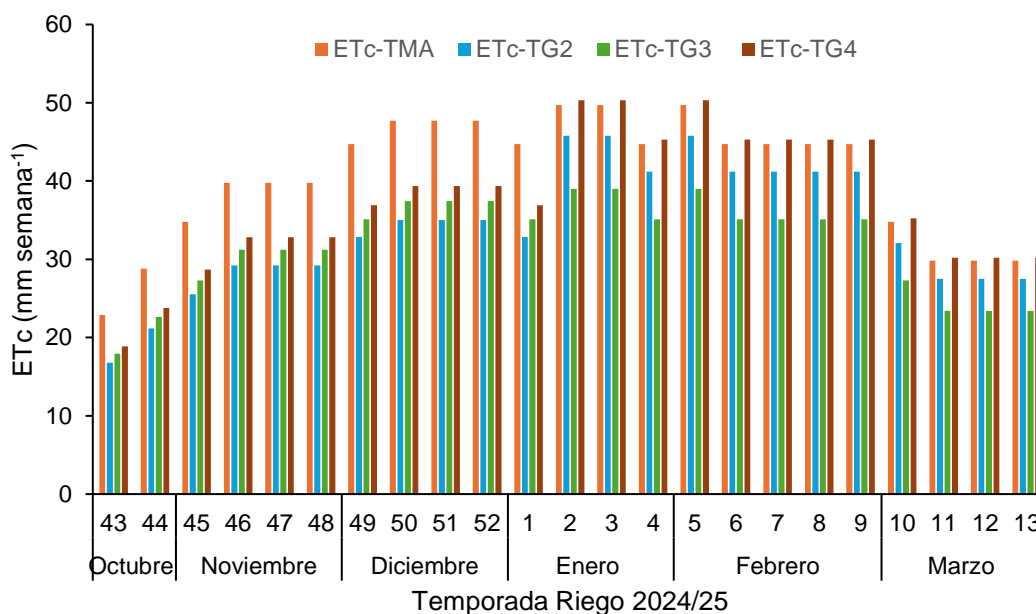


Figura 11. Variación semanal de la evapotranspiración de cultivo ( $ET_c$ ) para los tratamientos de riego durante la semana 2024/25.

En la Figura 11 se muestra, la necesidad hídrica de los árboles con un porcentaje de cobertura de 60% para el tratamiento de microaspersión y 50% para los tratamientos del sistema de goteo. El aumento de la  $ET_c$  se asocia a la influencia de las variables climáticas con el pasar de las semanas, además se observó que durante el mes de enero se generó un aumento en la demanda, debido a que se recalculó el porcentaje de cobertura de los tratamientos TG2 y TG4 a un 65%, en el caso del tratamiento TG3 se mantuvo en el mismo porcentaje de cobertura, y este se mantuvo durante el resto del estudio.

### 5.3. Análisis de programación de riego con respecto a la capacidad de retención del suelo.

Se analizó la capacidad de retención máxima de agua en el suelo, para establecer los tiempos de riego y la frecuencia. Para ello se obtuvo el volumen de agua diario para el periodo de riego (Figura 12).

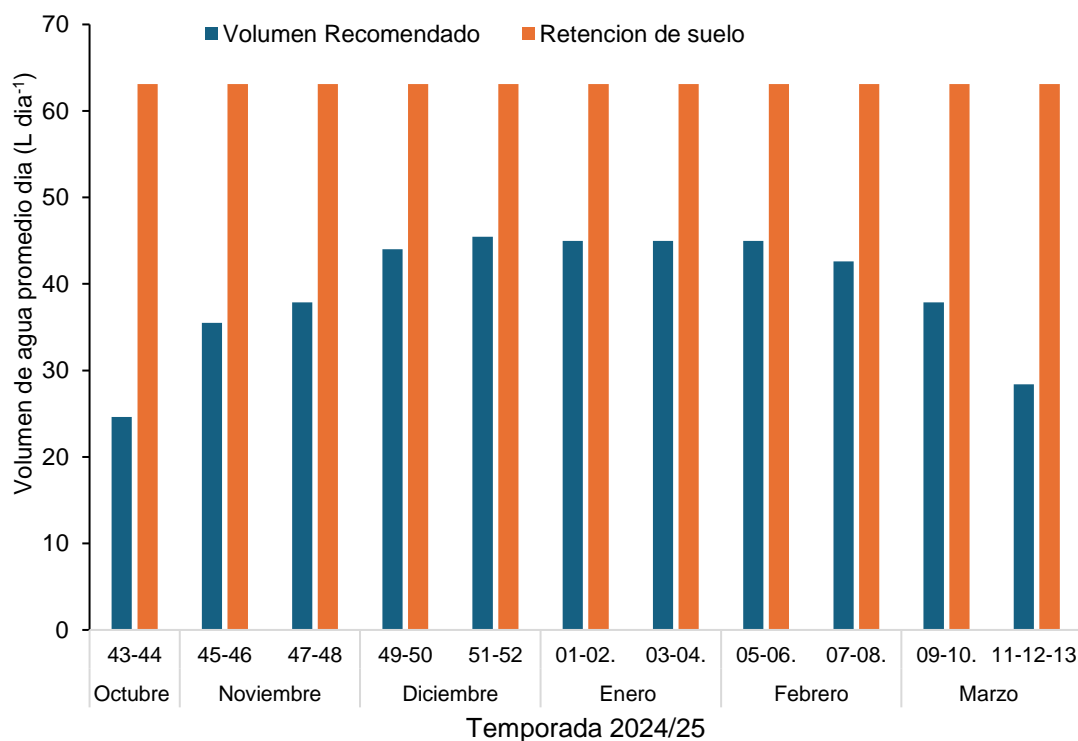


Figura 12. Volumen de agua promedio diario recomendado y la retención máxima de agua para el periodo de riego (oct – mar) en el sitio TMA.

Se observó que, durante la temporada de riego, el volumen de agua recomendado semanalmente no superó la capacidad de retención del suelo en el sitio TMA (Figura 12). En las primeras etapas del período de llenado de fruto (octubre e inicios de noviembre) se aplicaron riegos más espaciados (menor frecuencia), lo que se asocia a una menor demanda hídrica del cultivo

en esa fase. No obstante, los riegos se realizaron de manera eficiente y controlada, evitando déficits de humedad que pudiesen afectar la cuaja de los frutos.

A medida que avanzó la temporada y aumentó la evapotranspiración del cultivo, la frecuencia de riego incremento progresivamente, alcanzando su mayor intensidad durante los meses de verano (enero – febrero), periodo en el cual se presenta la máxima demanda hídrica. Esta tendencia evidencia una estrategia de manejo orientada a mantener una adecuada disponibilidad en la zona radicular, asegurando tanto la eficiencia del agua como el desarrollo del cultivo.

En los tratamientos con sistema de gotero se obtuvo los resultados que se muestran en las Figuras 13, 14, 15.

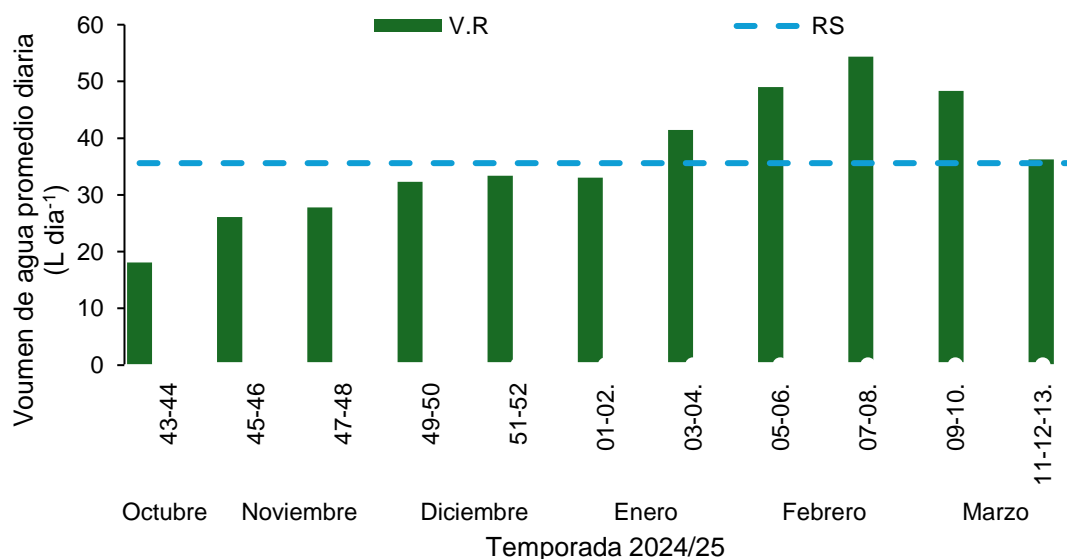


Figura 13. Comparación entre el volumen recomendado (V.R.) en relación con la capacidad de retención de suelo (RS) considerando una retención de 35.6 L en el tratamiento (TG2).

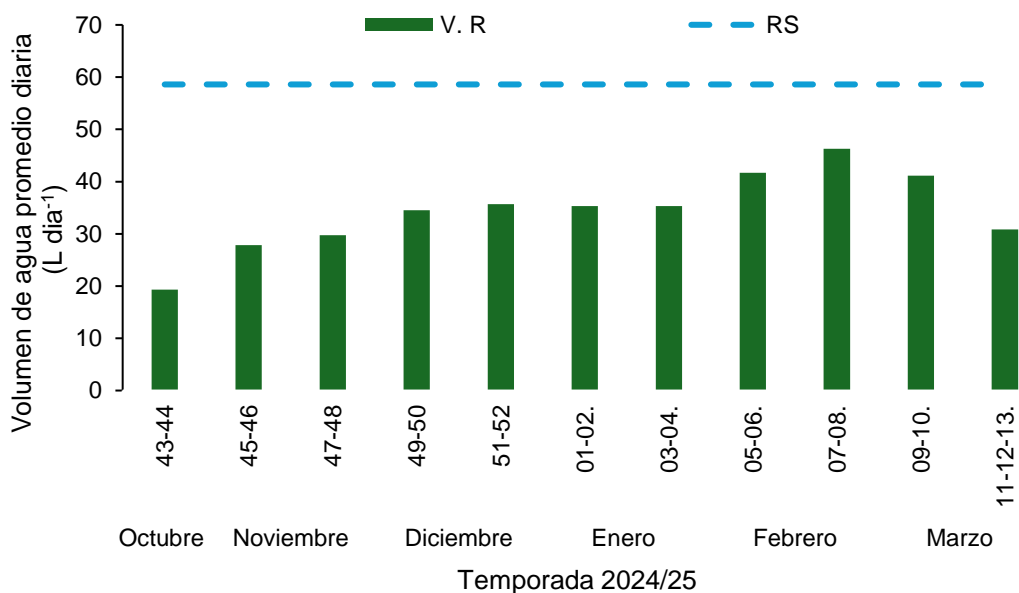


Figura 14. Comparación entre el volumen recomendado (V.R) respecto a la capacidad de retención del suelo (RS) en tratamiento (TG3).

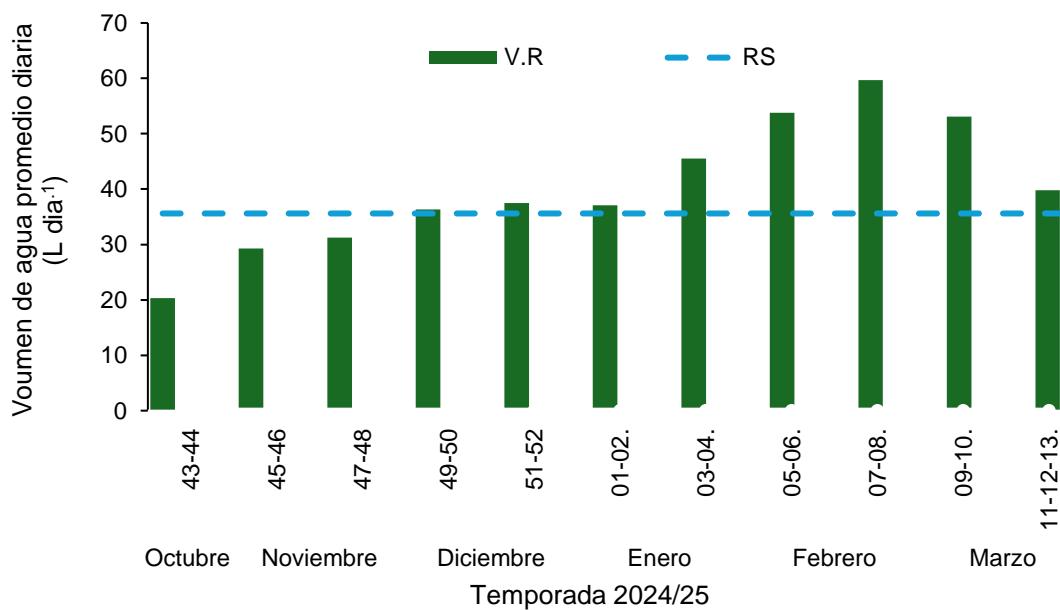


Figura 15. Comparación entre el volumen recomendado (V.R) en relación con la capacidad de retención de suelo (RS) considerando una retención de 35.6 L en el tratamiento (TG4).

En la Figura 14, se observa que del tratamiento TG3 presenta un comportamiento relativamente similar al TMA (Figura 12), en cuanto a la frecuencia de riego durante la temporada. El volumen recomendado (V.R) del tratamiento TG3 no presento problemas de capacidad de retención del suelo (RS) aun asociados a la alta pedregosidad para satisfacer la demanda hídrica calculada en el V.R del tratamiento TG3 en base a la frecuencia determinada con riegos diarios para evitar déficits hídricos durante los meses de mayor demanda (Enero – Febrero).

Con respecto a los tratamientos con sistema de gotero TG2 y TG4 , (Figura 13 y 15) se observó una alta variabilidad asociada a la pedregosidad en dichos sectores. En los tratamientos TG2 y TG4 se registraron periodos (enero y febrero) donde la frecuencia fue de 2 riegos diarios, debido a que la pedregosidad del suelo reduce considerablemente la capacidad de retención de agua, cuando la demanda hídrica del cultivo alcanza su punto máximo en la temporada en el sector de estudio.

En el tratamiento TG3, la capacidad de retención del suelo indica que no era estrictamente necesario realizar dos riegos diarios. Sin embargo, se aplicó la misma frecuencia de riego que en los demás tratamientos de goteo (TG2 y TG4) durante los meses de máxima demanda (Enero – Febrero).

#### 5.4. Análisis del contenido de humedad de suelo y su distribución en el perfil.

Los resultados del contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m para los sitios TMA en la temporada 2024-2025 se muestran en las Figuras 16 a la 19.

##### 5.4.1. Sitio con Microaspersión (TMA)

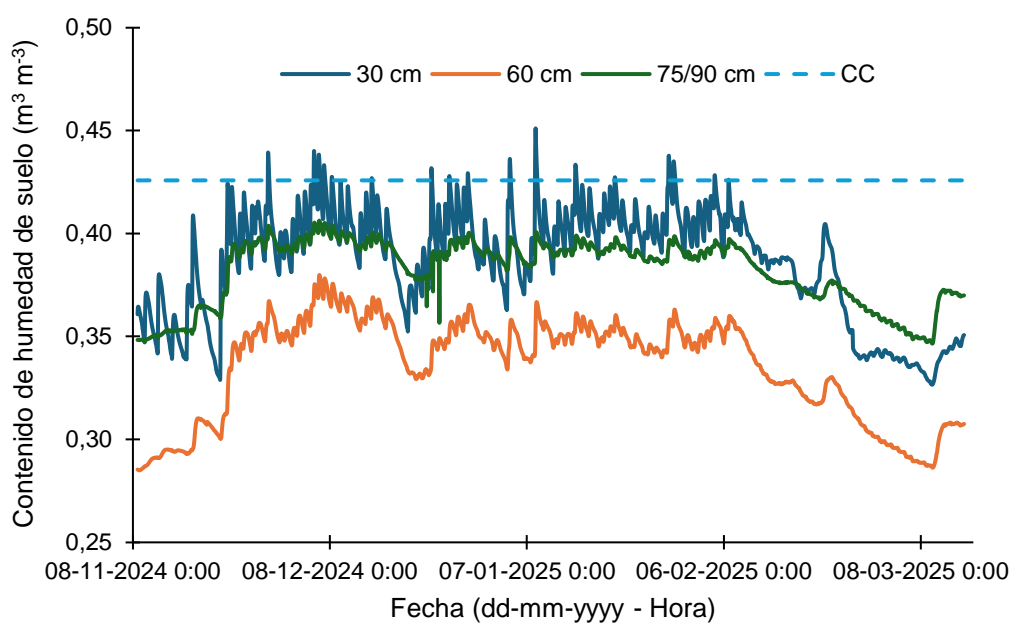


Figura 16. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024-2025 para el tratamiento TMA10.

En la Figura 16, se observa el comportamiento del contenido de humedad de suelo en el tratamiento TMA10. Los resultados muestran que el contenido de humedad varía entre CC ( $0,4258 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ) y  $0,35 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ . Durante el estudio se observó una alta variabilidad en la humedad del suelo, influenciada por los eventos de riego y la  $\text{ETc}$  en la capa superficial del suelo (0,3 m), mientras que

a profundidades mayores (0,6 y 0,9 m) se ve una tendencia similar pero suavizada. A los 0,9 m se observa un contenido de humedad mayor ( $> 0,347 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) y se mantiene estable durante la temporada, lo que tiende a indicar que la mayor extracción de agua desde las raíces se realiza dentro de los primeros 0,6 m de profundidad. Además, la distribución de sensores en el perfil de suelo permite identificar tendencias del consumo hídrico de la planta y el momento de riego.

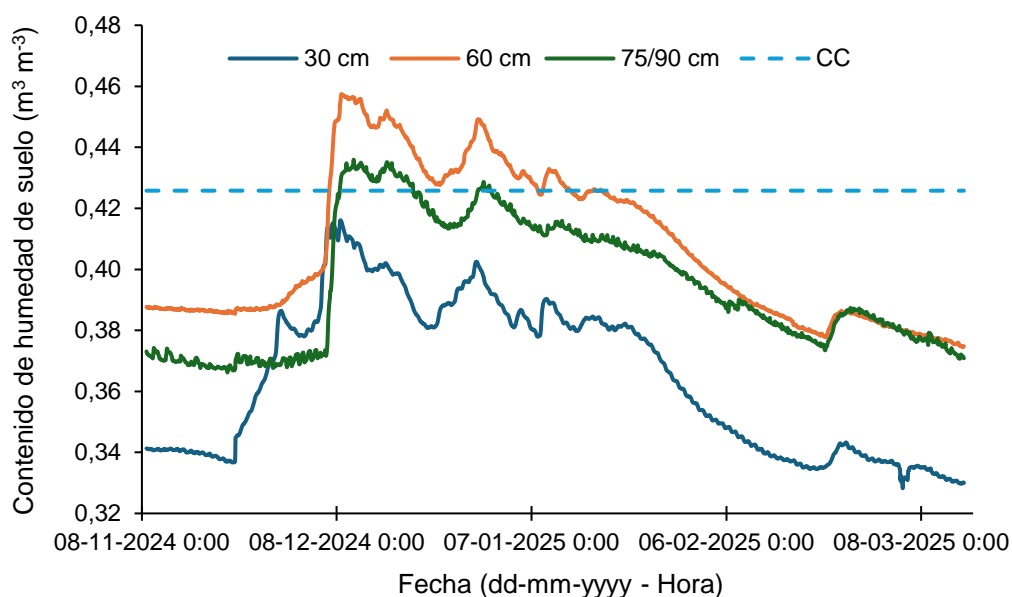


Figura 17. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TMA20.

En la Figura 17, se observó la variación temporal del contenido de humedad del suelo en el tratamiento TMA20. Los resultados muestran un incremento abrupto a comienzos de diciembre asociados al aumento de la frecuencia de riego generada por la frecuencia diaria, alcanzando valores máximos superiores a CC ( $0,425 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Posteriormente, se observó una tendencia

monotónicamente descendente en todas las profundidades a lo largo de la temporada.

En la capa superficial (0,3 m), la humedad muestra un incremento importante con una rápida disminución del contenido de humedad después de cada evento de riego, reflejando una alta tasa de evaporación y extracción radicular. A los 0,6 m, los valores se mantuvieron elevados durante gran parte de la temporada, lo que indica una zona activa de acumulación hídrica para raíces. Por último, en la capa profunda (0,75-0,9 m) la humedad permaneció más estable y con menor variación, lo que indica una baja extracción de agua de parte de parte de las raíces.

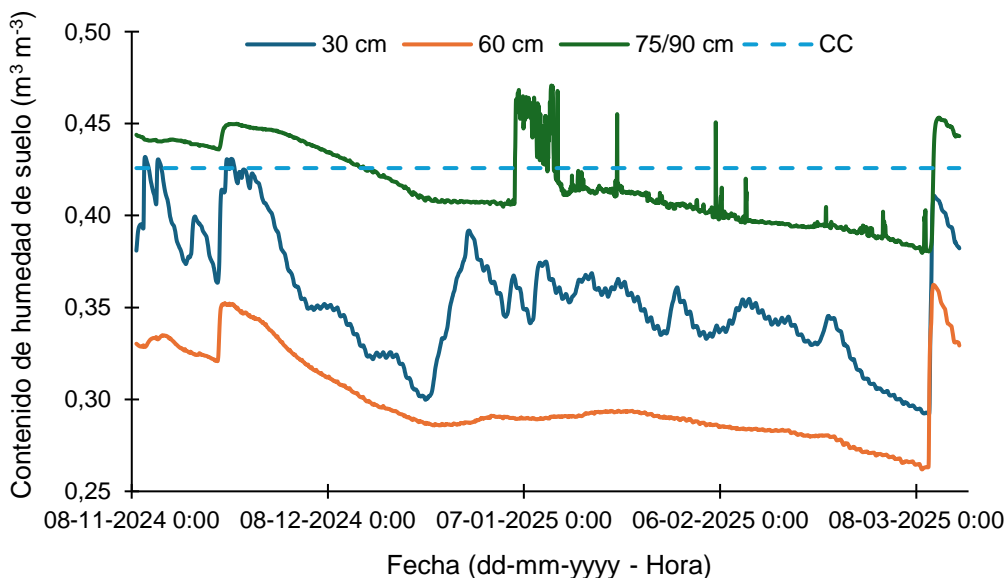


Figura 18. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TMA30.

En la Figura 18, se observó que el tratamiento TMA30 presento un descenso progresivo del contenido de humedad en el perfil a lo largo de la temporada.

A diferencia del tratamiento anterior (TMA20), el tratamiento TMA30 (Figura 18), en la capa superficial (0,3 m) si se observaron fluctuaciones marcadas y una disminución sostenida desde diciembre, reflejando una rápida pérdida de agua posterior a cada riego. En la capa intermedia (0,6 m), los valores se mantuvieron bajos ( $< 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), con escasa variabilidad, indicando una actividad de raíces con limitada infiltración o capacidad de retención a esa profundidad. Además, al igual que en los tratamientos anteriores, no se observan claramente los pulsos de riego durante el periodo de estudio, lo que puede deberse principalmente a problemas a la respuesta de los sensores, o problemas con la lectura del sensor (calibración previa).

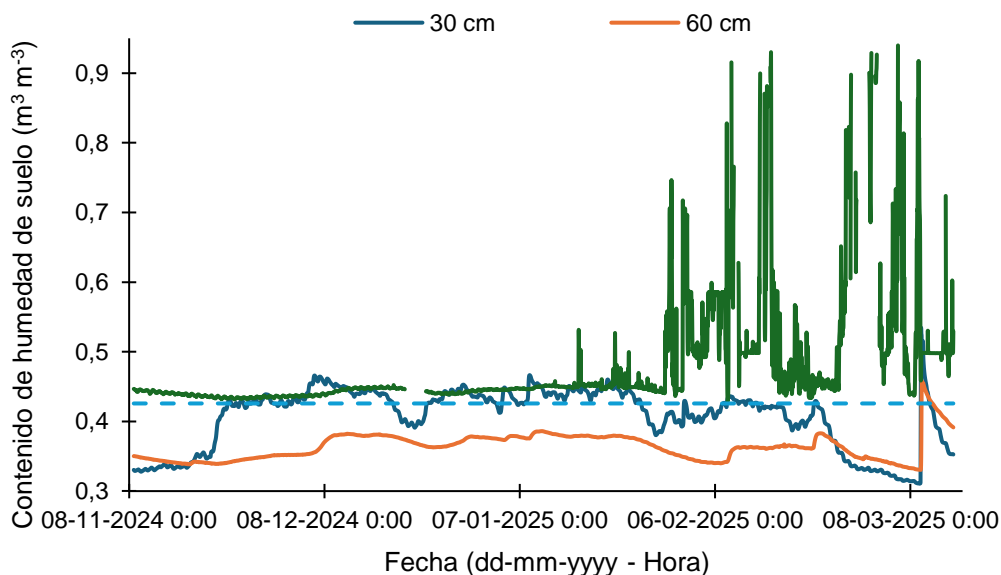


Figura 19. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TMA40.

En la Figura 19, se observa que el contenido de humedad del Tratamiento TMA40, se mantiene constante a lo largo de todo el periodo de estudio, a pesar

de que no se observan claramente los ciclos de riego, sin embargo, el contenido de humedad se mantuvo cercanos a capacidad de campo en ambas estratas de interés (0,3 m, 0,6 m). En la profundidad de 0,75 – 0,9 m se registraron valores considerablemente más altos y con mayor variabilidad, los cuales podrían corresponder a lecturas fuera de rango del contenido de agua en el suelo, por lo que dichos valores no fueron considerados en el análisis comparativo.

Tabla 8. Resumen comportamiento de humedad del suelo en diferentes profundidades para los tratamientos de microaspersión en la temporada 2024/25.

Tratamiento	Capa 0,3 m	Capa 0,6 m	Capa 0,75-0,9 m	Observaciones
TMA10	Fluctuaciones regulares, respuestas rápidas a riego	Estable, humedad se redistribuye moderadamente	Estable, sin variación significativa	Riego eficiente, buena respuesta de 30 cm, limitada infiltración en capas profundas.
TMA20	Fluctuaciones moderadas, algunas caídas abruptas	Disminución gradual, sin recarga significativa	Datos irregulares, posible error de sensor	Posibles problemas de instalación en 30 cm y 75/90 cm. Baja recarga en 60 cm.
TMA30	Fluctuaciones significativas, picos de humedad	Caída gradual, limitada recarga de agua a esa capa	Errores evidentes con picos muy altos, valores poco confiables	Fallas de sensores, deficiente de infiltración agua, posible interferencia.
TMA40	Estable, disminución gradual hacia el final	Caída progresiva de humedad, sin recarga profunda	Picos inusuales y elevados, valores poco confiables	Problemas de sensor en 75/90 cm, infiltración insuficiente hacia capas profundas.

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 5.4.2. Sitio con Goteo (TG)

Al igual que los tratamientos de microaspersión se analizó el comportamiento del contenido de humedad de suelo para cara tratamiento de goteo que se muestran en la Figura 20 a 22.

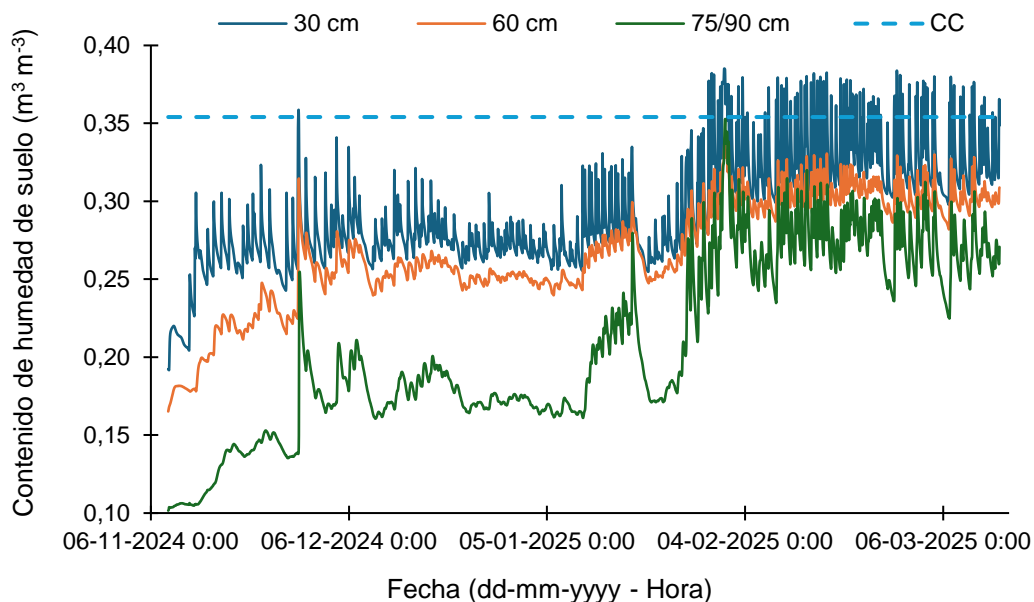


Figura 20. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TG2.

En la Figura 20, muestran los resultados del contenido de humedad a los riegos realizados a las diferentes profundidades. Se observa un considerable aumento en el contenido de humedad del suelo a inicios del mes de febrero, alcanzando valores cercanos a capacidad de campo. Lo que indica una mayor frecuencia de riegos realizados durante el día. En la capa de 60 cm se mostró estable y menor variabilidad, cercanos a capacidad de campo. Por último, en la capa de 75/90 cm, muestra un contenido de humedad menor a las demás capas. Esto refleja que en general el agua aplicada se mantuvo en las capas superiores. Además de la respuesta respecto a la actividad radicular del cerezo en esa zona es mucho menor a las demás capas, generando pérdidas por percolación.

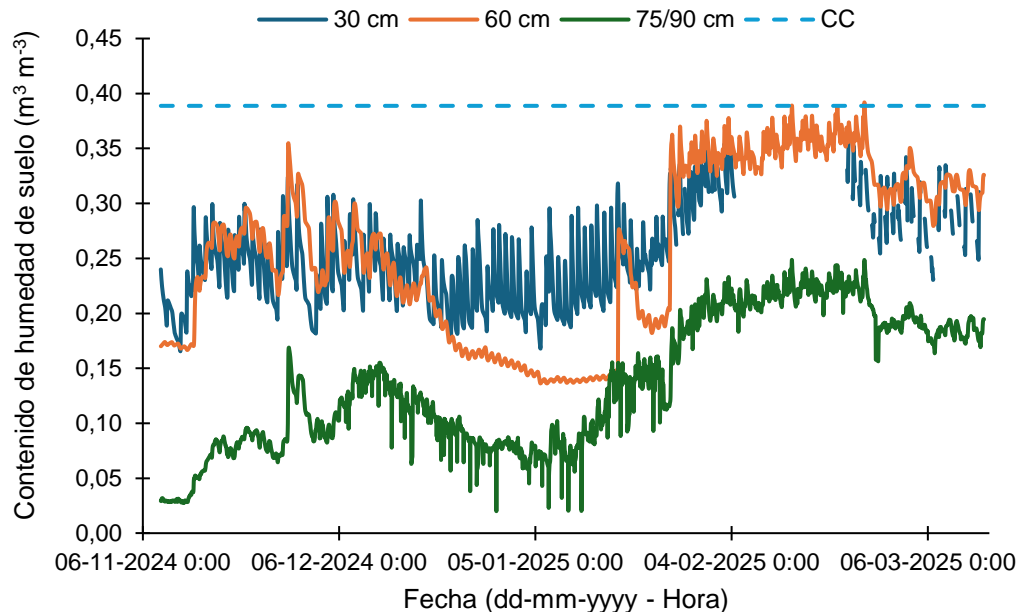


Figura 21. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TG3.

La Figura 21, se observó el contenido de humedad a diferentes profundidades de suelo en el tratamiento TG3. En la capa superficial (0,3 m), la humedad presento una marcada variabilidad, en respuesta directa a los eventos de riego, aunque sin alcanzar valores cercanos a capacidad de campo (CC). El contenido de humedad a los 0,6 m muestra un aumento considerable posiblemente asociado a una menor extracción que también afecta las capas inferiores.

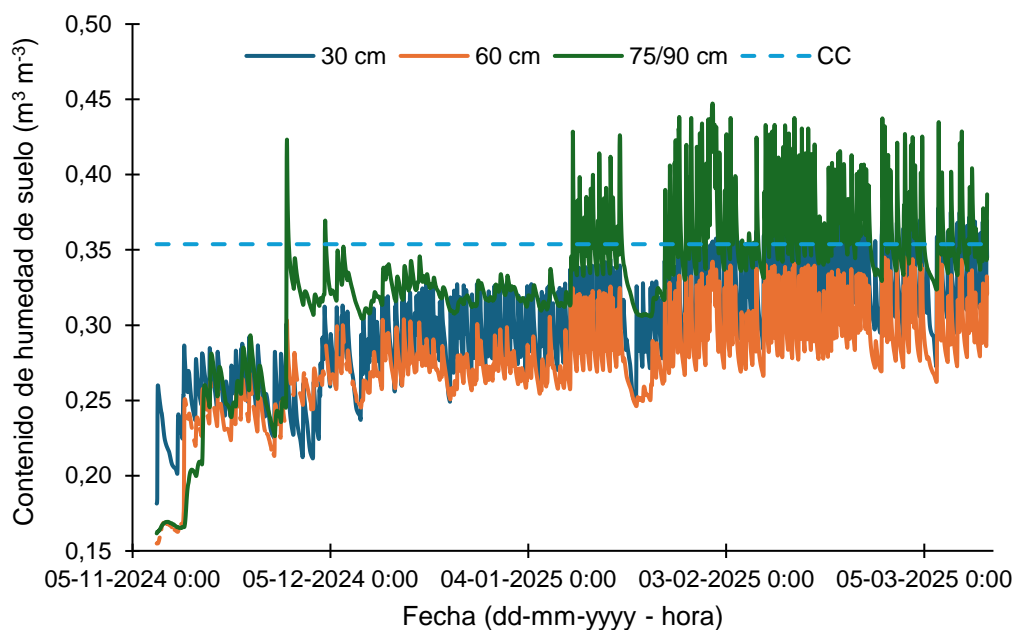


Figura 22. Contenido de humedad de suelo a profundidades de 0,3, 0,6 y 0,9 m durante la temporada 2024/25 para el tratamiento TG4.

Del contenido de humedad en el tratamiento TG4 (Figura 22), muestra un aumento constante desde inicio de temporada para todas las estratas de suelo manteniéndose con valores muy cercanos a capacidad de campo a fines del periodo de riego. Esto permite deducir que el riego estuvo en un rango adecuado. En la capa de 0,3 m, correspondiente a la zona superficial, la humedad se mantuvo relativamente constante a lo largo del periodo, sin alcanzar la capacidad de campo (CC), lo que indica una recarga hídrica controlada y moderada. A los 0,6 m de profundidad, se mantuvo estable a lo largo del periodo, se ve un avance limitado al frente húmedo dado la pedregosidad. Finalmente, en la capa más profunda (0,75-0,9 m), se mostró un considerable contenido de humedad evidenciando que no hay actividad

radicular de parte del cerezo, lo que nos indica principalmente ineficiencia en el uso del agua, ya que puede existir grandes pérdidas por percolación.

Tabla 9. Resumen comportamiento de humedad del suelo en diferentes profundidades para los tratamientos de goteo en la temporada 2024/25.

Tratamiento	Etapa	0,3 m	0,6 m	0,75-0,9 m	Observaciones
TG2	Buena respuesta al riego, con variaciones controladas y tendencia a estabilizarse hacia el final	Estabilidad general, adecuada para la estrategia de reposición	Percolación limitada al inicio, pero más evidente al final	Buen control en zona radicular, eficiente para la estrategia de riego	Buen control en zona radicular, eficiente para la estrategia de riego
TG3	Oscilaciones frecuentes, con interrupciones de datos al final	Acumulación hídrica, con niveles altos y sostenidos	Lecturas poco confiables, con posibles errores de sensor	Acumulación en profundidad media, con limitaciones en calidad de datos	Acumulación en profundidad media, con limitaciones en calidad de datos
TG4	Altas variaciones con valores sobre CC al final de temporada	Estable, pero sin alcanzar CC	Estable, pero sin alcanzar CC; control moderado de la humedad	Valores altos desde etapas tempranas indicando percolación profunda	Presencia de percolación profunda a pesar del enfoque en 60 cm

Cabe destacar que los tres tratamientos evaluados (TG2, TG3, TG4) compartieron un mismo sistema de bombeo y red hidráulica principal, lo cual implicó ciertas limitaciones estructurales comunes en cuanto a presión y caudales disponibles. Si bien se realizaron ajustes operacionales en la programación y frecuencia de riego para cada tratamiento, estos se implementaron dentro de las posibilidades técnicas y prácticas del sistema existente.

### **5.5. Comportamiento de índices de monitoreo a través de imágenes multiespectrales.**

Se analizaron los índices NDVI, GNDVI y SAVI en tres periodos fenológicos: crecimiento del fruto, cosecha y después de cosecha, para evaluar la respuesta del vigor vegetativo y su relación con las condiciones de manejo del riego del sitio de estudio (TMA y TG). Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

- **Sitio con Microaspersión (TMA)**

La Figura 23 muestra la variación del NDVI con respecto al tiempo, donde se observa un incremento general de los valores hacia mediados del periodo estudiado, alcanzando en febrero de 2025 el valor máximo. La correlación del NDVI muestra que para los periodos analizados el TMA20 y TMA30 tiende a tener NDVI mayores que TMA10 y TMA40, lo que indica que el cultivo tuvo mayor desarrollo vegetativo en ese periodo. Mientras que el TMA10 mostró NDVI menores lo que se asocia a un menor contenido de humedad en el suelo (Figura 23).

Es relevante destacar que los valores del NDVI cercanos a 0.4 sugieren que el riego no está siendo ejecutado adecuadamente. Este comportamiento puede estar asociado a una distribución irregular de la humedad en el suelo, lo que podría estar limitado en el desarrollo vegetativo. En particular, el suelo tiene un efecto importante sobre los valores de NDVI por la distribución de los cultivos hilerados, generando variaciones que pueden inducir valores de

índices más bajos, como se observa en el tratamiento TMA10, que su radio de humedecimiento es más pequeño que los demás tratamientos (TMA20, TMA30 TMA40). Por lo tanto, mejorar la eficiencia del riego y su distribución sería clave para optimizar el crecimiento de las plantas y obtener mejores valores de NDVI.

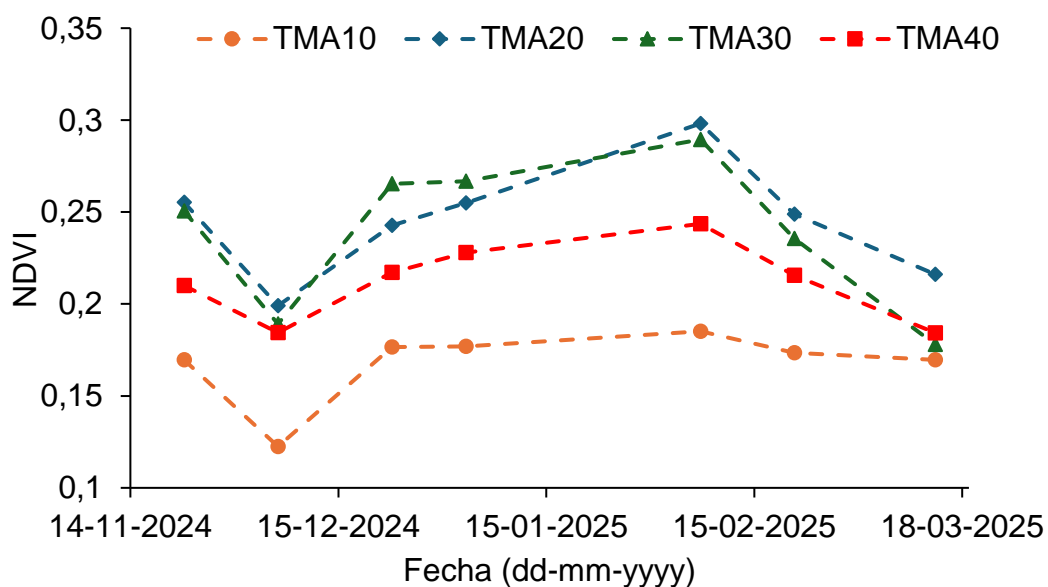


Figura 23. Variación temporal del valor promedio del índice NDVI en el sitio TMA bajo distintos tratamientos de manejo (TMA10, TMA20, TMA30 y TMA40) durante la temporada 2024-2025.

La Figura 24, muestra la variación temporal del índice SAVI durante la temporada 2024-2025, evidenciando una tendencia similar a la observada en el NDVI. Los tratamientos TMA20 y TMA30 presentaron los valores promedio más altos de SAVI (0,42 - 0,45), lo que indica una mayor cobertura vegetal y una menor exposición del suelo, reflejando un mejor desarrollo del cultivo bajo estas condiciones. En contraste, el tratamiento TMA10 registró valores más bajos (0,30) asociados a una menor área de humedecimiento que podría

provocar pérdidas de agua en profundidad y resultar en menor volumen de agua disponible y, por ende, a un menor vigor del dosel vegetal.

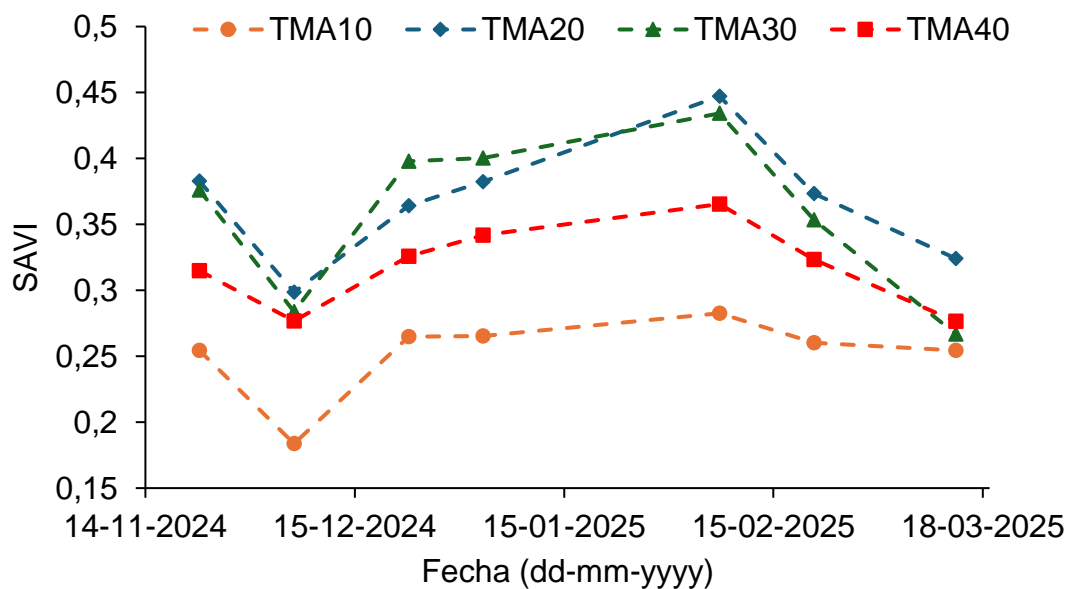


Figura 24. Variación temporal del valor promedio del índice SAVI en el sitio TMA bajo distintos tratamientos de manejo (TMA10, TMA20, TMA30 y TMA40) durante la temporada 2024-2025.

A través del índice SAVI se registraron valores superiores a los obtenidos con el NDVI. Esto se explica porque los cerezos presentan un patrón de plantación en hileras, donde existe una mayor proporción de suelo expuesto entre las hileras. Además, el cultivo se encuentra próxima a una etapa de desarrollo más avanzada, lo que se espera un incremento del follaje en la próxima temporada. En este contexto el factor de corrección incorporado en el SAVI permite reducir la influencia del suelo desnudo sobre los valores del índice entregando una estimación más precisa del vigor vegetativo.

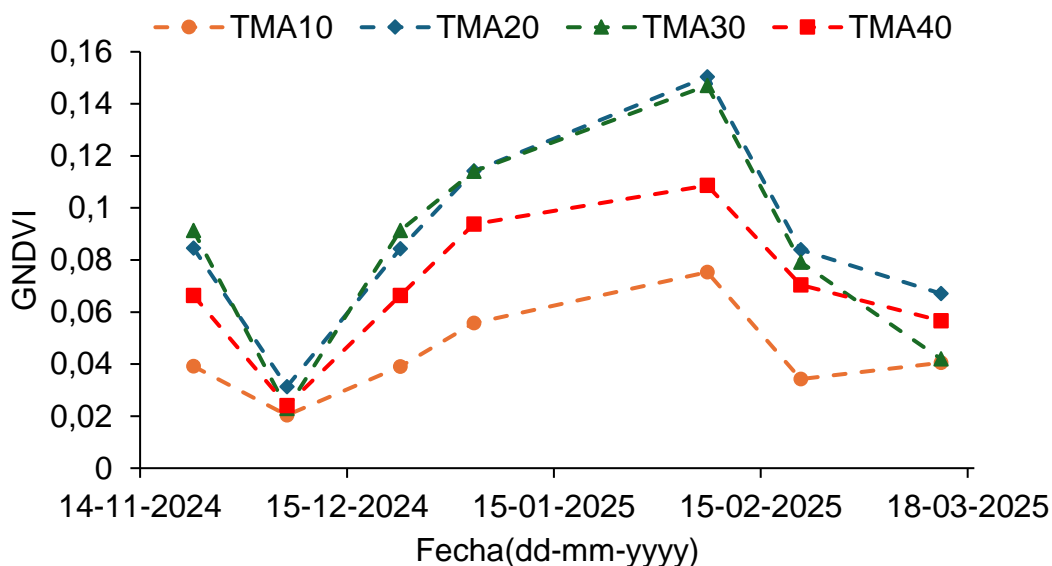


Figura 25. Variación temporal del valor promedio del índice GNDVI en el sitio TMA bajo los tratamientos de manejo (TMA10, TMA20, TMA30, TMA40) durante la temporada 2024-2025.

En la Figura 25, se observó el índice GNDVI presento una tendencia similar a la observada en los índices anteriores (NDVI y SAVI), con incrementos hacia mediados del periodo de evaluación y máximos en febrero de 2025. Los Tratamiento TMA20 y TMA30 mostraron los valores promedios más altos de GNDVI (0.14 y 0.5 respectivamente), lo que evidencia una mayor eficiencia en la actividad fotosintética del cultivo. En cambio, el tratamiento TMA10 presento valores más bajos (0.07), reflejando un menor desarrollo foliar y un contenido reducido de clorofila. Estos resultados pueden estar asociados a que el tratamiento TMA10 limita el desarrollo vegetativo producto de que genera menores áreas humedecidas que los demás tratamientos (TMA20, TMA30, TMA40).

- **Sitio con Goteo (TG)**

En la Figura 26, se muestra la variación temporal entre los tratamientos de manejos (TG2, TG3 y TG4). En general los valores se mantuvieron en un rango entre 0.18 y 0.30, reflejando una cobertura vegetal media. El tratamiento TG2 presento los valores altos a lo largo de la temporada, lo que indicaría una mayor actividad fotosintética y vegetativa en comparación con TG3 y TG4. Hacia finales de la temporada (marzo 2025), se observó una disminución marcada en TG3, posiblemente asociada a un menor desarrollo foliar o a condiciones de estrés hídrico, mientras que TG2 y TG4 mantuvieron valores más estables.

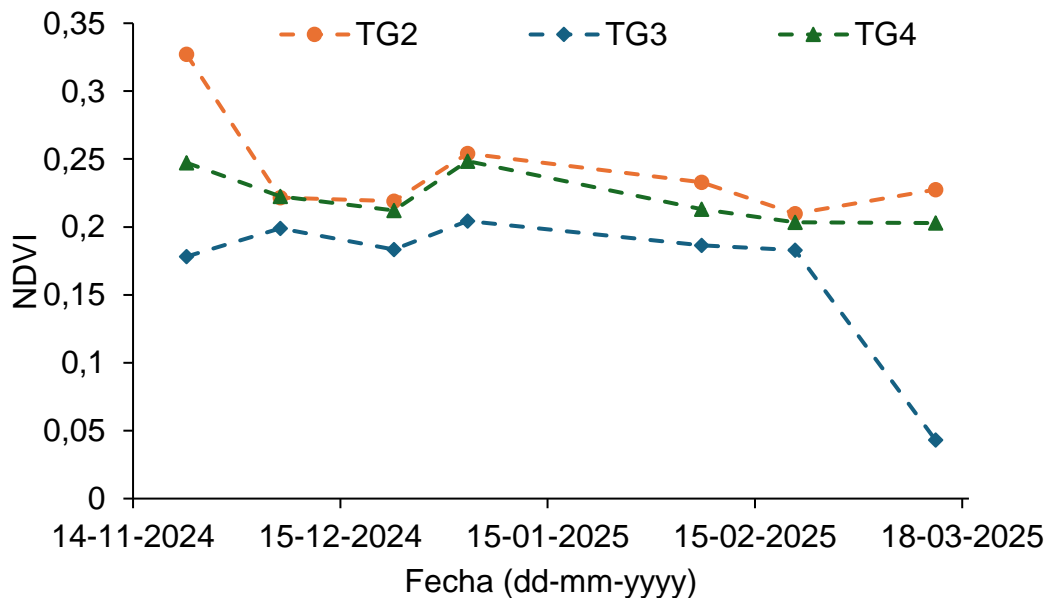


Figura 26. Variación temporal del valor promedio del índice NDVI en el sitio TG bajo los tratamientos de manejo (TG2, TG3 y TG4) durante la temporada 2024-2025.

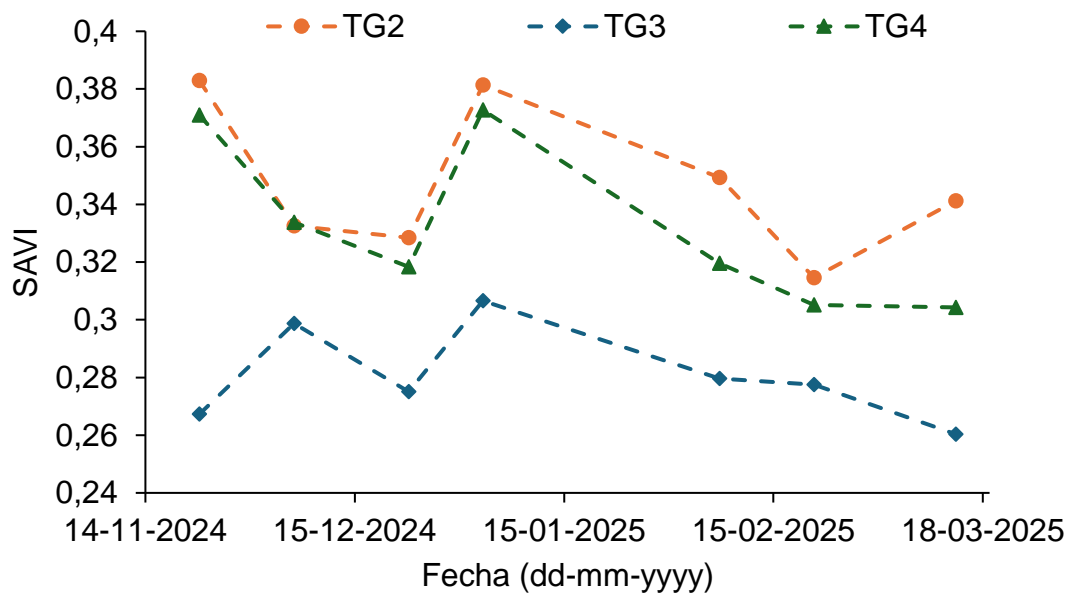


Figura 27. Variación temporal del valor promedio del índice SAVI en el sitio TG bajo los tratamientos de manejo (TG2, TG3 y TG4) durante la temporada 2024-2025.

En la Figura 27, se muestra el comportamiento del índice SAVI durante la temporada 2024-25 con una tendencia similar a la observada en el índice NDVI, aunque con mayor sensibilidad a las variaciones entre tratamientos. El tratamiento TG2 mantuvo consistentemente los valores más altos (0,38), indicando una mejor cobertura vegetal y menor influencia del fondo del suelo. TG3, en cambio, presentó los valores más bajos, lo que podría estar relacionado con un menor desarrollo del dosel o diferencias en las condiciones de manejo. En general, el SAVI evidencia una estabilidad moderada en TG4 y una mayor respuesta en TG2, lo que respalda su utilidad para evaluar cultivos hilerados o con cobertura parcial del suelo.

Se observa en la Figura 28, diferencias consistentes en el comportamiento temporal del GNDVI en los tratamientos de manejo (TG2, TG3 y TG4).

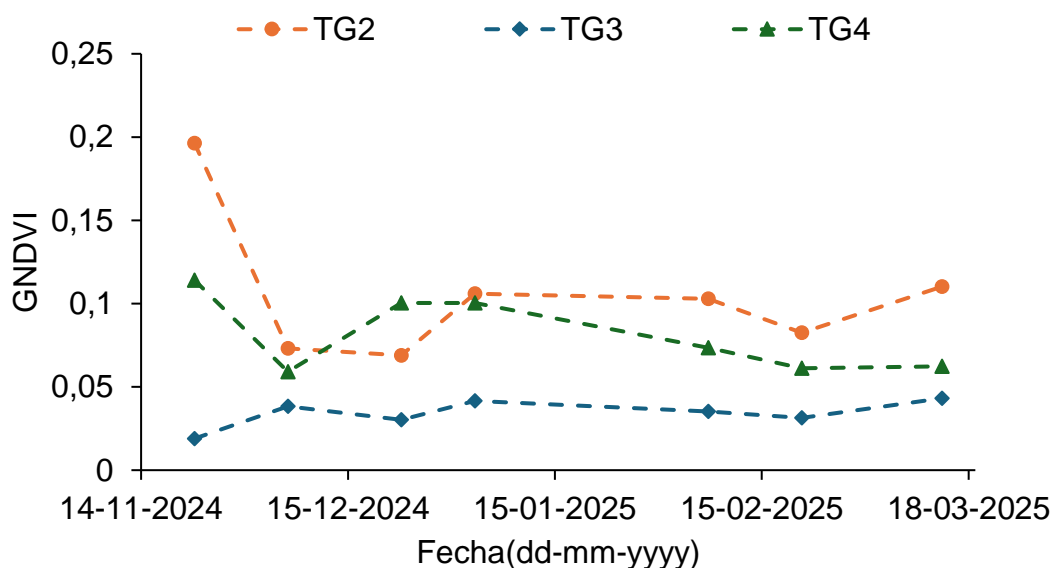


Figura 28. Variación temporal del valor promedio del índice GNDVI en el sitio TG bajo los tratamientos de manejo (TG2, TG3 y TG4) durante la temporada 2024-2025.

En general (Figura 28), los valores oscilaron entre 0,03 y 0,22, con valores relativamente similares para el tratamiento TG2 con respecto al TG4, y superior al TG3. El TG2 mantuvo los niveles más altos durante la mayor parte del periodo evaluado, indicando una mayor concentración de clorofila. En contraste, TG3 presento los valores más bajos. Finalmente, TG4 mostró un comportamiento intermedio y relativamente estable. Estos resultados evidencian la capacidad del GNDVI para detectar posibles variaciones en el contenido de la clorofila del dosel, complementando la información obtenida con NDVI y SAVI.

## **5.6. Análisis de área humedecida y producción.**

- **Microaspersión**

Para el análisis de producción y área humedecida se realizaron mediciones en fechas específicas del periodo de estudio al área humedecida de los diferentes tratamientos. Y se analizó por sitio la producción de la temporada 2024-25.

En la Figura 29, se muestran los resultados permitiendo establecer que la mayor producción se obtuvo en el tratamiento TMA20 (32,04 ton ha<sup>-1</sup>), mientras que los tratamientos TMA10, TMA30, TMA40, alcanzaron rendimiento de 24,1, 17,9 y 19,6 ton ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, dado que es el primer año de estudio se puede ver que existe una gran variación en las muestras obtenidas. Se espera evaluar estos resultados en las siguientes temporadas, considerando que es el cuarto año de producción del huerto en estudio, donde los frutales se consideran en una etapa adulta y su producción se comienza a mantener constante durante las temporadas próxima.

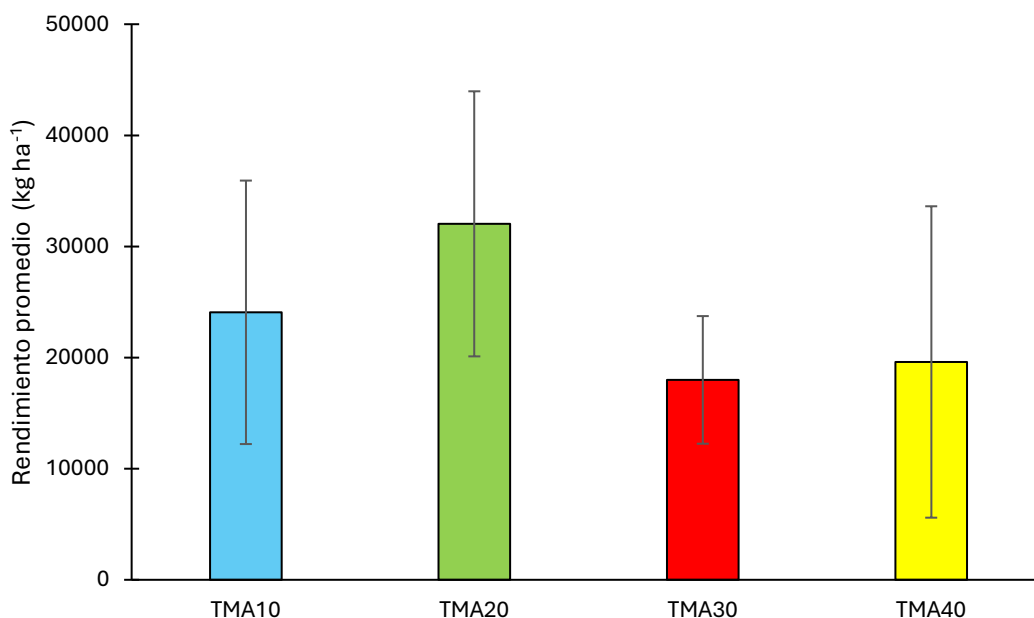


Figura 29. Rendimiento de los tratamientos de microaspersión invertidos a diferentes alturas de elevación del suelo.

Con respecto al área humedecida se analizó la dispersión de los datos del radio de alcance y se observó variación asociada a la altura del emisor.

Se observaron diferencias en el radio de humedecimiento del bulbo húmedo entre los tratamientos.

El tratamiento TMA40 correspondiente a una altura de instalación de 40 cm, presento mayor radio, mientras que el tratamiento TMA10, presento los valores más bajos.

Tabla 10. Rendimientos promedio y área humedecida promedio de los tratamientos de microaspersión

Tratamiento	Rendimiento promedio (kg ha <sup>-1</sup> )	Desviación estándar (kg ha <sup>-1</sup> )	Radio promedio (m)	Desviación estándar (m)	Área Humedecida (m <sup>2</sup> )
TMA10	24.072	11.855	0,87	0,14	2,29
TMA20	32.035	11.927	1,16	0,03	4,23
TMA30	17.991	5.742	1,25	0,22	4,68
TMA40	19.603	14.012	1,45	0,14	7,20

- **Goteo**

La Figura 30, muestra el rendimiento promedio que se obtuvo (kg ha<sup>-1</sup>) de los tratamientos de riego por goteo con diferente número de laterales por hilera (TG2, TG3, TG4) en la temporada 2024/25.

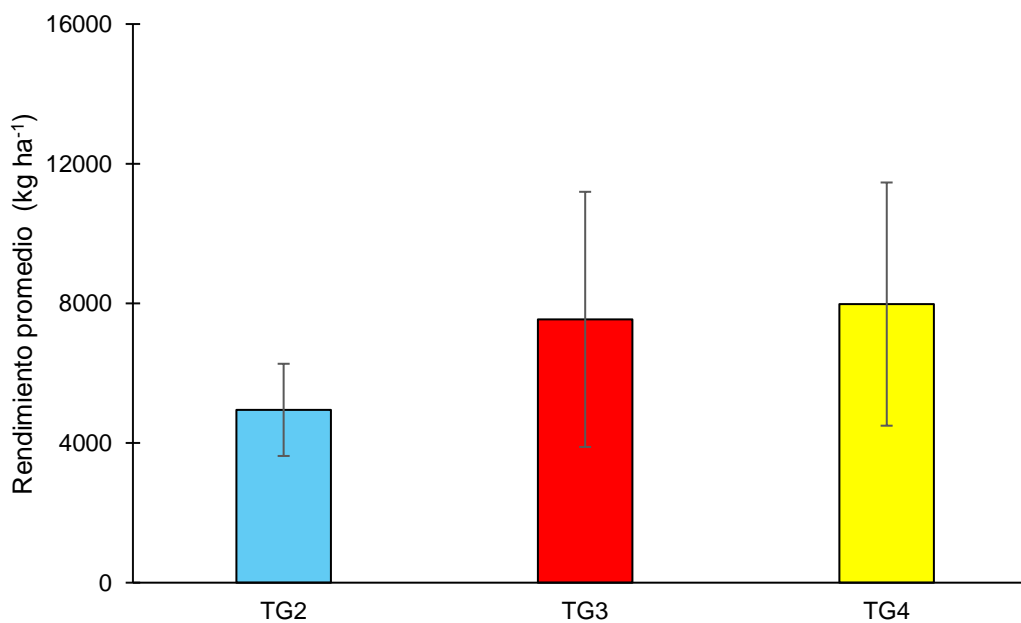


Figura 30. Rendimiento de los tratamientos de Goteo diferentes números de laterales por hilera.

En la figura 30, se observa que existió un aumento en el rendimiento promedio al aumentar el número de laterales. Cabe mencionar que los promedios son más bajos que los tratamientos a los del sitio de microaspersión (TMA), asociado a la edad del huerto y a una variedad diferente. En general huertos adultos tienen una producción de 5.000 y 15.000 kg ha<sup>-1</sup> (Espinoza, 2024).

Tabla 11. Rendimientos promedio de los tratamientos de goteo

Tratamiento	Promedio Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Desviación Estándar (kg ha <sup>-1</sup> )
TG2	4949	1320
TG3	7541	3654
TG4	7979	3483

Respecto a los tratamientos, el rendimiento promedio más bajo se registró en TG2, con 4.95 t ha<sup>-1</sup>, mientras que TG3 y TG4 alcanzaron 7.54 t ha<sup>-1</sup> y 7.98 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. La diferencia entre TG3 y TG4 es mínima, lo que indica un comportamiento productivo similar entre ambos tratamientos, posiblemente asociado a área humedecida y condiciones de manejo de riego. Cabe destacar que el tratamiento TG4 tiene un lateral más por hilera que el TG3, lo que implica un mayor costo de instalación y operación del sistema. Por ello, aunque el TG4 presenta una leve diferencia en el rendimiento, su relación costo-beneficio podría ser menos favorable en comparación con el tratamiento TG3.

Tabla 12. Área humedecida según los aforos realizados en antes y después de cosecha.

Tratamiento	Mes	Área Humedecimiento (m <sup>2</sup> )	Desviación Estándar (m <sup>2</sup> )
TG2	Noviembre	2,22	0.39
TG3	Noviembre	2,38	0.23
TG4	Noviembre	2,41	0.12
TG2	Enero	1,83	0.63
TG3	Enero	2,39	0.19
TG4	Enero	2,27	0.85

Con respecto a los tratamientos de gotero (Tabla 12), se realizó de manera frecuente una evaluación del caudal emisor, por los problemas de presión que ocurrieron en el sistema de riego. Se obtuvo una disminución de caudal y según lo analizado con la disminución del bulbo húmedo salió afectado de la misma manera (Karmeli, 1985).

## 6. CONCLUSIONES

La elevada pedregosidad observada en los sitios TMA y TG (>40%) redujo significativamente la capacidad de retención de agua del suelo, con disminuciones hasta un 65% del volumen disponible para las raíces. En sitio TG2 y TG4, con pedregosidad altas (>60%), condiciono directamente la frecuencia y duración de los riegos generando hasta 2 riegos al día para evitar déficits hídricos o percolación profunda. Los tratamientos con menor pedregosidad (TMA y TG3) mantuvieron una mejor estabilidad hídrica y permitieron riegos más eficientes, demostrando la necesidad de considerar la fracción pedregosa como factor determinante en el manejo de sistemas de microrriego.

En microaspersión, las alturas intermedias de instalación del emisor (20 y 30 cm) lograron las mejores relaciones entre el área humedecida y rendimiento promedio alcanzando hasta 32 t ha<sup>-1</sup> (TMA20), mientras que alturas de 10 y 40 cm generaron zonas de humedecimiento que afectaron la producción seguramente asociada a que en el primer caso hubo una menor extracción y en el segundo una mayor evaporación y humedecer una zona con menor cantidad de raíces extractante. En goteo, el tratamiento TG3 mostro una distribución más homogénea del agua en el perfil y un rendimiento promedio 7,5 t ha<sup>-1</sup>, sin diferencias notorias con TG4. Esto sugiere que para esta temporada el implementar 4 laterales por hilera no se tradujo en mayores

rendimientos que 3 laterales por hilera, y que pareciera recomendable ser mejor con configuraciones intermedias dado el sistema hidráulico.

Los índices NDVI SAVI y GNDVI mostraron variaciones temporales consistentes con las etapas fenológicas del cultivo y con los tratamientos de riego. En el sitio TMA, los valores más altos de NDVI y SAVI se registraron en TMA20 y TMA30, coincidiendo con mayor contenido de humedad en el suelo. En el sitio TG, el tratamiento TG2 presentó los valores más alto de GNDVI, reflejando mejor actividad fotosintética. Estos resultados validan el uso de imágenes multiespectrales como herramienta complementaria para evaluar la respuesta del cultivo al manejo del riego y para detectar heterogeneidades espaciales de vigor.

## 7. REFERENCIAS

- Allen, R. G.-L.-D.-M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Logan, Utah, EE.UU - Lisboa, Portugal - Leuven, Bélgica - FAO.
- Barros, F., Rodriguez, J., & Ivelic, M. (20 de Enero de 2021). *Mundo Agro*. Obtenido de Mundo Agro: [https://mundoagro.cl/principales-variedades-de-cerezas-su-comportamiento-durante-la-postcosecha/#:~:text=Y%20DE%20POSCOSECHA-,LAPINS,dad%20\(Fuente%3A%20FDF\)](https://mundoagro.cl/principales-variedades-de-cerezas-su-comportamiento-durante-la-postcosecha/#:~:text=Y%20DE%20POSCOSECHA-,LAPINS,dad%20(Fuente%3A%20FDF)).
- Ben-Gel, A., Lazorovitch, N., & Shani, U. (2004). Subsurface Drip Irrigation in Gravel-Filled Cavities. *Vadose Zone Journal*, 3, 1407-1413. doi:<https://doi.org/10.2136/vzj2004.1407>
- Biblioteca del Congreso Nacional . (s.f.). *Clima y vegetación Región del Maule*. Obtenido de *Clima y vegetación Región del Maule*: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region7/clima.htm>
- Cazanga Solar, R., & Leiva Madrid, C. (2013). *Antecedentes técnicos y económicos para la producción del cerezo en la región del maule*. Obtenido de Ciren: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/2d622e94-5c35-4e81-b52e-4e90e0819987/content>
- Chacon Cruz, G. (2019). *Descripción y uso de la Red Agrometeorología INIA*. Santiago, Chile: Boletín INIA N°415. INIA. Obtenido de INIA.

- Cuenca, S. (2019). Determinación de la potencia hídrica foliar, mediante la aplicación de técnicas de teledetección bajo análisis de índices de vegetación, proporcionados por un sensor multispectral ubicado en un dron. Proyecto de título, Ingeniero Electrónico. Neiva, Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería.
- Earth Observing System Data Analytics. (07 de 07 de 2025). *EOS DATA ANALYTICS*. Recuperado el 14 de 10 de 2025, de NDVI: Cómo Funciona El Índice Y Uso En La Agricultura: <https://eos.com/es/blog/indice-de-vegetacion-de-diferencia-normalizada-o-ndvi/#ref-anchor-3>
- Erick, R. (2022). *Análisis del manejo de riego en avellanos europeos (CORYLUS AVELLANA L.) Temporada 2021-2022*. Chillán, Chile: Proyecto de título, Ing. Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Espinoza, C. (11 de Octubre de 2024). La temporada de cerezas chilenas enfrenta desafíos en rendimiento y moscas de la fruta. *Fresh Fruit Portal*.
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecino, A., Sepulveda, H., & Veloso-Águila, D. (2020). La megasequía de Chile Central (2010-2018): Una perspectiva desde la dinámica climática. *Int J Climatol*, 40, 421-439. doi:<https://doi.org/10.1002/joc.6219>

- Gómez, F. (2021). Propuesta de investigación: Ecuación de Richards en coordenadas esferoidales alargadas, para la descripción del bulbo húmedo en el riego por goteo. Chillán, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Hargraves , G., & Samani, Z. (1982). Estimating Potencial Evapotranspiration . *Journal of the Irrigation and Drainage Division* .
- Holzapfel, E. A. (2024). Evaluacion de sistemas de Microrriego., (págs. 8-10).
- Holzapfel , E., Orrego , X., Jara, J., Salgado, L., & Souto, C. (2021). *Manual Riego y Drenaje en frutales* . CRHIAM. Obtenido de CRHIAM: <https://www.crhiam.cl/wp-content/uploads/2021/12/Riego-y-Drenaje-en-Frutales-26-julio-2024.pdf>
- Holzapfel, E., Hepp, R., & Mariño, M. (2004). Effect of irrigation on fruit production in blueberry. *Agricultural Water Management*, 173-184.
- Holzapfel, E., Lopez, C., Joublan , J., & Matta, R. (2001). EFECTO DEL AGUA Y FERTIRRIGACIÓN EN EL DESARROLLO Y PRODUCCIÓN DE NARANJOS CV. THOMSON NAVEL. *Agricultura Técnica* 61 (1), 51-60. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072001000100006>
- Holzapfel, J. E., & Holzapfel, E. A. (2014). Diagnóstico general de los sistemas de reigo. *Revista fruticola* 35(1), págs. 24 - 30.
- Huete, A. R. (1988). A soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Arizona 85721: Department of Soil and Water Science, University of Arizona.
- INIA. (2009 - 2023). *Agrometeorología* . Obtenido de Agrometeorología - Red Agrometeorológica de INIA : <https://agrometeorologia.cl/#>

- Karmeli, D. (1985). Irrigation systems: desing and a operation. En D. Karmeli, & G. P. M.Todes., *Irrigation systems: desing and a operation*. (págs. 20-42). South Africa.: Oxford University Press. Cape Town,.
- Lecaros, F. A., Holzapfel, E., Jara, J., & Rivera, D. (2018). Tesis para optar al grado de magister en ingenieria Agrícola con mención en Recursos Hidricos: Efecto del área de humedecimiento con diferente número de laterales por hilera bajo riego por goteo en la producción de manzanos. Chillán , Chile : Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola.
- NDVI: Cómo Funciona El Índice Y Uso En La Agricultura. (2025).
- Sandoval E., M., F., J. D., S., O. S., B., J. C., & S., D. R. (2012). *Métodos de análisis físicos de suelo. Publicaciones Departamento de Suelo y Recursos Naturales*. chillan, Chile, número 5, 80 p .
- Santibañez Q., F. (2017). *Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule*. Santiago. Obtenido de Santiago: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/62376>
- Sotomayor, K. (2022). EFECTO DEL AREA HUMEDECIDA EN MICRO-RIEGO EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PRODUCCIÓN. *PROYECTO DE TÍTULO*.
- ViLab. (17 de Diciembre de 2023). *ViLAB*. Obtenido de ViLAB: <https://www.vilab.cl/p/usos-ndvi>
- Villagrán, M. M. (28 de Diciembre de 2025). *Boletín de fruta, Diciembre 2025*. Obtenido de ODEPA: <https://opia.fia.cl/601/w3-article-128696.html>

Viveros copequen. (s.f.). *SmartCherry*. Obtenido de SmartCherry:  
<https://smartcherry.cl/servicios-productos/colt/>

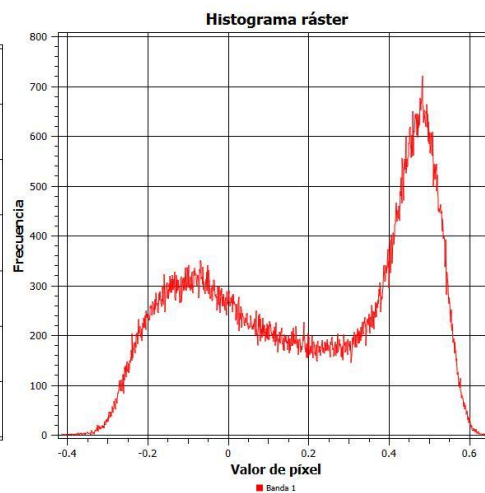
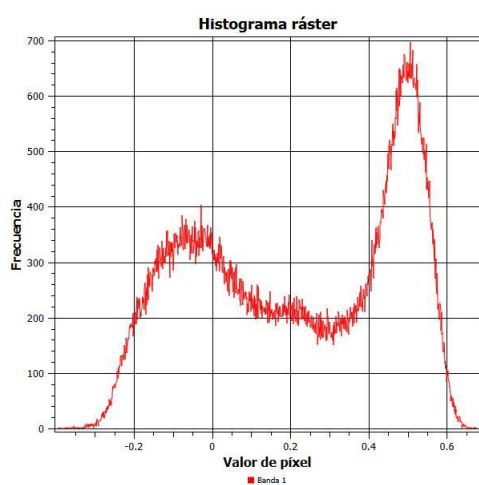
Wu, X. M. (2021). Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of Inner Mongolia, China. *Soil and Water Research*, 16(3), 151-163. doi:doi:10.17221/107/2020-SWR

## 8. ANEXO

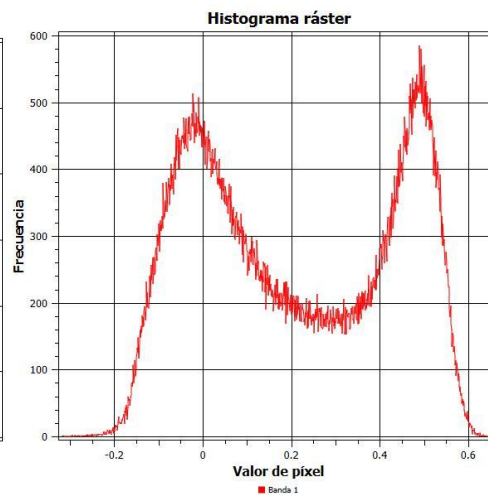
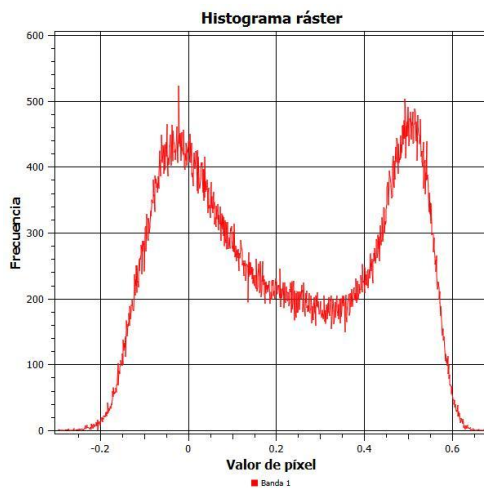
### HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DEL INDICE (NDVI) DURANTE LA TEMPORADA

#### I. ANTES DE COSECHA

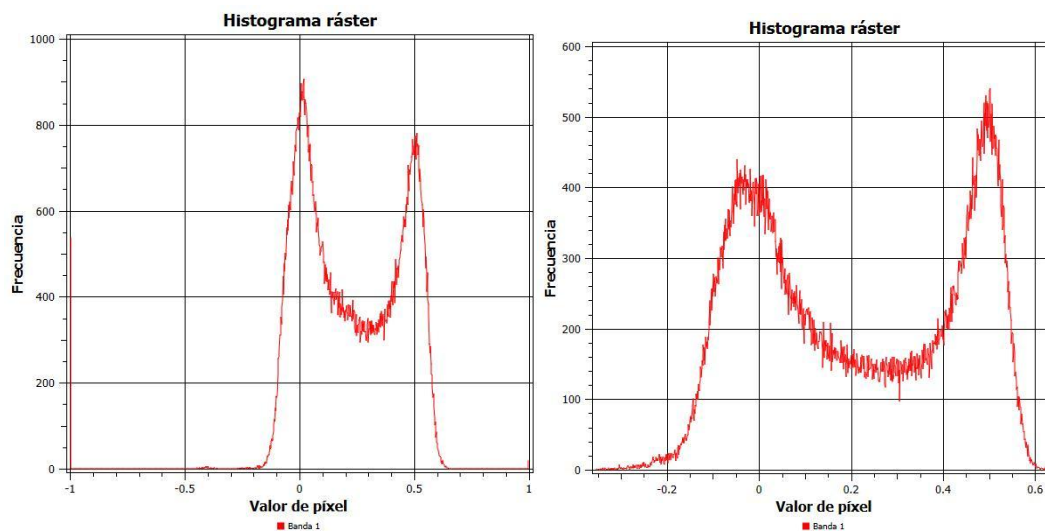
Comportamiento sitio TMA, fecha 22-11-24 y 06-12-24 (antes de cosecha).



Comportamiento sitio TG3, fecha 22-11-24 y 06-12-24.

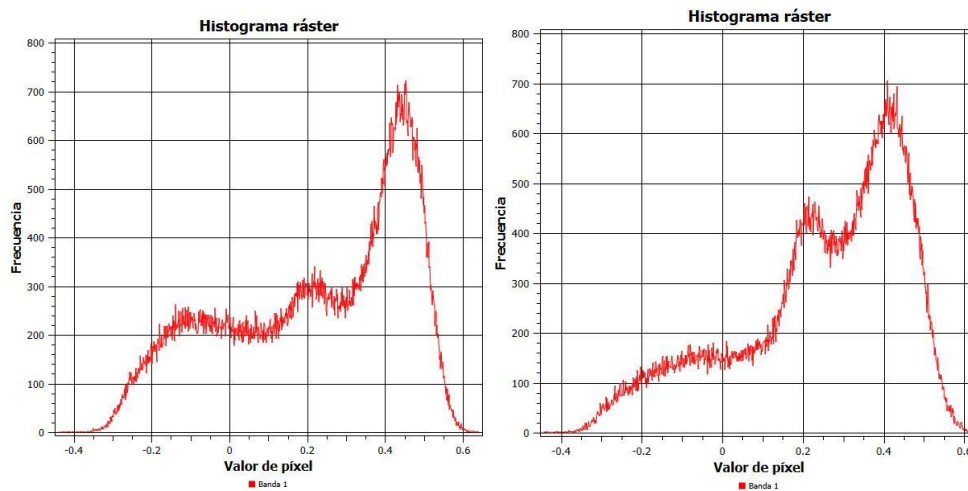


Comportamiento sitio TG2 y TG4, fecha 22-11-24 y 06-12-24.

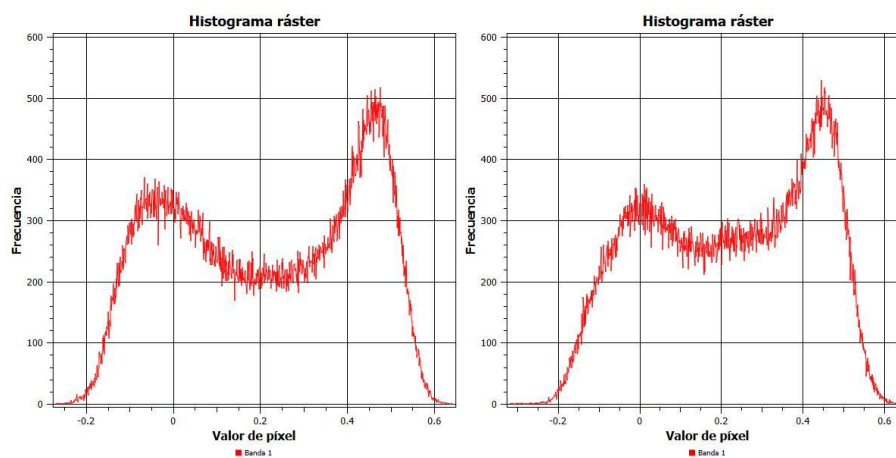


## II. DURANTE DE COSECHA

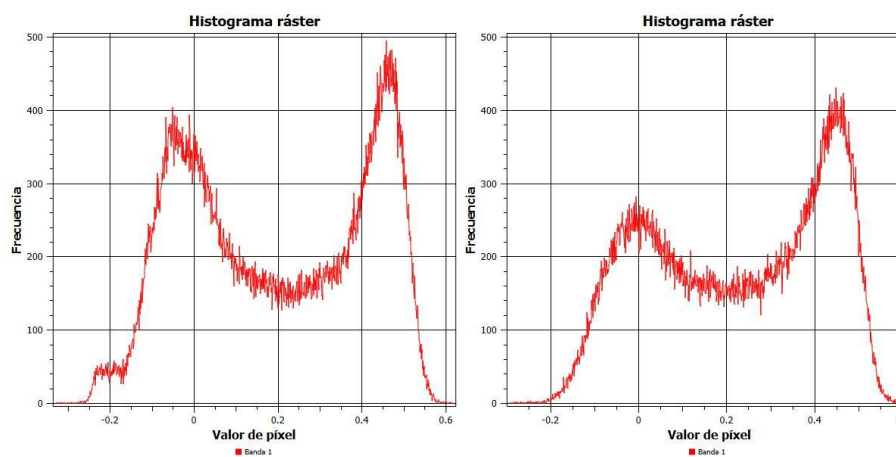
Comportamiento sitio TMA, fecha 23-12-24 y 03-01-25.



Comportamiento sitio TG3, fecha 23-12-24 y 03-01-25.

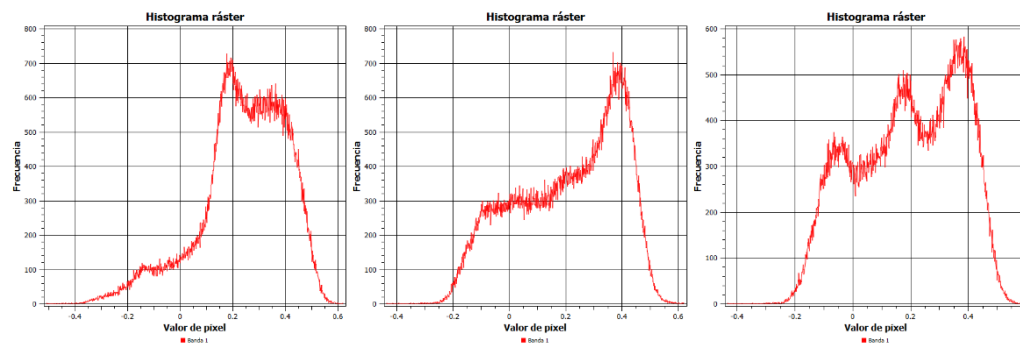


Comportamiento sitio TG2 y TG4, fecha 23-12-24 y 03-01-25.

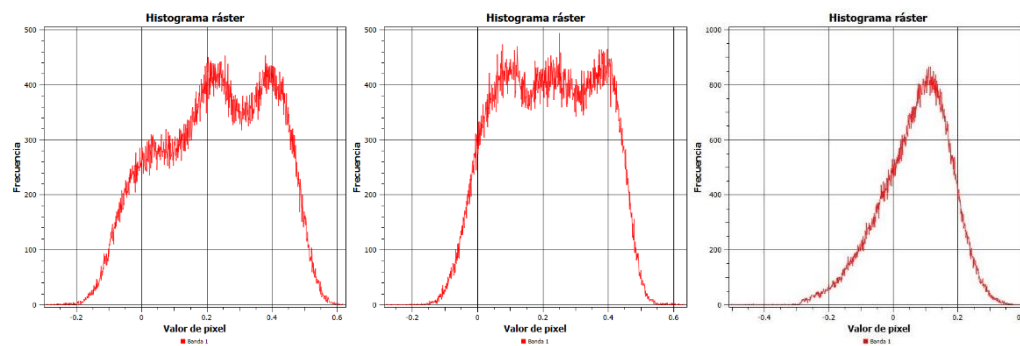


### III. DESPUES DE COSECHA

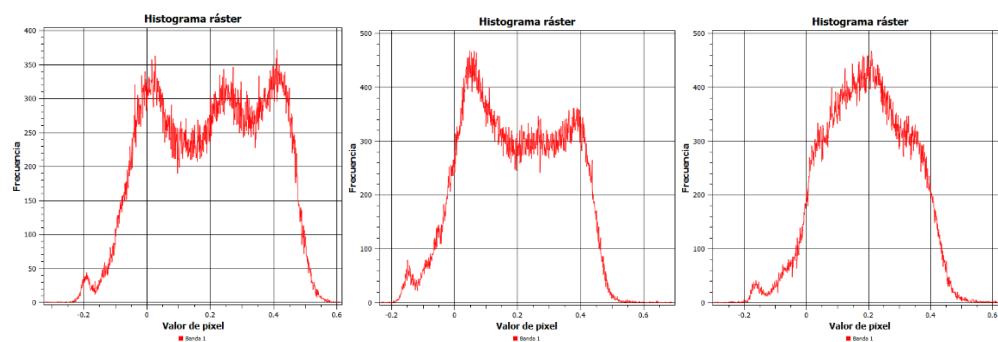
Comportamiento sitio TMA, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25



Comportamiento sitio TG3, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25.



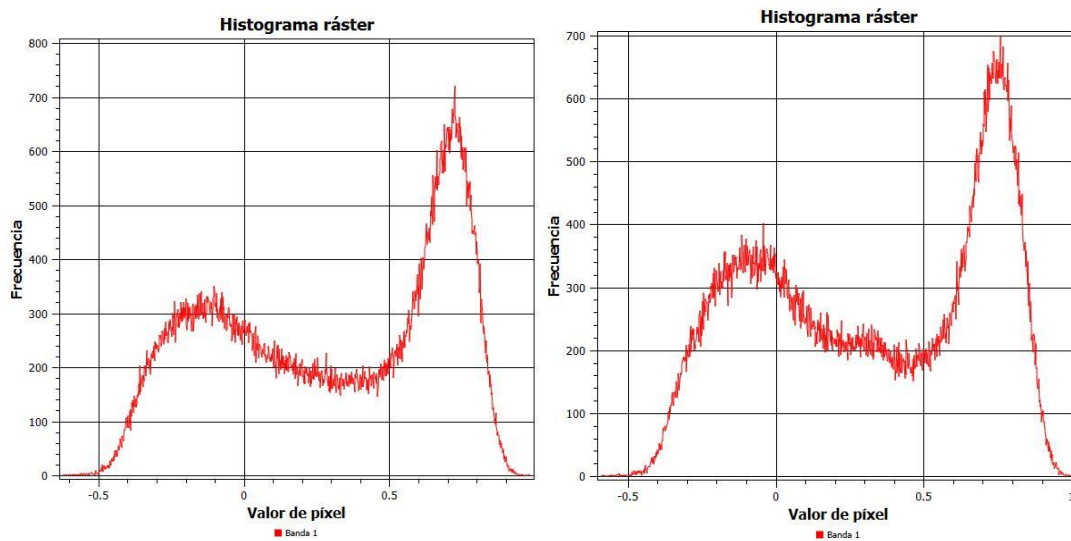
Comportamiento sitio T2 y TG4, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25



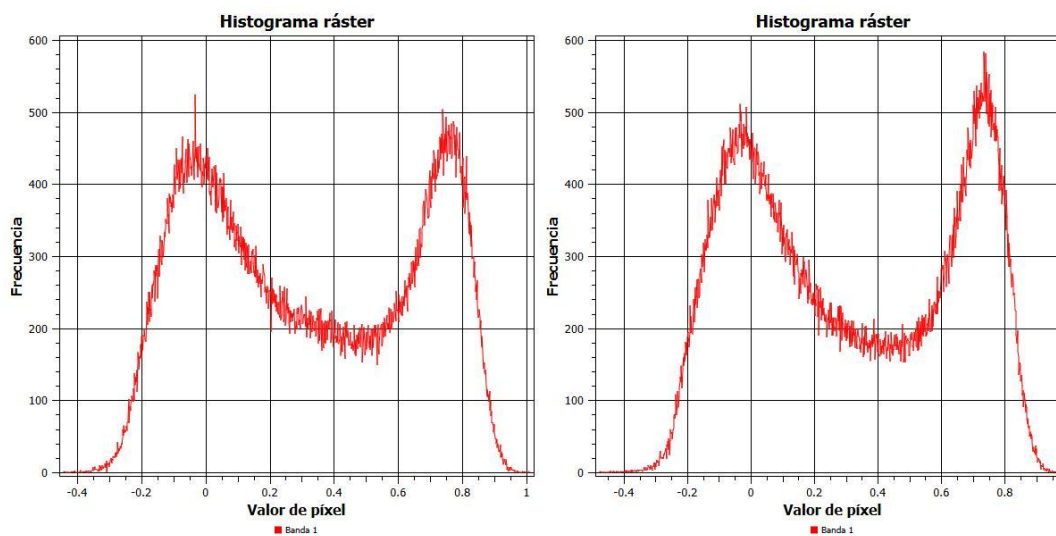
## HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DEL INDICE (SAVI) DURANTE LA TEMPORADA

### I. ANTES DE COSECHA

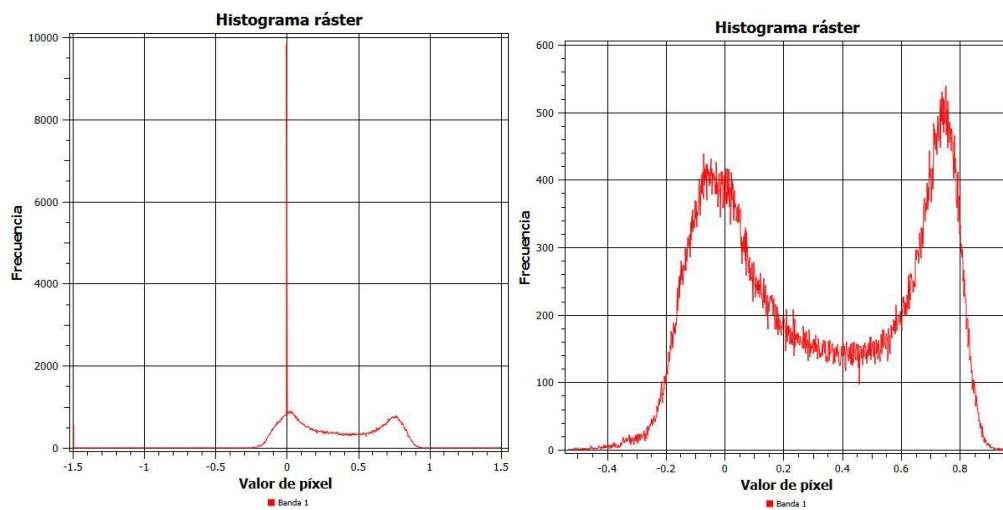
Comportamiento sitio TMA, fecha 22-11-24 y 06-12-24 (antes de cosecha).



comportamiento sitio TG3, fecha 22-11-24 y 06-12-24.

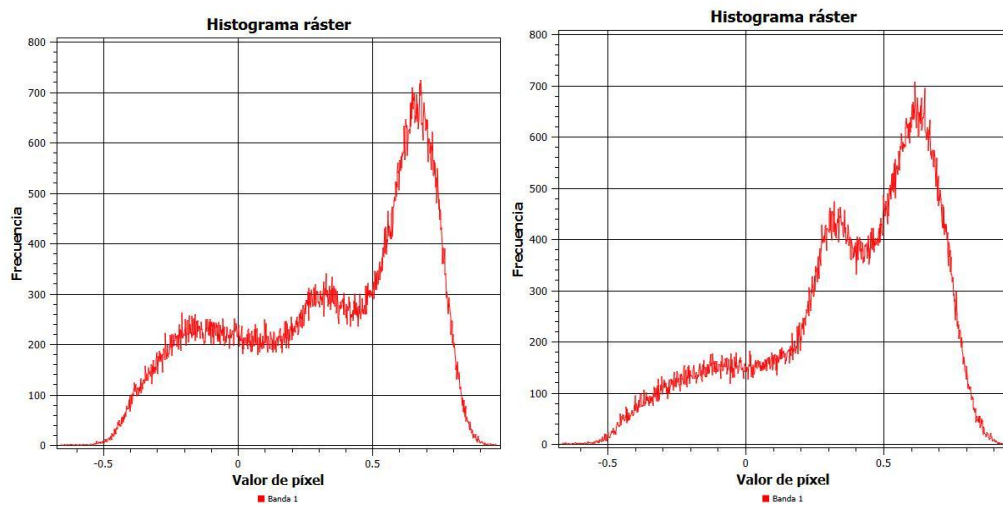


Comportamiento sitio TG2 y TG4, fecha 22-11-24 y 06-12-24.

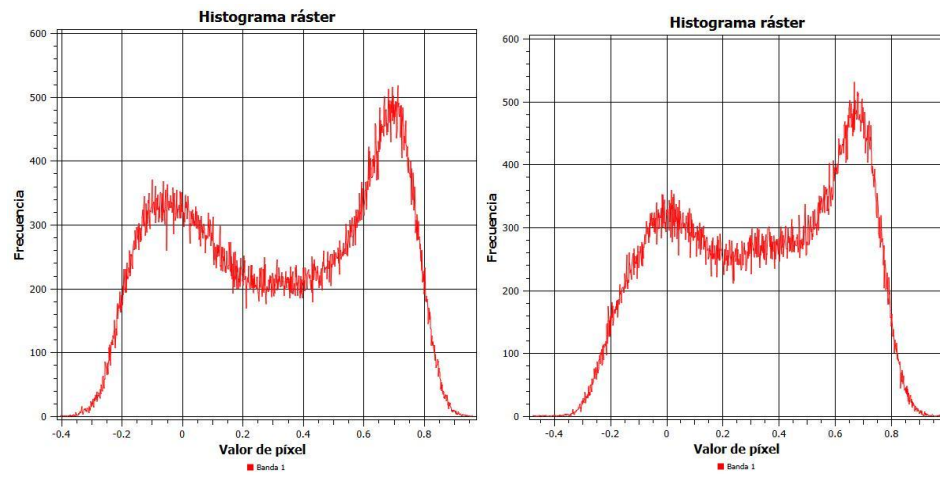


## II. DURANTE DE COSECHA

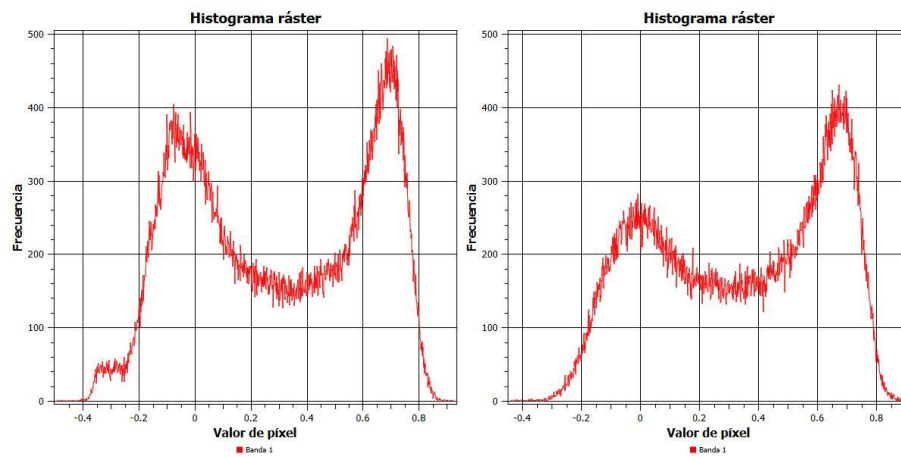
Comportamiento sitio TMA, fecha 23-12-24 y 03-01-25.



Comportamiento sitio TG3, fecha 23-12-24 y 03-01-25.

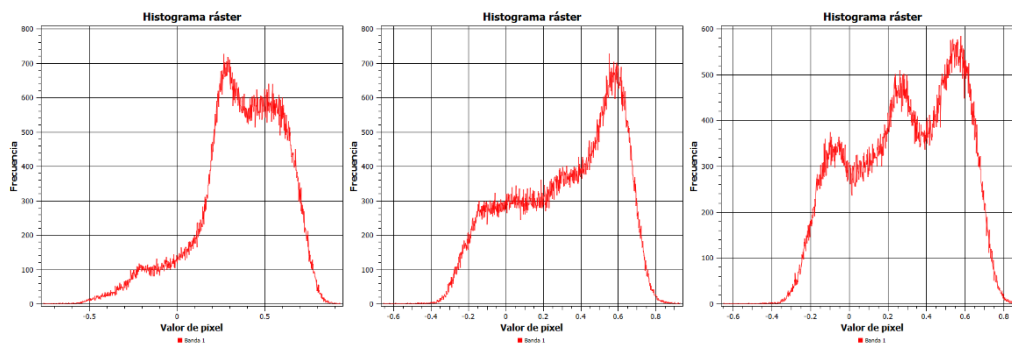


Comportamiento sitio TG2 y TG4, fecha 23-12-24 y 03-01-25.

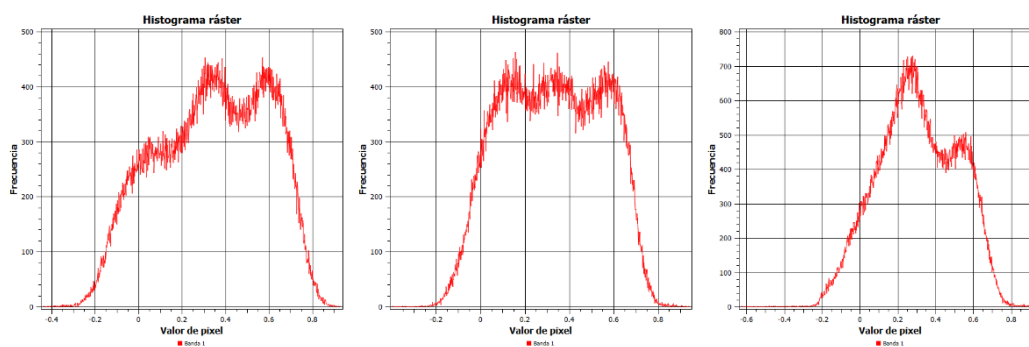


### III. DESPUES DE COSECHA

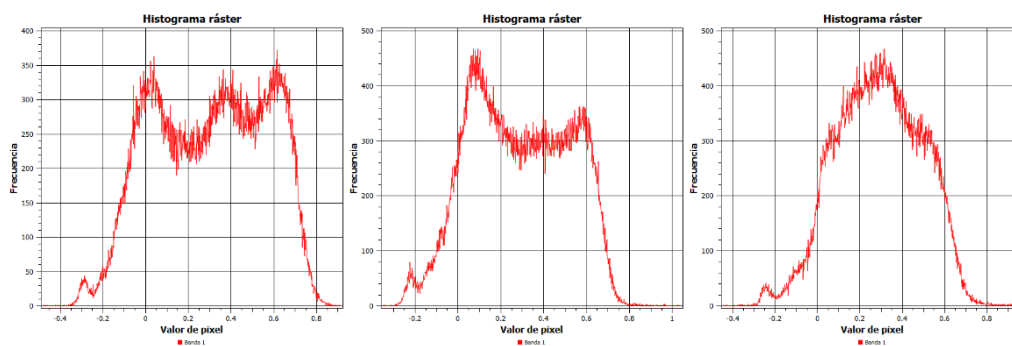
Comportamiento sitio TMA, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25.



Comportamiento sitio TG3, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25.



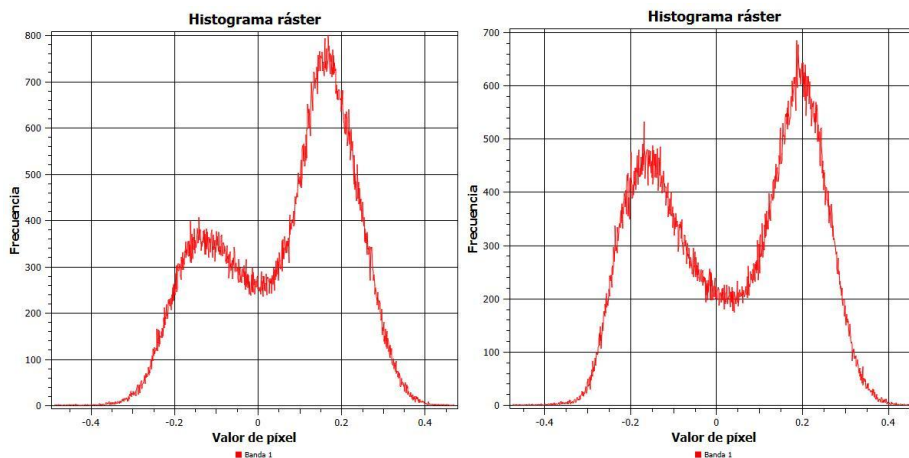
Comportamiento sitio T2 y TG4, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25.



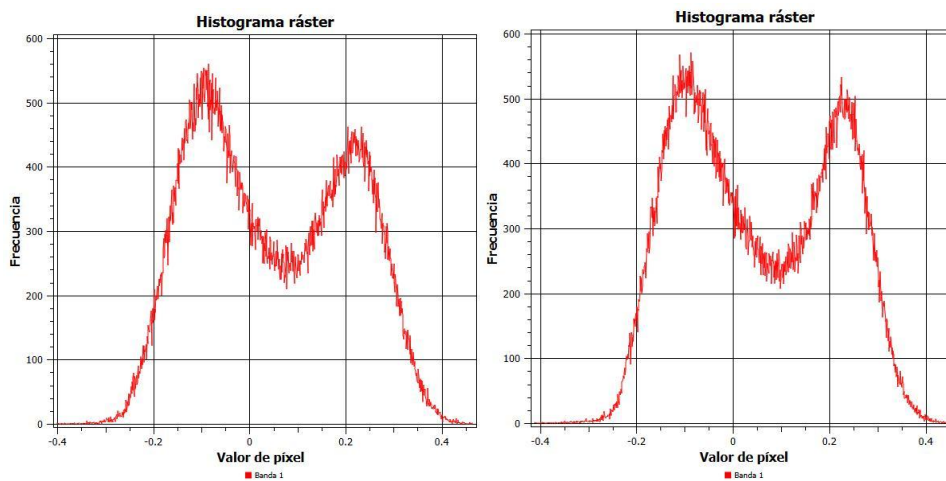
## HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE LA TEMPORADA (GNDVI)

### I. ANTES DE COSECHA

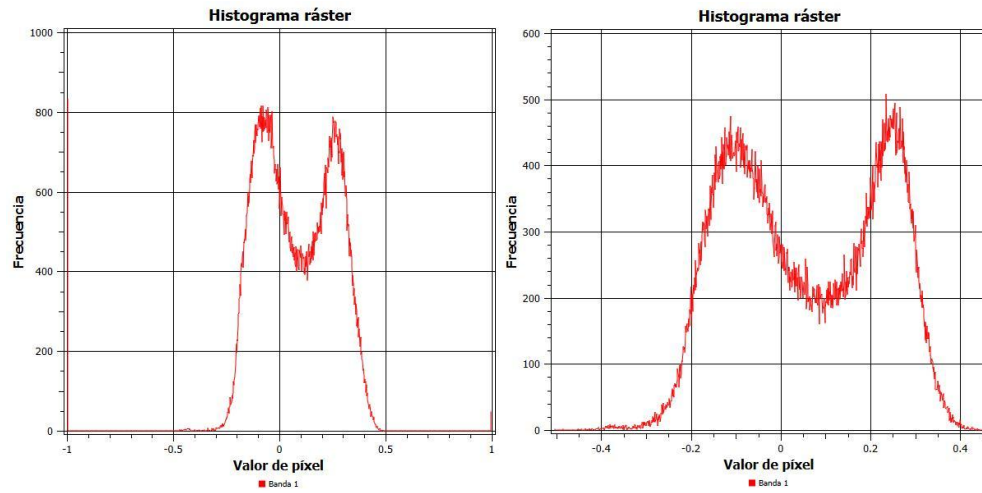
Comportamiento sitio TMA, fecha 22-11-24 y 06-12-24



Comportamiento sitio TG3, fecha 22-11-24 y 06-12-24.

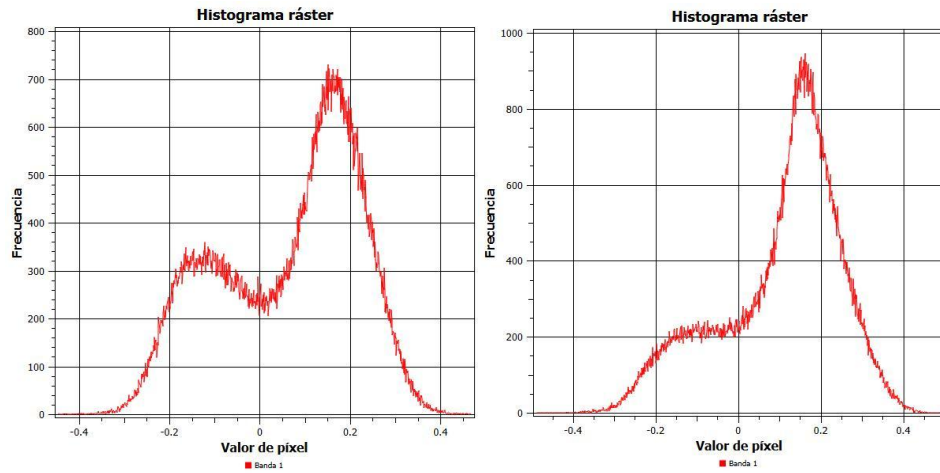


Comportamiento sitio TG2 y TG4, fecha 22-11-24 y 06-12-24.

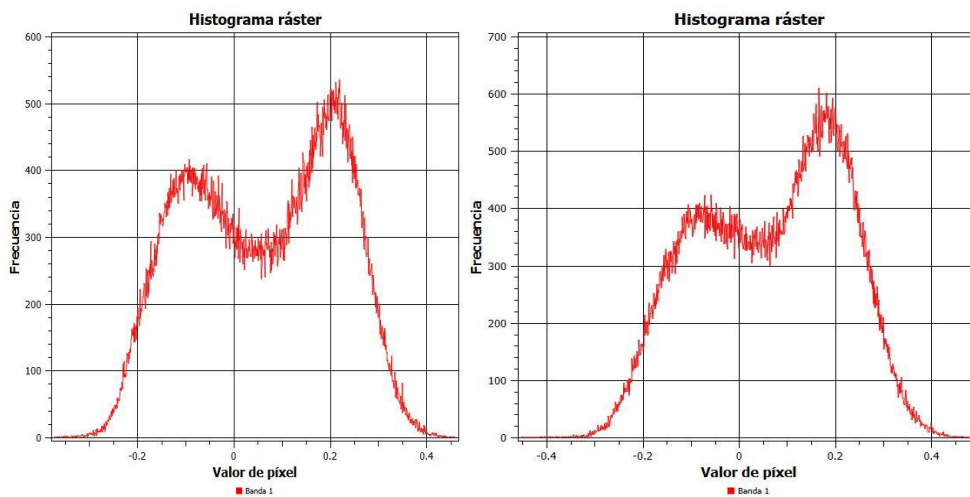


## II. DURANTE DE COSECHA

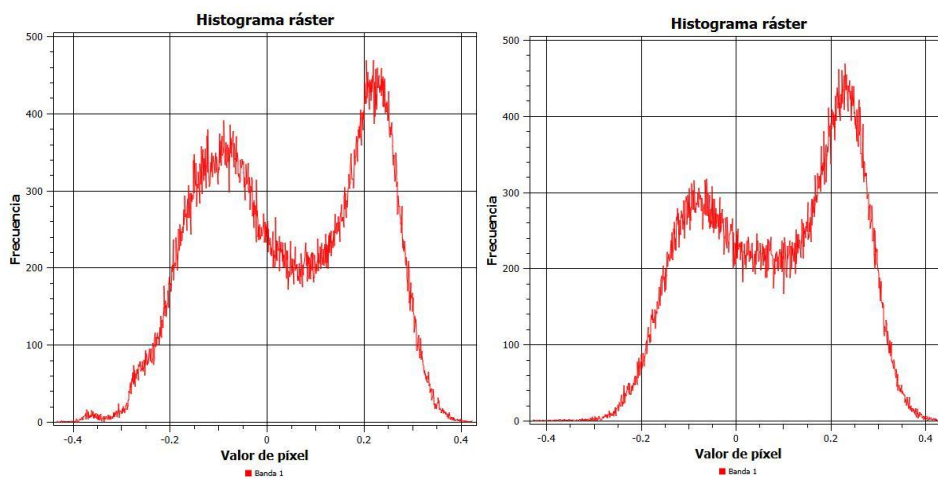
Comportamiento sitio TMA, fecha 23-12-24 y 03-01-25.



Comportamiento sitio TG3, fecha 23-12-24 y 03-01-25.

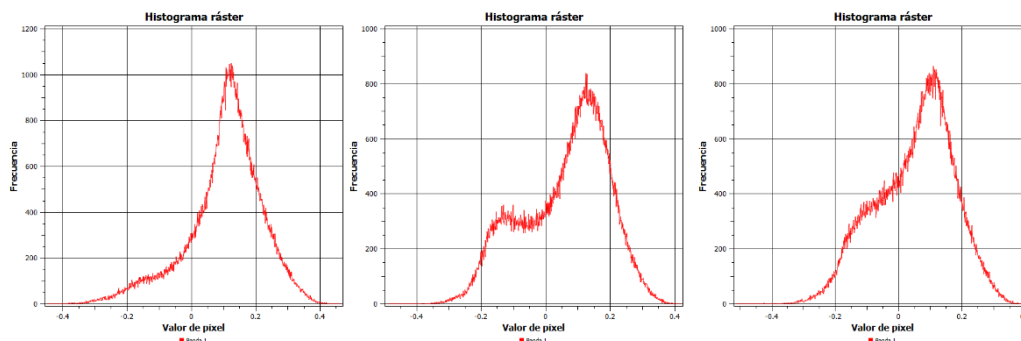


Comportamiento sitio TG2 y TG4, fecha 23-12-24 y 03-01-25.

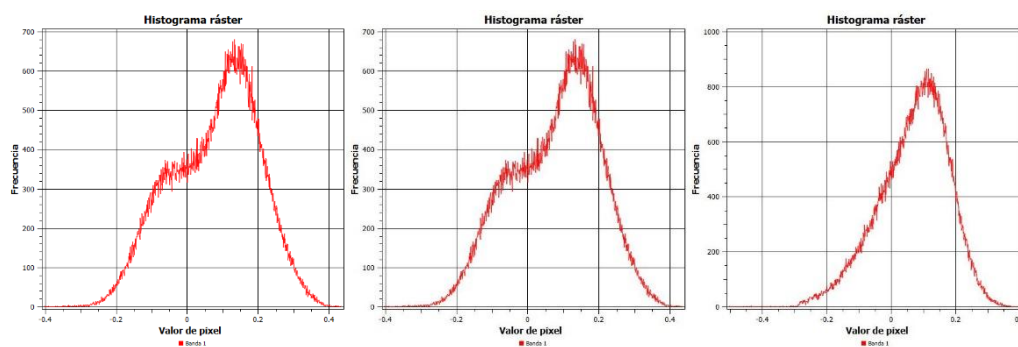


### III. DESPUES DE COSECHA

Comportamiento sitio TMA, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25.



Comportamiento sitio TG3, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25.



Comportamiento sitio T2 y TG4, fecha 07-02-25, 21-02-25 y 14-03-25.

