



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**Modelamiento tridimensional del volumen del dosel mediante un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de bajo costo en un huerto intensivo de avellano europeo (*Corylus avellana* L.).**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**MARIO ANDRÉS CONTRERAS ARIAS**

**TALCA-CHILE  
2022**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2022



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**Modelamiento tridimensional del volumen del dosel mediante un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de bajo costo en un huerto intensivo de avellano europeo (*Corylus avellana* L.).**

**Por**

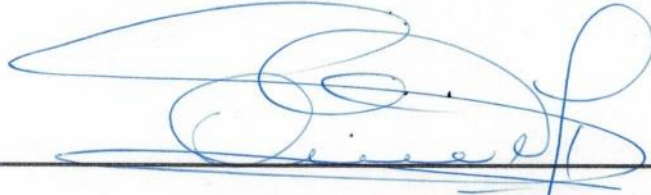
**MARIO ANDRÉS CONTRERAS ARIAS**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**Presentada a la  
Universidad de Talca como  
Parte de los requisitos para optar al título de  
INGENIERO AGRÓNOMO**

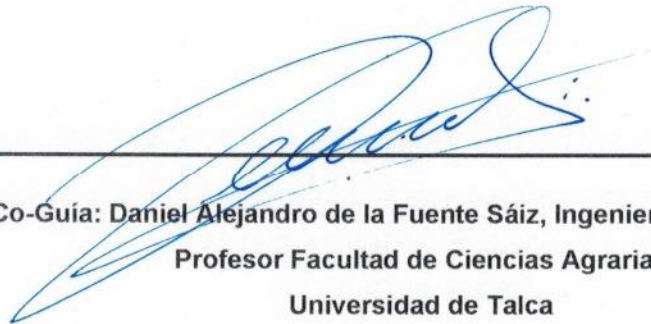
**TALCA-2022**

**APROBACIÓN:**



---

**Profesor Guía: Samuel Orlando Ortega Farías, Ingeniero agrónomo, MSc, PhD.  
Profesor Facultad de Ciencias Agrarias  
Universidad de Talca**



---

**Profesor Co-Guía: Daniel Alejandro de la Fuente Sáiz, Ingeniero agrónomo, MSc, Dr.(c).  
Profesor Facultad de Ciencias Agrarias  
Universidad de Talca**

**Fecha de presentación de la Defensa de Memoria 13 de mayo del 2022**

## RESUMEN

En esta memoria de título, se presenta la estimación de la arquitectura del dosel mediante modelamiento 3D de las temporadas 2019-2020 y 2020-2021 en un huerto intensivo de avellano europeo (*Corylus avellana* L.). El objetivo fue describir el modelamiento 3D en base a imagen RGB tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de bajo costo y su posterior procesamiento en el software Pix4D. El uso de VANT puede estimar el volumen del cultivo de avellano y por tanto ser una opción económica y rápida de estimar este parámetro. Los resultados indicaron que en la temporada 2019-2020 se obtuvieron estimaciones ajustadas a la curva de crecimiento foliar y posterior defoliación del avellano. Sin embargo, en la temporada 2020-2021 existió una tendencia de valores muy irregulares en la estimación del volumen debido a que no existió poda invernal provocando una mayor irregularidad en la arquitectura del dosel. Los resultados muestran que, sí se puede lograr una correcta estimación del volumen del dosel, pero factores como un mal manejo del huerto en cuanto a poda afecta de forma negativa la estimación del volumen.

## ABSTRACT

In this title report, the estimation of the canopy architecture is presented through 3D modeling of the 2019-2020 and 2020-2021 seasons in an intensive European hazelnut orchard (*Corylus avellana* L.). The objective was to describe the 3D modeling based on RGB images taken with a low-cost unmanned aerial vehicle (UAV) and its subsequent processing in Pix4D software. The use of UAV can estimate the volume of hazelnut trees and therefore be an economical and fast option to estimate this parameter. In the comparative description of the seasons, it was obtained as a result that in the 2019-2020 season estimates adjusted to the leaf growth curve and subsequent hazel defoliation were obtained, while the 2020-2021 season had a trend, but this had values very irregular in the estimation of the volume, for the second season there was no winter pruning, which caused a greater irregularity in the architecture of the canopy. The results show that, if a correct estimation of the volume of the canopy can be achieved, but factors such as poor management of the orchard in terms of pruning negatively affect the estimation of the volume.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	HIPÓTESIS .....	3
1.2	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>2</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1	GENERALIDADES AVELLANO EUROPEO EN CHILE. ....	4
2.1.1	<i>Superficie y producción</i> .....	4
2.1.2	<i>Breve Descripción Botánica</i> .....	4
2.1.3	<i>Requerimientos climáticos y edafológicos</i> .....	4
2.1.4	<i>Fenología</i> .....	5
2.1.5	<i>Tonda di Giffoni</i> .....	5
2.2	ARQUITECTURA DEL DOSEL .....	5
2.3	PERCEPCIÓN REMOTA PARA EL APEO DE LA ARQUITECTURA DEL DOSEL.....	7
2.4	USO DE VANT .....	8
<b>3</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>10</b>
3.1	UBICACIÓN DEL ESTUDIO.....	10
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO .....	10
3.3	MONITOREO CLIMÁTICO .....	11
3.4	MONITOREO DEL CULTIVO .....	11
3.5	CARACTERIZACIÓN DEL DOSEL Y CAPTURA DE DATOS MEDIANTE EL VANT .....	11
3.6	PROCESAMIENTO DE DATOS DEL VANT.....	15
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>20</b>
4.1	MONITOREOS CLIMÁTICOS.....	20
4.2	MONITOREO DEL CULTIVO. ....	24
4.3	CARACTERIZACIÓN DEL DOSEL Y CAPTURA DE DATOS MEDIANTE EL VANT .....	27
4.4	PROCESAMIENTO DE DATOS DEL VANT.....	27
<b>5</b>	<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>CITAS BIBLIOGRAFÍA.</b> .....	<b>39</b>

## ÍNDICE DE CUADROS.

<b>Cuadro 3.1.</b> Tabla resumen de vuelos 3D realizados dentro de las temporadas 2019/2020 y 2020/2021. ....	14
<b>Cuadro 4.1.</b> Tabla resumen de volumen estimado dentro de las temporadas 2019/2020 y 2020/2021. ....	29
<b>Cuadro 4.2.</b> Tabla resumen de volumen estimado de la temporada 2019-2020.....	34



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1.</b> Imagen satelital de la ubicación del predio agrícola Agrichile S.A. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.....	10
<b>Figura 3.2.</b> Elaboración de grilla doble con el software Pix4Dcapture en el sitio experimental. <b>A.</b> Grilla para la temporada 2019-2020. <b>B.</b> Grilla para la temporada 2020-2021. ....	13
<b>Figura 3.3.</b> Procesamiento Inicial de Pix4Dmapper para la temporada 2019-2020. ....	15
<b>Figura 3.4.</b> Modelo 3D de la arquitectura del dosel del sitio de estudio de avellano europeo, procesado por el software Pix4Dmapper. ....	17
<b>Figura 3.5.</b> Cálculo de Volumen del dosel de los avellanos europeos del sitio experimental mediante la herramienta cálculo de volumen del software Pix4Dmapper. ....	17
<b>Figura 3.6.</b> Volúmenes calculados con el software Pix4D, que muestran la poca homogeneidad de los mapas 3D, en las zonas demarcadas por los círculos de color blanco, ejemplifica las zonas de pérdida de información que se tuvo en los distintos mapas generados, lo que impidió la generación de mapas 3D del área de estudio completa. Ejemplifican el <b>5</b> represando el vuelo con fecha 26-12-2019, <b>9</b> el vuelo con fecha 26-01-2020, <b>26</b> el vuelo con fecha 10-12-2020 y <b>34</b> el vuelo con fecha 22-02-2021. ....	18
<b>Figura 3.7.</b> Ajuste del área de volumen de estudio, en los 5 árboles seleccionados para e cálculo de volumen, con el software QGIS. ....	18
<b>Figura 3.8.</b> Área seleccionada donde los árboles de avellano sufrieron defoliación por exceso de estrés hídrico para le temporada 2019-2020. <b>A.</b> Toma aérea antes de la ola de calor correspondiente al vuelo N°5 con fecha 26-12-2010. <b>B.</b> Toma aérea después de la ola de calor correspondiente al vuelo N°6 con fecha 02-01-2020.....	19
<b>Figura 4.1.</b> Precipitaciones (mm) y temperaturas máximas, medias y mínimas promedio (°C) mensuales, a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. <b>A.</b> Temporada 2019-2020. <b>B.</b> Temporada 2020-2021. Donde PP es precipitaciones, Temp. es temperatura, Máx. es máxima, Med. es media y Mín. es mínima. ....	20
<b>Figura 4.2.</b> Temperatura máxima, media y mínima promedio (°C) y humedad relativa máxima, media y mínima promedio (%) mensuales, a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. <b>A.</b> Temporada 2019-2020. <b>B.</b> Temporada 2020-2021. Donde Temp. es temperatura Máx. es máximo, Med. es media, Mín. es mínima y H.R. es humedad relativa.....	21
<b>Figura 4.3.</b> Radiación solar (Mj/m <sup>2</sup> /día) y ETo (mm) mensual, a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. <b>A.</b> Temporada 2019-2020. <b>B.</b> Temporada 2020-2021.....	22

<b>Figura 4.4.</b> Velocidad del viento promedio (m/s) mensual y ETo promedio (mm) mensuales, a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. <b>A.</b> Temporada 2019-2020. <b>B.</b> Temporada 2020-2021. ....	23
<b>Figura 4.5.</b> Potencial Hídrico xilemático, de 8 árboles dentro, del área de estudio a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. <b>A.</b> Temporada 2019-2020. <b>B.</b> Temporada 2020-2021. ....	25
<b>Figura 4.6.</b> Potencial Hídrico xilemático promedio del área de estudio a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. <b>A.</b> Temporada 2019-2020. <b>B.</b> Temporada 2020-2021. ....	26
<b>Figura 4.7.</b> Volumen calculado para la última medición de cada temporada, vuelo 19 y 37 respectivamente. <b>A.</b> temporada 2019-2020. <b>B.</b> temporada 2020-2021. ....	30
<b>Figura 4.8.</b> Evolución del volumen (m <sup>3</sup> ) de la arquitectura del dosel de la zona de estudio estimado con el software Pix4D. <b>A.</b> Temporada 2019-2020. <b>B.</b> Temporada 2020-2021. ....	31
<b>Figura 4.9.</b> Condiciones en que se encontraba el huerto de avellano europeo en el área de estudio, para el mes de febrero de la temporada 2020-2021. ....	33
<b>Figura 4.10.</b> Volumen calculado para el vuelo 30 correspondiente a la temporada 2020-2021	34
<b>Figura 4.11.</b> Árboles con síntomas de defoliación foliar por estrés severo. ....	35
<b>Figura 4.12</b> Evolución del volumen (m <sup>3</sup> ) de la arquitectura del dosel en la zona de estrés hídrico estimado con el software Pix4D para la temporada 2019-2020. ....	36

## 1 INTRODUCCIÓN

El género *Corylus*, perteneciente a la familia Betulaceae, describe a especies nativas de Europa que se cultivan por sus nueces comestibles, su madera y para uso ornamental (Kasapligil, 1964). La especie de importancia económica en esta familia es el avellano europeo (*Corylus avellana* L.), conocido por su fruto de alto valor económico comercial (avellana), un tipo de nuez que se consume en todo el mundo como un alimento sin procesar y como ingrediente de productos alimenticios y procesados en confitería (Stuart *et al.*, 2020).

La producción del avellano europeo se concentra en la región del Mar Negro de Turquía (Stuart *et al.*, 2021), la cual produjo en la temporada 2020/2021 un 62% de la producción mundial, equivalente a 320.000 ton. de avellana sin cáscara. A su vez Chile destaca como el único productor del hemisferio sur con el 4% de la producción mundial, correspondiente a 20.200 ton. (INC, 2021). La especie fue introducida por europeos inmigrantes, particularmente alemanes, italianos y suizos, en la zona sur de Chile, principalmente en las regiones de la Araucanía, De Los Ríos y de Los Lagos (Ellena *et al.*, 2014). En 1982, el INIA introdujo la especie con vistas a su adaptación al país por la creciente demanda del hemisferio norte, considerando que en el hemisferio sur no era cultivado de forma comercial (Lobos, 1986). Los primeros huertos de importancia comercial datan de los años '90, con introducción de material vegetal proveniente de Italia y establecidas en las comunas de Curicó y Talca en predios pertenecientes a la empresa italiana Ferrero (Ellena *et al.*, 2013).

En el 2020, la superficie cultivada en Chile alcanzó las 24.430 ha, equivalente al 2,5 % de la superficie cultivada mundial según la FAO (2022). Según estimaciones de ODEPA (2022), para el año 2022 esta superficie es de 24.455 ha las cuales representan el 6,9% de la superficie total de frutales cultivados en Chile. Concentrada principalmente en la Región del Maule que representa el 46% de la superficie de frutales cultivada (ODEPA, 2022). Además, en el Maule se encuentra con el huerto más grande del mundo en la zona Camarico con alrededor de más de 2 mil ha plantadas (Ellena *et al.*, 2013).

Para cultivos de árboles hortícolas, las métricas de la estructura del dosel como el área foliar, la altura y área del dosel, así como el volumen de éste, se han relacionado estrechamente con la sanidad y productividad de los huertos, incluido el rendimiento y la calidad de fruta obtenida (Wu, 2019). La estructura del dosel afecta en la partición de los flujos de calor, radiación y gases, como el vapor de agua y CO<sub>2</sub>, además define aspectos claves del microclima dentro del huerto (Welles, 1990). Una adecuada arquitectura del dosel asegura una óptima distribución de la luz dentro de

la copa, que evitará la aparición de zonas sombreadas y zonas con excesiva radiación, ayudando a asegurar la calidad y cantidad de la fruta producida (Rosell y Sanz, 2012).

Para el caso del avellano europeo, los sistemas de conducción más utilizados en los principales productores del mundo son el multi-eje y el mono-eje (Ellena *et al.*, 2013). Esto genera diferentes estructuras en la arquitectura del dosel, dependiendo del tipo de conducción, y que es una variable que se debe tener en cuenta a la hora de tomar decisiones para los manejos agronómicos. Un mal manejo del dosel en avellano evidencia una progresiva reducción del vigor de los brotes, aumento de ramas secas, escasa penetración de luz al interior de la copa de los árboles, reducción en los rendimientos y calidad de las avellanas, debido a una menor formación de yemas florales dentro de la copa de los árboles, con un desplazamiento de la producción de fruta hacia el exterior, disminuyendo el número y tamaño de nueces (Hampson *et al.*, 1996; Ellena *et al.*, 2018). De esto nace el interés de productores, en obtener información sobre la estructura del dosel de este cultivo. Para determinar la arquitectura del dosel, se requiere de evaluaciones en terreno, cuyo método es subjetivo y depende del observador, siendo además difícil de escalar huertos completos (Wu, 2019). Esta problemática, se acrecentaría en huertos de grandes superficies, que requieran mayor tiempo y mano de obra, que se reflejaría en un aumento de costos para los agricultores.

Una solución reciente para monitorear la arquitectura del dosel es utilizar el modelamiento 3D de los huertos, para estimar cuantitativamente el volumen del dosel. Se puede ejecutar mediante la percepción remota o teledetección como los sensores LiDAR que permiten el escaneo tridimensional del cultivo mediante la emisión y recepción de un pulso láser. Si bien, es un método que entrega un 99% de exactitud en su medición, su principal desventaja es el alto costo, gran requerimiento de capacidad de almacenaje para su procesamiento posterior y sensibilidad a las condiciones de partículas en el aire, como polvo o niebla (Rosell y Sanz, 2012). Una alternativa a esta tecnología es la utilización de vehículos aéreos no tripulados (VANT), comúnmente denominados "Drones", los cuales tienen diversas aplicaciones y ventajas para una variada gama de tareas agrícolas diarias (Puri *et al.*, 2017). Autores describen que el uso de VANT de bajo costo con imágenes RGB, permitiría estimaciones volumétricas en huertos frutales, mediante imágenes RGB y la generación de nubes de puntos (Torres-Rua, 2017; Anifantis *et al.*, 2019). Experiencias de modelamiento 3D, en huertos super intensivos en olivos con VANT de bajo costo, han indicado una alta correlación con metodologías de medición en terreno. (Anifantis, 2019).

## **1.1 Hipótesis**

Es posible modelar el volumen del dosel de un huerto intensivo de Avellano Europeo (*Corylus avellana*) empleando una cámara RGB montada en un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de bajo costo

## **1.2 Objetivo general**

Modelar tridimensionalmente la arquitectura del dosel de un huerto intensivo de avellano europeo (*Corylus avellana*) mediante un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de bajo costo.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Generar un modelo 3D de la arquitectura del dosel a lo largo de la temporada para avellano europeo (*Corylus avellana*) mediante un VANT.
- Contrastar el modelamiento 3D del cultivo, en receso invernal y con expresión vegetativa, caracterizando las etapas fenológicas del avellano europeo (*Corylus avellana*) de acuerdo con la arquitectura del dosel mediante un VANT.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Generalidades Avellano Europeo en Chile.

#### 2.1.1 Superficie y producción

Según FAO (2022), Chile se posiciona como el cuarto país con mayor superficie plantada del frutal equivalente al 2,37% de la superficie mundial. En cuanto a la producción, Chile se ubica como el quinto país productor de avellana sin cáscara, equivalente a 20.200 toneladas según estimaciones de INC (2021). Según ODEPA (2022), la superficie plantada en nuestro país asciende a las 24.445 ha equivalente al 6,9 % de la superficie total la cual se concentra en un 46% en la región del maule.

#### 2.1.2 Breve Descripción Botánica

El avellano pertenece a la familia Betulácea, subfamilia Coryloidea, género *Corylus* nativas de Norteamérica, Europa o Asia. La única especie cultivada por sus frutos es *C. avellana* conocido como avellano europeas (Grau, 2003). Es una planta arbustiva que puede alcanzar alturas de entre dos a cinco metros, con una copa más bien extendida e irregular (Lemus, 2001). Presenta raíces poco profundas (40-50 cm) con hojas grande y caducas (Lemus, 2001; Grau, 2009; Ellena *et al.*, 2013). Es una especie diclino-monoica con sus flores dispuestas en amentos siendo además una especie auto estéril, por lo que requiere de polinizantes (Lemus, 2001; Grau, 2009). Su fruto corresponde a un aquenio y su forma varía según el cultivar (Grau, 2003; Ellena *et al.*, 2013; Ellena *et al.*, 2018).

#### 2.1.3 Requerimientos climáticos y edafológicos

El avellano, es una planta de climas templados. Las temperaturas medias anuales deben oscilar entre 12 y 16°C y requiere de 700 a 1200 horas frio. Las temperaturas invernales de -8°C provocarían daños en las yemas florales. La ocurrencia tardía de heladas en primavera puede afectar seriamente el desarrollo vegetativo de los árboles, atrasando de este modo su fase de formación y entrada en producción (Lemus, 2001; Ellena *et al.*, 2013). También requiere de una adecuada brisa ligera en tiempos de polinización, que favorezca el transporte del polen hacia los estigmas en polinización (Grau, 2009; Ellena *et al.*, 2013). El cultivo se adapta bien en suelos de textura media, con buena permeabilidad con un pH en un rango de 6 a 8 (Grau, 2009; Ellena, 2013). Un valor tolerado de conductividad eléctrica es de <1 ds/m (Leiva *et al.*, 2017). El avellano, es una especie poco tolerante a veranos excesivamente calurosos y secos, tiene alto

requerimiento hídrico, de aproximadamente 1000 mm anuales en árboles adultos, siendo particularmente exigente desde fines de octubre a fines de enero, período donde la nuez termina su crecimiento (Grau, 2009).

#### **2.1.4 Fenología**

La inducción y la diferenciación floral ocurren en los meses de diciembre y febrero para florecer al invierno siguiente (Ellena *et al.*, 2013). El ciclo vegetativo del avellano europeo comienza con la brotación a mediados de septiembre, para culminar en la diferenciación floral masculina en el mes de enero, posteriormente la caída de hojas comienza a mediados del mes de abril, para culminar a mediados del mes de mayo (Ellena, *et al.*, 2018). Los granos de polen son transportados mediante el viento, cabe destacar que, entre los períodos de polinización y fecundación, transcurre un lapsus de 4 a 5 meses. La fecundación, ocurre entre fines de noviembre y mediados de enero (Ellena *et al.*, 2013). El crecimiento del fruto y la lignificación del endocarpio (cáscara) ocurre entre fines de enero y principios de febrero. alcanzando su volumen definitivo a mediados de febrero y principios de marzo (Ellena *et al.*, 2013; Ellena *et al.*, 2018). La avellana, presenta una curva tipo sigmoidea y tres diferentes períodos de desarrollo, tanto en los frutos como en las semillas (Ellena *et al.*, 2013).

#### **2.1.5 Tonda di Giffoni**

En Chile, se cultivan comercialmente dos principales variedades: Barcelona y Tonda di Giffoni (Ellena *et al.*, 2018). Esta última, es la variedad de avellano europeo de mayor importancia para la industria en Chile (Ellena *et al.*, 2018). La región del Maule tiene un rendimiento promedio de 2,5 ton/ha, siendo el cultivo con más hectáreas dentro de la región, según el último catastro frutícola de CIREN (2022). En cuanto a su arquitectura, presenta vigor intermedio con una brotación precoz (Grau, 2009; Ellena *et al.*, 2013).

### **2.2 Arquitectura del dosel**

La estructura del dosel es la disposición espacial de los órganos de las plantas por encima del suelo. Las hojas y otros órganos fotosintéticos de una planta sirven tanto como recolectores de energía solar como intercambiadores de gases, mientras que los tallos y las ramas, sostienen estas estructuras, de tal forma que el intercambio radiativo y convectivo puede ocurrir de manera eficiente (Campbell y Norman, 1990).

La estructura del dosel es una consideración central en cualquier descripción de entorno vegetal, la cual está fuertemente acoplado a la interceptación, dispersión y emisión de radiación. La arquitectura del dosel da forma al flujo del viento, ya que transporta calor, impulso y gases como el dióxido de carbono y el vapor de agua (Welles, 1990). La interceptación y transmisión de las precipitaciones, también se ven afectadas, al igual que la temperatura del suelo y el flujo de calor del suelo. Por lo tanto, la estructura del dosel puede ser importante para determinar el entorno físico de otros organismos, dentro de la comunidad vegetal y puede influir fuertemente en su éxito o fracaso. La estructura del dosel vegetal puede afectar indirectamente procesos como la fotosíntesis, la transpiración, el agrandamiento celular, la infección por patógenos, la multiplicación de insectos y su crecimiento, la fotomorfogénesis y la competencia entre especies en una comunidad vegetal (Campbell y Norman, 1990). La estructura, ayuda a definir el espectro de microclimas, que se encuentran dentro del dosel; microclimas en los que no solo debe vivir la planta en sí, sino también un huésped de otros organismos, ya sean patógenos, insectos o vida silvestre (Welles, 1990). La influencia indirecta sobre la humedad y la temperatura del suelo también puede afectar el crecimiento de las raíces, las pérdidas de agua por evaporación del suelo, la descomposición de residuos y otros procesos microbianos del suelo. Una descripción completa y precisa de un dosel, requeriría la especificación de la posición, el tamaño y la orientación de cada elemento de la superficie de la copa (Campbell y Norman, 1990).

Las descripciones de la arquitectura del dosel son esenciales para lograr una comprensión de los procesos de las plantas, debido a la profunda influencia que tiene la estructura en las interacciones entre la planta y el medio ambiente. La arquitectura del dosel no solo afecta los intercambios de masa y energía entre la planta y su entorno, sino que también puede revelar una estrategia de la planta para hacer frente a procesos evolutivos duraderos, como la adaptación a factores físicos, químicos o bióticos, como también, al reflejar la actividad vital del organismo o peculiaridades en el crecimiento y desarrollo (Norman y Campbell, 1989). La estructura del dosel también es dinámica, cambiando en escalas de tiempo, que van desde minutos hasta años en función de su estado fenológico, prácticas de cultivo y condiciones ambientales (Welles, 1990; Rosell y Sanz, 2012). Por ejemplo, las hojas heliotrópicas de algunas especies, siguen el sol durante todo el día, en otras sus hojas se pliegan, caen o dejan caer sus hojas en respuesta al estrés hídrico, la luz o la estación (Welles, 1990).

La formación adecuada de árboles frutales es fundamental para asegurar una distribución adecuada de la luz dentro de las copas de los árboles. Esto también ayuda a evitar la aparición de zonas sombreadas y zonas con excesiva radiación, además de asegurar la calidad y cantidad de la fruta (Rosell y Sanz, 2012).



Para el caso del avellano, la luz es un factor fundamental para la fotosíntesis y por lo tanto para las diversas funciones del árbol, teniendo relación directa en el desarrollo de los frutos. Tiene una gran influencia sobre la formación de las yemas reproductivas. La falta de luz asociada a una disminución de temperatura, causaría reducción en el número de yemas reproductivas, por lo contrario, un aumento de luz interceptada y de temperatura (hasta cierto punto) favorecería la cuaja y formación del fruto (Ellena, 2013). Estudios sugieren que árboles de avellano, con dosel menos denso, específicamente en los cultivares Tonda di giffoni y en Tonda Romana, el tamaño de la nuez aumenta probablemente por una absorción de luz más eficiente, lo que puede mejorar la formación de flores y la productividad (Farinelli *et al.*, 2005).

Desafortunadamente, las descripciones cuantitativas de las características geométricas de las copas, plantas u órganos individuales son difíciles de obtener ya que las copas son espacial y temporalmente variables (Norman y Campbell, 1989). La medición de la estructura del dosel se puede dividir en dos metodologías: directa e indirecta. Los métodos directos, generalmente requieren muestrear, cortar y medir varios órganos, permitiendo un adecuado nivel de detalle del dosel, siendo un método destructivo. Los métodos indirectos, implican la estimación a través de la percepción remota, mediante sensores e inferencia (ecuaciones) sobre la estructura del dosel son no destructivos, rápidos y permiten muestrear grandes áreas (Norman y Campbell, 1989).

### **2.3 Percepción remota para el apeo de la arquitectura del dosel**

La medición y descripción de la estructura del dosel, es una tarea, que, en el mejor de los casos, es formidable y en el peor, imposible (Welles, 1990). Las evaluaciones visuales en el terreno requieren mucha mano de obra, tiempo ineficiente, son subjetivo para el observador visual y difícil de escalar en huertos enteros por lo cual las tecnologías de percepción remota o teledetección se han evaluado como una alternativa para describir la estructura del dosel, pero la validación a escala comercial y su adopción posterior son limitadas (Wu, 2019).

Los sensores ultrasónicos, de detección de luz y rango (LiDAR) han sido algunos de los sensores más profundamente investigados en el ámbito de la horticultura digital. Pueden estimar con precisión parámetros geométricos y estructurales del dosel de los árboles, proporcionando información para el fenotipado de alto rendimiento y la horticultura de precisión (Colaço *et al.*, 2018). La información sobre las propiedades geométricas de las plantas proporcionada por estas técnicas tiene innumerables aplicaciones en la agricultura. Algunas tareas agrícolas importantes, que pueden beneficiarse de estas técnicas de caracterización de geometría vegetal, son la aplicación de pesticidas, riego, fertilización, formación de cultivos, que también ayudaría a facilitar y mejorar la investigación destinada a desarrollar de mejores sistemas de formación de cultivos,

que aseguren una distribución óptima de luz dentro de las copas de los árboles y por ende una mayor calidad de la fruta (Rosell y Sanz, 2012).

Los estudios que relacionan el riego y la geometría del dosel de cultivos arbóreos y vides destacan la importancia de cuantificar la estructura de la planta, es decir, superficie de la hoja, área sombreada, intercepción de la luz solar, el volumen y la densidad foliar. Además, una caracterización métrica de los árboles es necesaria en cualquier trabajo de investigación. que busca, por ejemplo, cuantificar el crecimiento vegetativo en diferentes situaciones de fertilización, muy pocos estudios han tenido en cuenta la caracterización geométrica de los árboles, con el fin de determinar necesidades de fertilizantes, entre otras razones, esto se debe a la dificultad involucrada en la obtención de mediciones precisas (Rosell y Sanz, 2012).

Si bien son de utilidad conocer las métricas del dosel, los sensores LiDAR y sistemas de ultrasonido, tienen desventajas que condicionan su utilización. Por ejemplo, en el caso de los sensores LiDAR, éstos presentan limitaciones por polvo, niebla y humedad, condiciones muy comunes en los huertos. Un alto costo limitaría su uso. Los datos generados, son considerablemente grandes, por lo que existiría un problema en el almacenamiento de éstos por lo que requeriría, además de largos tiempos de procesamiento de datos. En cuanto a los sistemas de ultrasonido su principal inconveniente es la divergencia de haces de ondas de ultrasonido que se utilizan para medir lo que limita la resolución y precisión de las medidas y requiere de muchas unidades para poder abarcar grandes superficies (Rosell y Sanz, 2012).

## **2.4 Uso de VANT**

Una nueva forma de calcular la estructura del dosel mediante modelamiento 3D es la utilización de los VANT. Desde sus inicios, los vehículos aéreos no tripulados han sido reconocidos como una tecnología prometedora para la agricultura. Esto se debe a que los VANT, a diferencia de los aviones tripulados o los satélites, pueden proporcionar una descripción espacial detallada del estado del cultivo y tanto los agricultores como productores pueden adaptarlos a actividades agrícolas específicas, utilizarlos con la frecuencia que deseen e integrarlos con las fuentes de información existentes y las tecnologías disponibles en el huerto (Torres-Rua, 2017).

Existen trabajos que analizaron la utilización de drones para el desarrollo de modelos 3D de la arquitectura del dosel, los cuales al generarlos los compararon con métodos tradicionales para este cálculo. En el estudio se evaluó el uso de drones para estimar modelos 3D en huertos de olivares super intensivos, el objetivo de este estudio era validar las técnicas de fotogrametría y

modelado 3D de drones con respecto a métodos manuales y tradicionales en huertos de olivo de alta densidad, el primer método se basó en el uso de VANT, el segundo en mediciones manuales in situ y un tercer método se basó en una fórmula para estimar el volumen del dosel. Los resultados demostraron que el método uno -VANT- tenía una alta precisión en la predicción con un menor gasto tiempo de trabajo, teniendo como limitación el requerimiento de personal capacitado. El uso de VANT pudo además brindar la posibilidad de llegar a áreas inaccesibles de otra manera, ahorrando tiempo y dinero, además garantizo el análisis de áreas muy grandes en muy poco tiempo y con una alta precisión en los datos. Respecto a los otros métodos, la estimación con el VANT se ajustó de mejor forma a los valores del volumen del dosel respecto a los otros métodos (Anifantis *et al.*, 2019).

Otro uso interesante que se puede utilizar a la determinación de los volúmenes del dosel mediante los VANT es el monitoreo del estado del árbol y el progreso a escala de campo ante algún tratamiento. Un trabajo distinto, pero también en olivos, fue un ensayo que busco determinar la diferencia entre tratamientos de poda (poda tradicional, adaptada y mecánica) en olivares. Usualmente las investigaciones de poda de árboles generalmente involucran tediosas mediciones de las copas de los árboles que además pueden generar resultados inconsistentes debido a las irregulares geometrías de los árboles. Las imágenes de VANT se recolectaron antes, después y un año después de la poda lo que permitió medir el impacto que causó cada tratamiento en el huerto. Dentro de los parámetros que pudieron analizar fueron el impacto en la altura del árbol y el volumen de este (Jiménez-Brenes, *et al.*, 2017).

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Ubicación del estudio

El estudio se realizó en un predio agrícola ubicado en la comuna de Río Claro, región del Maule, Chile ( $35^{\circ}15'23''$  S.  $71^{\circ}20'30''$  W; 242 m.s.n.m) en las temporadas 2019-2020 y 2020-2021, perteneciente a la empresa AgriChile S.A. El huerto comercial consta con 1600 ha de avellano europeo, cv. Tonda Di Giffoni, subdividido en 30 equipos de riego. El sitio experimental se encuentra en el sector de riego n°7 del equipo 30 ( $35^{\circ}18'30''$  S.  $71^{\circ}21'57''$  W; 213 m.s.n.m.).



**Figura 3.1.** Imagen satelital de la ubicación del predio agrícola AgriChile S.A. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

#### 3.2 Caracterización del sitio de estudio

Los avellanos se encuentran establecidos a un marco de plantación de 5 x 3 m (667 árboles/ha) y conducido en multieje con árboles de 5,5 m de altura aprox. La textura del suelo es franco arcilloso-arenoso con un punto de marchitez permanente de 17,5%, capacidad de campo de 29%, una saturación 44,1 % y con un 2.3% de materia orgánica. El riego está compuesto por una línea de riego por hilera con emisores (microjet) que suministran 32 litros por hora, espaciados a 3 m. La parcela de estudio cubre una superficie de 1 ha aproximadamente. El clima predominante en la región se clasifica como templado mediterráneo cálido, según la clasificación climática de Köppen (Riosesco y tesser, 2005) y se caracteriza por veranos cálidos y secos e inviernos fríos y con lluvias invernales (Riosesco y tesser, 2005; Britannica, 2019).

### **3.3 Monitoreo climático**

Se realizó un monitoreo periódico de las condiciones climáticas de las temporadas 2019-2020 y 2020-2021, donde cada 15 minutos se registraron los datos, los cuales fueron transmitidos automáticamente a la base de datos del Centro de investigación y transferencia del riego y agroclimatología (CITRA) los cuales fueron descargados a través de la página web del CITRA, citraulca.cl. Estos datos fueron generados por la estación meteorológica automática (EMA, A733, Adcon Telemetry, Klosterneuburg, Austria), ubicada a 7 km de la parcela de estudio sobre pasto en condiciones de referencia. Las variables medidas fueron, temperatura de aire de entrada (Ta); humedad relativa (RH); radiación solar (Rs); velocidad de viento (Ws) y precipitaciones (pp), los cuales fueron utilizados para estimar ETo utilizando la ecuación Penman-Monteith descrita por Allen *et al.* (1998).

### **3.4 Monitoreo del cultivo**

Se realizó un monitoreo del cultivo entre los meses de noviembre y marzo, para así correlacionar los estados fenológicos del cultivo, con las posteriores estimaciones volumétricas de la arquitectura del dosel. Se realizó un monitoreo del estado hídrico mediante el potencial xilemático con una cámara de presión o bomba tipo Scholander (PMS Instrument Co., modelo 600, Corvallis, Oregon, USA) donde el procedimiento consistió en envolver las hojas con plástico (papel film) y papel aluminio, para bloquear la transpiración y radiación. Luego de dos horas, las hojas se cortan, a nivel de peciolo, y se colocan al interior de la cámara (quitándole la envoltura) para realizar la medición. La presión observada es equivalente al potencial hídrico del xilema de la planta (Selles y Ferreyra, 2006). Las mediciones se realizaron a mediodía solar cuando existía la máxima demanda de agua, 12-14 Hrs. para la zona (Gálvez *et al.*, 2011). Esto se realizó en 8 árboles dentro de la parcela de estudio con 3 repeticiones por árbol. Se utilizaron hojas sanas que no tuvieran daños, a un metro de distancia desde los ejes a la altura de la cabeza (1,6 m aprox).

### **3.5 Caracterización del Dosel y captura de datos mediante el VANT**

Para este estudio, la estimación del modelamiento de la arquitectura del dosel del avellano se realizó mediante técnica de fotogrametría de corto alcance y modelamiento 3D, mediante la utilización de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) o “dron”. El VANT utilizado para la toma de imágenes fue un Mavic Air de la marca DJI, un modelo de bajo costo (1000 USD). Los vuelos se realizaron una vez por semana a mediodía solar (12-14 Hrs. para la zona) con días despejados y sin viento.

El área de estudio tuvo una extensión de 0,809 ha y 1,276 ha aprox. para la temporada 2019-2020 y 2020-2021 respectivamente, la estimación del área se realizó mediante el software de código abierto QGIS (Versión 3.16.16; Equipo de desarrolladores). El aumento en el área de estudio fue para evitar falta de información por pérdida en los bordes. El plan de vuelo fue diseñado a través del software Pix4Dcapture (Versión 1.8.0; Pix4D, Lausana, Suiza), disponible de forma gratuita, para smartphone compatible, así minimizar el tiempo de vuelo y que éste fuese autónomo; tuvo una duración de 13 minutos aprox. para la temporada 2019-2020 y 17 minutos aprox. para la temporada 2020-2021. Las imágenes capturadas fueron RGB estándar, tomadas a través de lo que se conoce como grilla doble, elaborada a partir del software Pix4Dcapture (Figura 3.2.), el que es recomendado por la aplicación, para generar modelos 3D. La dinámica de este vuelo consiste en un vuelo doble, donde el primero fue un vuelo habitual en una dirección, para luego realizar un segundo mapeo siguiendo direcciones perpendiculares a la inicial, de esa forma, variando el ángulo de la cámara inclinada a 35°, podremos conseguir secciones laterales de la cara de los árboles. La altura de vuelo fue de 30 metros a una velocidad de 2,5 m/s. El VANT estaba equipado con una cámara de 12 MP, configurada con un tiempo de exposición de 1/1000 s y un ISO de 100, ya que, al realizar la captura de las imágenes a plena luz del día, se recomienda usar una sensibilidad de ISO baja, ya que, éste es la sensibilidad que tiene el sensor a la luz. Una ISO baja, necesitará más luz para lograr una buena exposición, que es el caso en que nos encontramos. En cuanto al tiempo de exposición utilizado, éste es bajo, ya que, permite obtener imágenes nítidas sin desenfoque, considerando que fueron tomadas desde el VANT en movimiento, lo que permite un óptimo procesamiento de datos. Las imágenes capturadas contaron con una resolución de imagen de 4056x3040. Cuenta con GPS integrado, lo que permitió georreferenciar las imágenes capturadas, las cuales fueron en promedio 125 fotografías por vuelo, para la primera temporada y 187 para la segunda. Este cambio, para la segunda temporada, busca abarcar una mayor área, para así no perder datos por el efecto borde. Se realizaron un total de 30 vuelos con lo que se obtuvieron un total de 4776 imágenes RGB dentro del periodo de toma de imágenes (Cuadro 3.1.).



**Figura 3.2.** Elaboración de grilla doble con el software Pix4Dcapture en el sitio experimental. **A.** Grilla para la temporada 2019-2020. **B.** Grilla para la temporada 2020-2021.

**Cuadro 3.1.** Tabla resumen de vuelos 3D realizados dentro de las temporadas 2019/2020 y 2020/ 2021.

<b>DJI Mavic Air</b>		
<b>N° de mediciones Correlativas</b>	<b>Fecha de captura</b>	<b>Imágenes capturadas por vuelo</b>
1	15-11-2019	128
2	29-11-2019	125
3	09-12-2019	125
4	17-12-2019	n/a
5	26-12-2019	125
6	02-01-2020	125
7	11-01-2020	125
8	18-01-2020	125
9	26-01-2020	125
10	03-02-2020	125
11	11-02-2020	125
12	19-02-2020	125
13	27-02-2020	125
14	06-03-2020	125
15	14-03-2020	n/a
16	31-03-2020	n/a
17	15-04-2020	125
18	25-05-2020	n/a
19	05-06-2020	117
20	05-10-2020	n/a
21	29-10-2020	n/a
22	09-11-2020	201
23	17-11-2020	201
24	25-11-2020	203
25	03-12-2020	189
26	10-12-2020	187
27	21-12-2020	202
28	28-12-2020	187
29	04-01-2021	187
30	12-01-2021	187
31	20-01-2021	187
32	10-02-2021	187
33	17-02-2021	n/a
34	22-02-2021	187
35	01-03-2021	188
36	09-03-2021	188
37	11-05-2021	225
<b>Total de mediciones realizadas</b>		<b>4776</b>

Donde n/a = no disponible (*not available* en inglés).



### 3.6 Procesamiento de Datos del VANT

El procesamiento de las imágenes RGB, se realizó por medio del software Pix4Dmapper (Versión 4.7.5; Pix4D, Lausana, Suiza) el cual, a través del sistema de nube de puntos, permitió generar mapas 3D de la estructura del dosel de los árboles de avellano europeo. Los datos se procesaron en tres grades pasos que tiene el programa. Primero, está el “procesamiento inicial” (Figura 3.3), donde se crean puntos de enlace automáticamente entre las imágenes procesadas, además se localizan mediante la información entregada por el GPS a través de la información de geolocalización, este punto es la base para los próximos procedimientos. Un segundo proceso, lo denominamos “Nube de puntos y malla” que se basa en los enlaces generados anteriormente creando una malla con textura 3D. Finalmente, encontramos el procedimiento final denominado “DSM, Orto mosaico e índices”, este paso permite crear modelos de superficie digital o DSM, por sus siglas en inglés (Digital surface model) que permiten la estimación de volúmenes. También da paso a la creación de orto mosaicos, que elimina las distorsiones de perspectiva de las imágenes y finalmente el mapa de reflectancia que tiene como objetivo, producir un mapa que le dé un valor a cada píxel, de acuerdo a la reflectancia que tenga el objeto, con éstos, se generan los mapas de índices vegetativos.

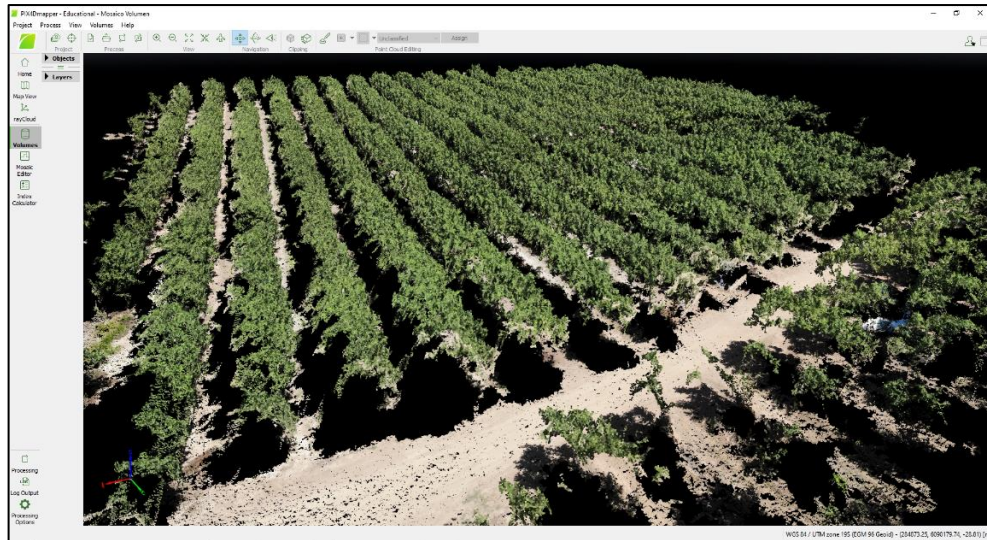


**Figura 3.3.** *Procesamiento Inicial de Pix4Dmapper para la temporada 2019-2020.*

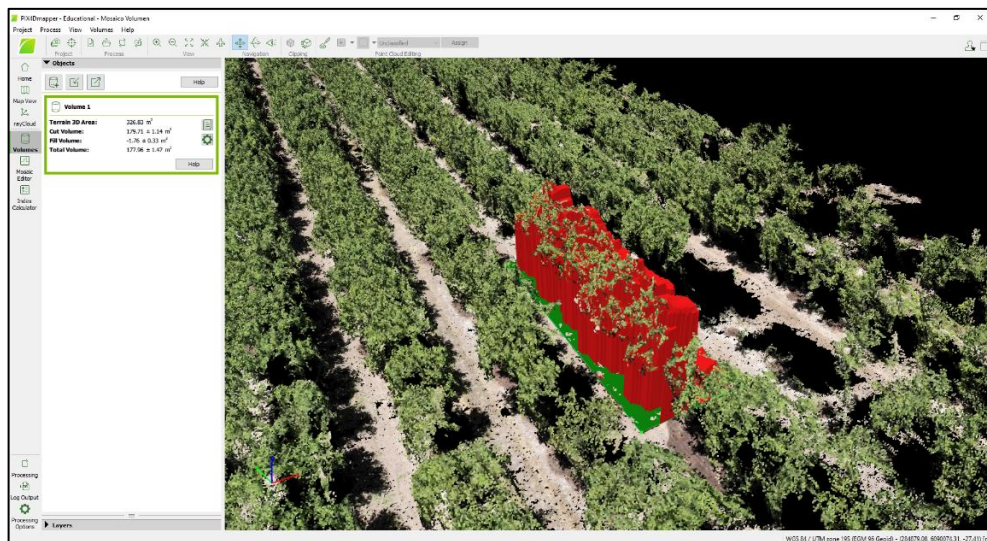
El tercer procedimiento descrito anteriormente, nos permitió obtener un modelo 3D de la arquitectura del dosel del huerto de avellano (Figura 3.4.), además mediante la opción cálculo de volumen, se seleccionó el área de estudio, mediante la herramienta del software, la cual fueron 5 árboles a una distancia de 70 m del camino. Se estimó el volumen del dosel de los árboles dentro del área seleccionada, la que se aprecia de color rojo, lo que representa el volumen estimado que

consideró el software, como volumen para el dosel de los árboles de avellano (Figura 3.5.). Se escogieron estos 5 árboles, ya que, se pudieron mantener en observación durante ambas temporadas, porque se observó mucha disparidad en los modelos 3D generados. En la figura 3.6 podemos observar algunos ejemplos de cómo se nos mostraron algunos mapas con problemas de pérdida de información. Posteriormente, para que todas las áreas de cálculo de volumen fueran iguales, se tomó como base el área del primer volumen estimado. El software Pix4D, permite exportar e importar un área de volumen en un archivo ESRI Shapefile (.SHP) el cual guarda los datos de localización del área de estudio y permite georreferenciarla en los demás mapas. Además, se debió ajustar el área de estudio, mediante el software QGIS para cada vuelo, ya que, por errores de geolocalización del dron, existen pequeñas diferencias en la ubicación del área de estudio dentro de los mapas (Figura 3.7). Se realizó el mismo procedimiento anteriormente descrito, para seleccionar un área que contempla 14 árboles en dos hileras a unos 20 m del camino para la temporada 2019-2020. Se seleccionó esta área para realizar un seguimiento del volumen, ya que, sucedió una particularidad, estos árboles seleccionados estaban dentro del marco de un estudio de estrés hídrico para avellanos, a los cuales se les aplicó un déficit hídrico lo que sumado a un ola de calor sucedida a fines del mes de diciembre, generó un mayor estrés provocando que los árboles sufrieran defoliación (Figura 3.8).

En este trabajo, no se realizó una corrección radiométrica, como es en el caso de las imágenes satelitales, ya que, no existe una diferencia en las condiciones atmosféricas y de iluminación que afecten las imágenes capturadas (Ambrosio *et al.*, 2002). El proceso total, tuvo una duración de aproximadamente 2 horas y 45 minutos por vuelo, para la primera temporada (125 imágenes) y 3 horas y 30 minutos para la segunda temporada (187 imágenes), lo cual puede variar dependiendo de la capacidad del hardware con el que se procesen los datos. En este caso, se utilizó un computador de escritorio, en las instalaciones del CITRA, el cual contaba con un CPU Intel Core i7 (Intel corporation, modelo i7-3770, California, E.E.U.U), 16 GB de memoria RAM y un GPU AMD Radeon HD 6450 (Advanced Micro Devices, Inc., versión Drivers 5.201.1151.1008, California, E.E.U.U).

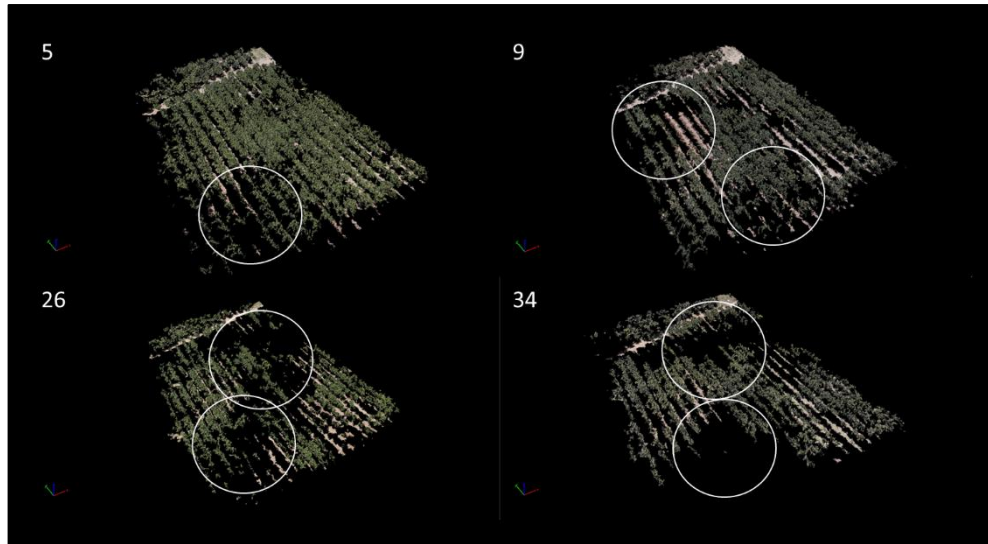


**Figura 3.4.** Modelo 3D de la arquitectura del dosel del sitio de estudio de avellano europeo, procesado por el software Pix4Dmapper.

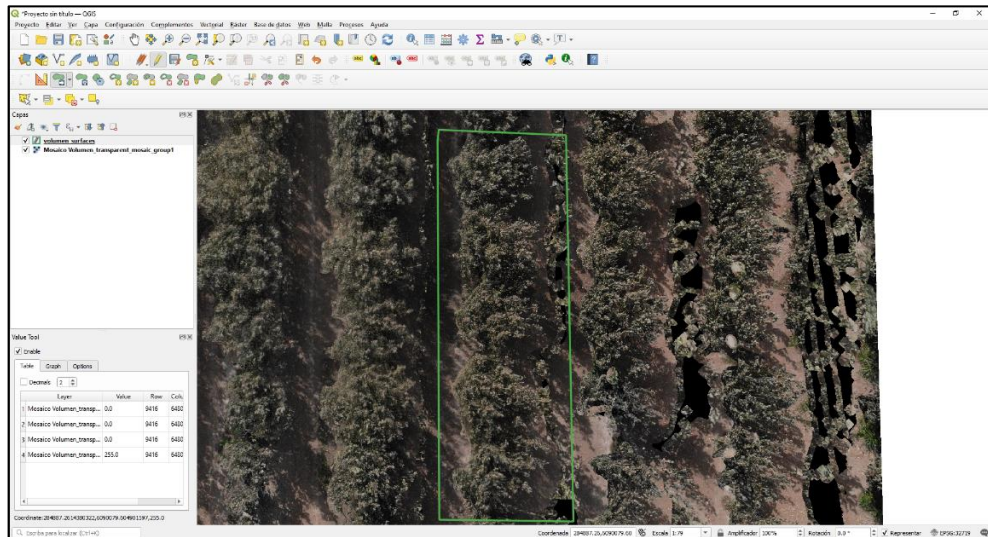


**Figura 3.5.** Cálculo de Volumen del dosel de los avellanos europeos del sitio experimental mediante la herramienta cálculo de volumen del software Pix4Dmapper.

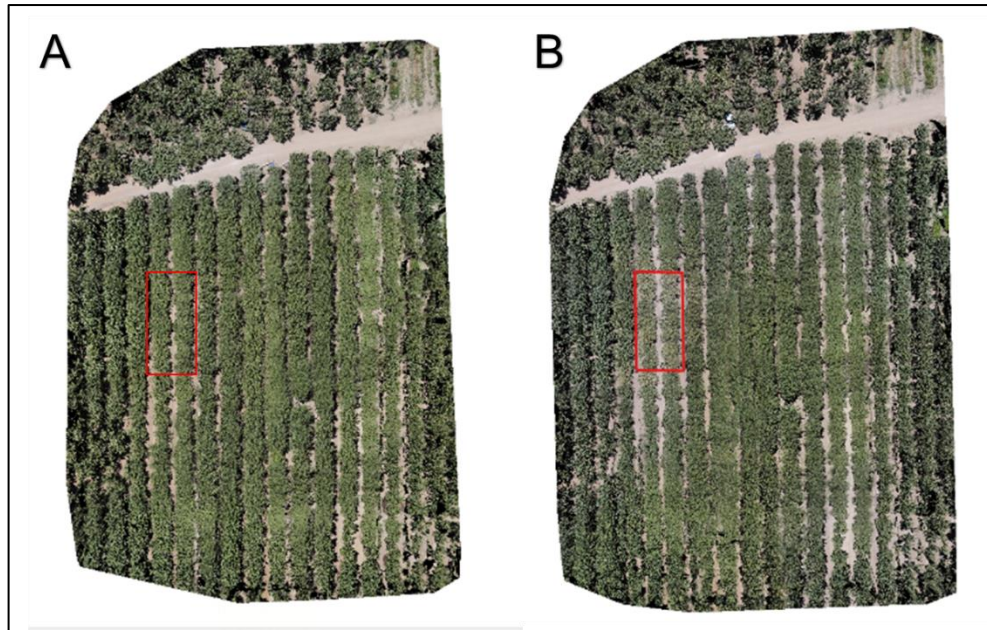




**Figura 3.6.** Volúmenes calculados con el software Pix4D, que muestran la poca homogeneidad de los mapas 3D, en las zonas demarcadas por los círculos de color blanco, ejemplifica las zonas de pérdida de información que se tuvo en los distintos mapas generados, lo que impidió la generación de mapas 3D del área de estudio completa. Ejemplifican el **5** represando el vuelo con fecha 26-12-2019, **9** el vuelo con fecha 26-01-2020, **26** el vuelo con fecha 10-12-2020 y **34** el vuelo con fecha 22-02-2021.



**Figura 3.7.** Ajuste del área de volumen de estudio, en los 5 árboles seleccionados para e cálculo de volumen, con el software QGIS.

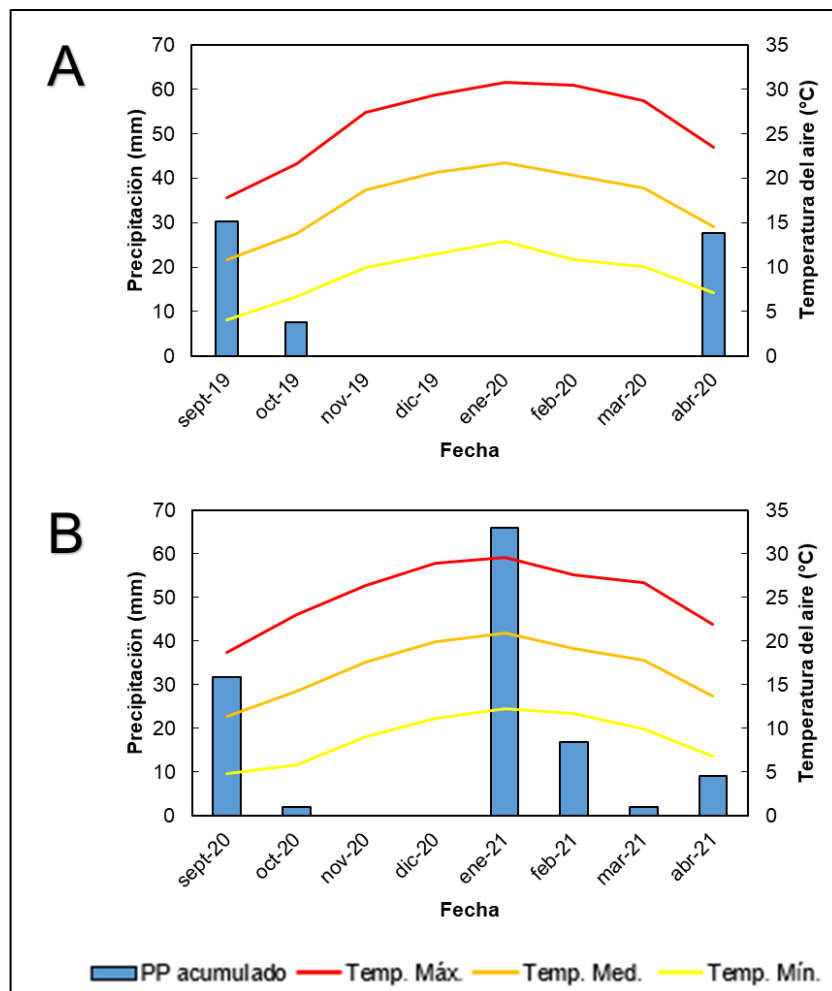


**Figura 3.8.** Área seleccionada donde los árboles de avellano sufrieron defoliación por exceso de estrés hídrico para le temporada 2019-2020. **A.** Toma aérea antes de la ola de calor correspondiente al vuelo N°5 con fecha 26-12-2010. **B.** Toma aérea después de la ola de calor correspondiente al vuelo N°6 con fecha 02-01-2020.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Monitoreos climáticos.

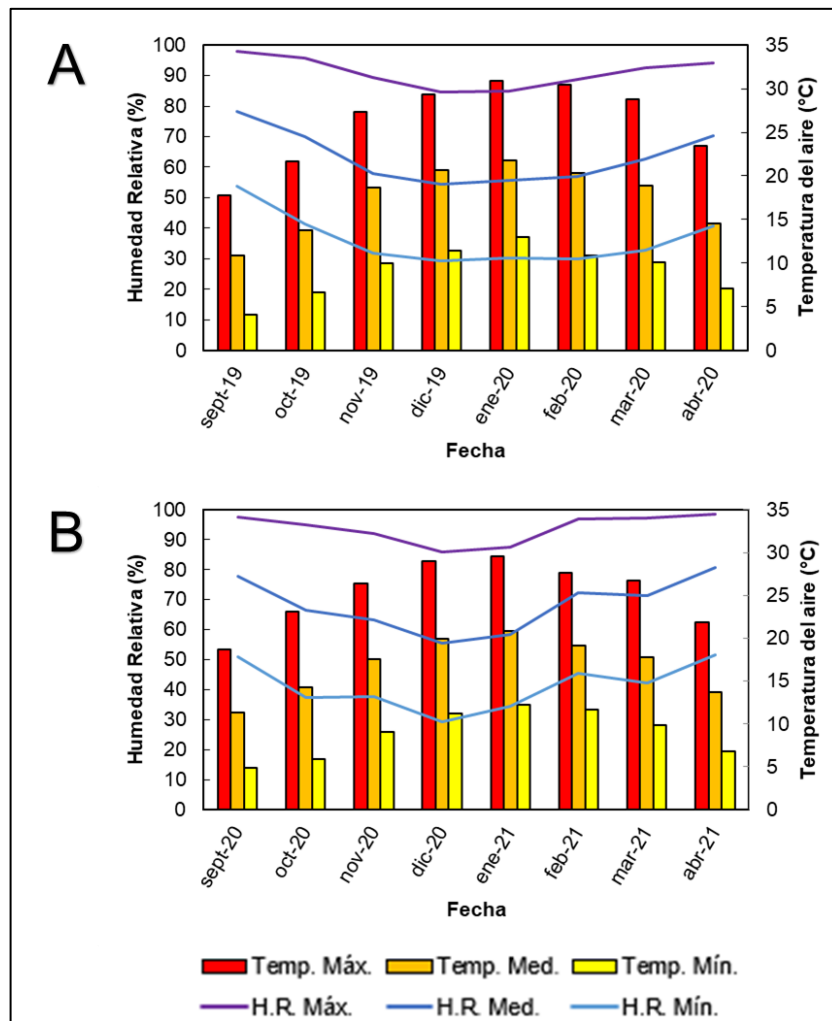
El monitoreo climático a lo largo de las dos temporadas, 2019-2020 y 2020-2021, tuvo como objetivo medir las diferentes variables climáticas de importancia para el cultivo del avellano. Los parámetros climáticos descritos fueron temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, con las que además se realizó el cálculo de la ETo, para ambas temporadas, en base a la ecuación Penman-Monteith descrita por Allen *et al.* (1998). Se realizó una comparativa entre ambas temporadas, para poder caracterizar y describir las condiciones en las que se encontró el predio de estudio.



**Figura 4.1.** Precipitaciones (mm) y temperaturas máximas, medias y mínimas promedio (°C) mensuales, a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. **A.** Temporada 2019-

2020. **B.** Temporada 2020-2021. Donde PP es precipitaciones, Temp. es temperatura, Máx. es máxima, Med. es media y Mín. es mínima.

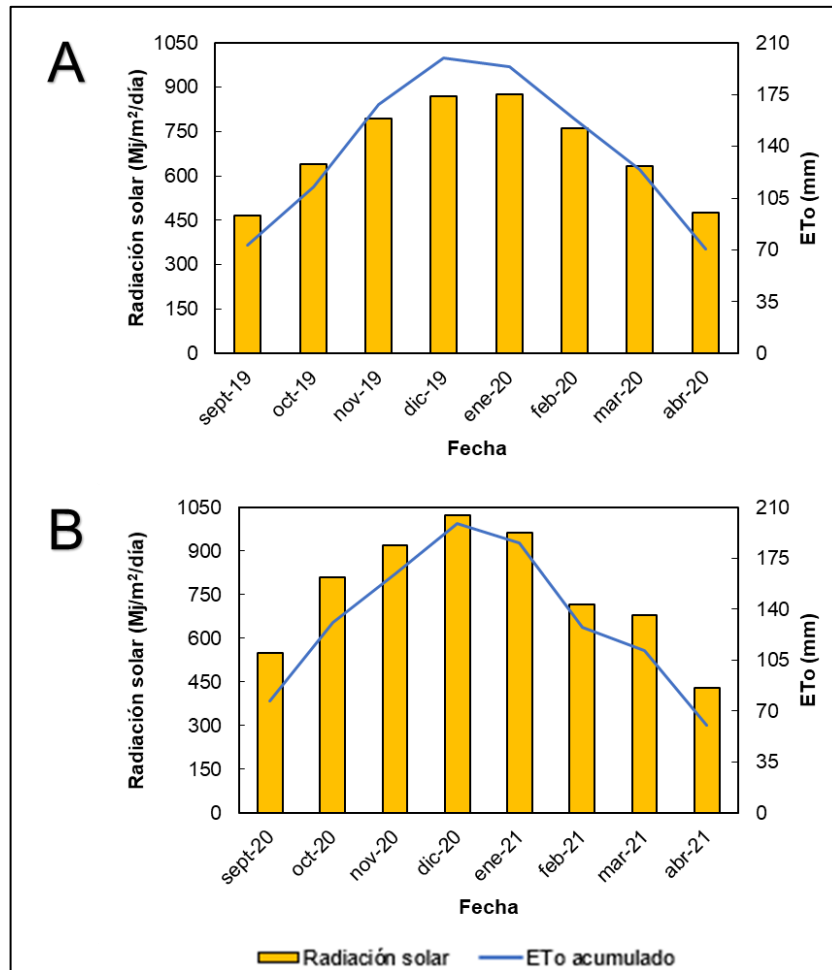
Las precipitaciones acumuladas dentro de la temporada A, fueron 65,4 mm mientras que la temporada B, sumó 127,8 mm, un aumento del 95,41% registrando lluvias significativas en el mes de enero (66 mm), valores muy por encima de los que registro Ortega-Farias *et al.*, (2020) en el mismo predio agrícola en Río Claro, donde registró en sus dos temporadas (2016-2017 y 2017-2018) 35 y 56 mm de precipitaciones respectivamente. En cuanto a las temperaturas en la temporada A, oscilaron entre 4,1-30,86°C mientras que la temporada B, registró valores entre 4,83-29,55°C. Ortega-Farias *et al.*, (2020) registró valores diarios que oscilaron entre 5-32°C y 5-29 °C respectivamente para sus temporadas de estudio, valores muy similares de los registrados para este ensayo.



**Figura 4.2.** Temperatura máxima, media y mínima promedio (°C) y humedad relativa máxima, media y mínima promedio (%) mensuales, a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro,

región del Maule. **A.** Temporada 2019-2020. **B.** Temporada 2020-2021. Donde Temp. es temperatura Máx. es máximo, Med. es media, Mín. es mínima y H.R. es humedad relativa.

La H.R. para la temporada A, osciló entre 29,45-98,03%, por su parte la temporada B registró un rango entre 29,39 y 98,56%. Por su parte, Ortega-Farias *et al.*, (2020) para las temporadas 2016-2017 y 2017-2018 registró valores entre 24-95 y 22-94 % respectivamente, rangos levemente más bajos que los registrados en este estudio.

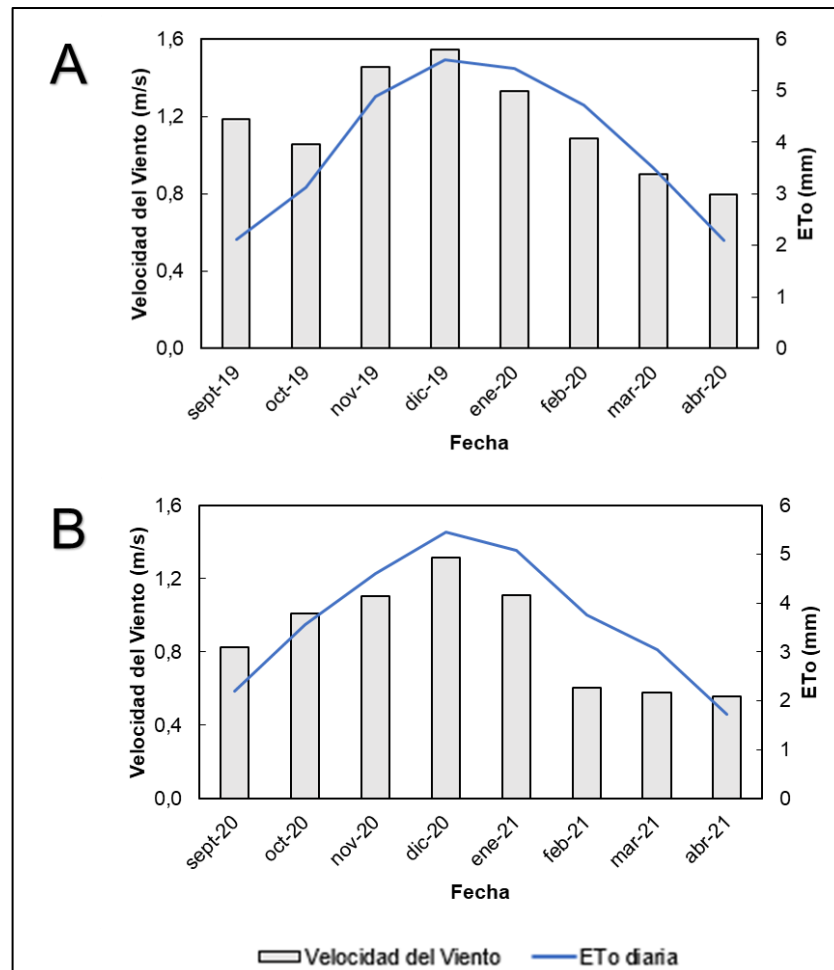


**Figura 4.3.** Radiación solar ( $Mj/m^2/día$ ) y ETo (mm) mensual, a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. **A.** Temporada 2019-2020. **B.** Temporada 2020-2021.

En cuanto a la Radiación solar para la temporada A, ésta acumuló  $5.512,20 Mj/m^2/día$ , mientras que temporada B, acumuló  $6.082 Mj/m^2/día$ ,  $569,8 Mj/m^2/día$  más que la temporada A, lo que equivalió a un incremento del 10,34%. Los meses donde se registró una mayor radiación solar fueron los meses de diciembre y enero para ambas temporadas. Respecto a la ETo (mm) y su relación con la radiación solar ( $Mj/m^2/día$ ), podemos decir que este es proporcional a la



radiación. La radiación solar, es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua (Allen *et al.*, 2006). En los meses donde se registró una mayor radiación solar, fueron los meses donde existió una mayor ETo. La temporada A, registró una ETo acumulada de 1.101,77 mm mientras que la temporada B, registró una ETo acumulada de 1.055,51 mm. La temporada A, promedió 137,72 mm por mes, Por su parte la temporada B, promedió una ETo de 131,94 mm por mes.



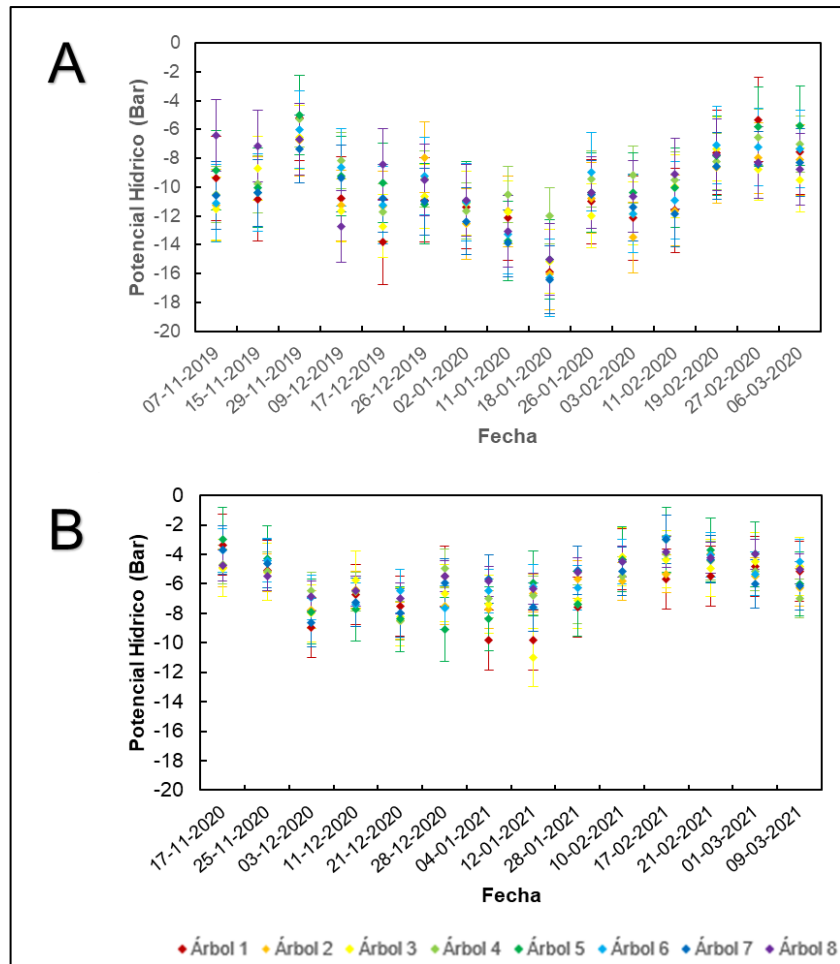
**Figura 4.4.** Velocidad del viento promedio (m/s) mensual y ETo promedio (mm) mensuales, a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. **A.** Temporada 2019-2020. **B.** Temporada 2020-2021.

En promedio, la velocidad del viento promedió 1,17 m/s para la temporada A, mientras que la velocidad en la temporada B, promedió 0,89 m/s, una diferencia de 0,28 m/s. En cuanto a la ETo diaria para ambas temporadas, se puede observar que llega a su pick en los meses de diciembre, para luego decaer progresivamente durante la temporada. La ETo diaria para la temporada A, promedió 3,93 mm diarios, la temporada B registró un promedio de 3,68 durante su temporada.

Importante mencionar, que en la temporada B existió una brusca caída de la ETo desde el mes de enero al mes de febrero, lo que podría estar relacionado con los eventos de lluvia descritos en la figura 4.1 y que tuvieron un efecto en el aumento de la H.R. descrito en la figura 4.2 que pudo disminuir los requerimientos hídricos de la atmósfera.

#### **4.2 Monitoreo del cultivo.**

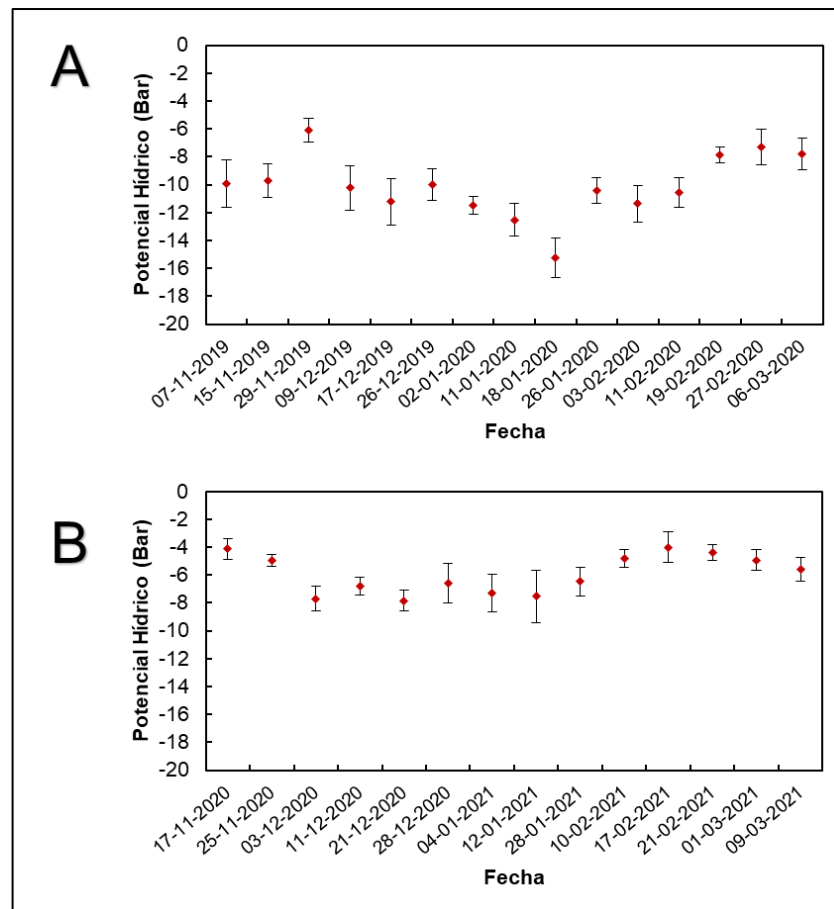
Se buscó monitorear el cultivo, a través del potencial xilemático, ya que este refleja el nivel de estrés en que se encuentra la planta, de acuerdo con la disponibilidad del agua en el suelo y a la demanda evaporativa de la atmósfera (Ferreyra y Sellés, 2001), para así saber cómo se encontró el cultivo en ambas temporadas. Los componentes meteorológicos analizados anteriormente, proporcionan la energía para la vaporización y extraen vapor de agua de una superficie evaporante (Allen *et al.*, 2006). En nuestro caso, los ocho árboles de avellano europeo, seleccionados para el monitoreo en ambas temporadas.



**Figura 4.5.** Potencial Hídrico xilemático, de 8 árboles dentro, del área de estudio a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. **A.** Temporada 2019-2020. **B.** Temporada 2020-2021.

La figura 4.5, nos muestra el comportamiento del potencial hídrico a través de las temporadas de los 8 árboles analizados. La temporada A, contó con 15 mediciones a lo largo de la temporada mientras que la temporada B, contó con 14 mediciones. En el eje de las Y, observamos el potencial hídrico en Bar, que es una medida de presión y corresponde a la tensión con que se encuentra el agua en el xilema de la planta, normalmente se mide en megapascal (MPa) (Selles y Ferreyra, 2006). En nuestro caso, se registró en bar, ya que, es la unidad de medida en la cual lo registró la bomba tipo Scholander, que se utilizó para monitorear el potencial de los árboles. Los valores se expresan en términos negativos, puesto que el agua en el xilema de las plantas se encuentra a presiones inferiores a la atmósfera (Selles y Ferreyra, 2006) y es una muestra de la resistencia que tiene la planta para evitar perder agua ante condiciones de estrés.

Los valores de potencial hídrico en la temporada A, fluctuaron entre los -15,2 bar y -6,1 bar mientras que la temporada B, fluctuó en valores de -7,8 bar y -4 bar, valores muy por encima de los datos registrados de la temporada A. Ortega-Farias *et al.*, (2020) observó valores muy similares a los de la temporada B, entre -0,9 y -0,54 Mpa, equivalente a -9 y -5,4 bar, durante dos temporadas de estudios en árboles de avellano europeo cv. Tonda di Giffoni, regados con el 100% de la demanda real de ETo en la región del maule. Grau y Sandoval (2009) observaron valores de -0,8 y -0,4 Mpa, equivalente a -8 y -6 bar, en condiciones similares en árboles de avellano de tres años sin restricción hídrica. Por lo cual podemos decir que la temporada B se encontró sin restricciones hídricas y la temporada A las tuvo.



**Figura 4.6.** Potencial Hídrico xilemático promedio del área de estudio a lo largo de la temporada del avellano europeo, comuna de Río Claro, región del Maule. **A.** Temporada 2019-2020. **B.** Temporada 2020-2021.

En la figura 4.6 podemos apreciar de mejor forma la diferencia que existió entre las temporadas en cuanto a su potencial hídrico. En la temporada A, se aprecia un gran estrés hídrico en el mes de enero, para luego aumentar lentamente con el término de la temporada. En la temporada B, se aprecia un potencial hídrico mucho más estable durante la temporada. Si bien

tiene sus valores más altos en el mes de enero, este descenso es menos significativo que en la temporada A.

Si asumimos que el cultivo estuvo en condiciones más estresantes durante la temporada A que en la B, este estrés dado por las condiciones generadas tanto por los factores climáticos como por los manejos agronómicos, podemos esperar que la tolerancia al estrés ocasione la disminución de la biomasa, posiblemente por el gasto de energía para activar los mecanismos de defensa, que se dan en mayor o menor grado según la intensidad del estrés (Mejía de Tafur *et al.*, 2017).

#### **4.3 Caracterización del Dosel y captura de datos mediante el VANT**

Del total de vuelos planificados para ambas temporadas (cuadro 3.1), se realizaron un total de 30 vuelos. Las fechas sin vuelos, fueron causa de las malas condiciones climáticas para realizarlos, principalmente por la existencia de nubosidad a la hora estipulada para éstos, lo que incide directamente con la luminosidad, generando sombras que evita que se pueda procesar de una correcta forma los datos, ya que buscamos imágenes nítidas donde se distinga de forma clara el perfil del suelo de los árboles de avellano.

Para la temporada A, se realizaron un total de 15 mediciones a lo largo de la temporada con 4 vuelos no realizados por condiciones climáticas. Por su parte la temporada B, tuvo un total de 15 mediciones con 3 vuelos no realizados por condiciones climáticas.

#### **4.4 Procesamiento de Datos del VANT**

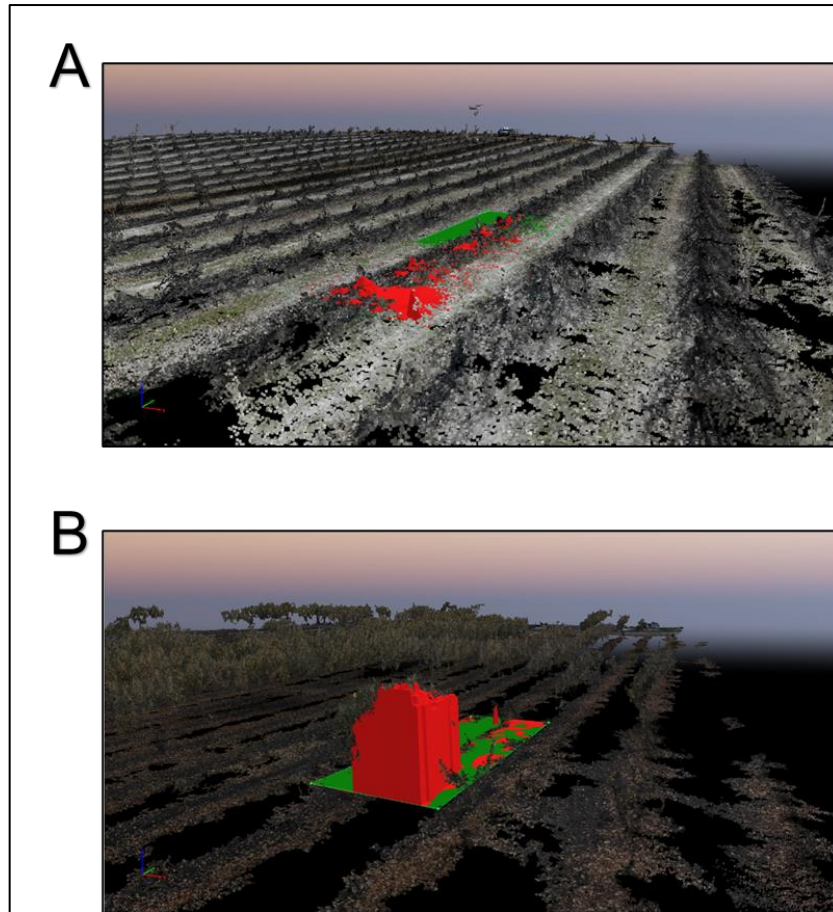
El cuadro 4.1, resume las estimaciones obtenidas con el procesamiento de imágenes RGB a través del software Pix4D de los 30 vuelos realizados con éxito, para la elaboración de los mapas 3D. El vuelo N°1 con fecha 15-11-2019 marca el inicio para la temporada 2019-2020, ésta culmina con el vuelo N°19 con fecha 05-06-2020. Esta medición, al término de temporada, buscó observar cómo se comporta el software, en cuanto a la estimación de volumen, en un momento donde el cultivo se encuentra sin hojas en su arquitectura. Se espera que, en periodo de receso, exista una estimación de volumen igual a cero o muy cercano. El vuelo N°19 arrojó un volumen de 4,2 m<sup>3</sup> muy cercano a cero. Por su parte, la temporada 2020-2021, marcó su inicio con el vuelo N°22 con fecha 09-11-2020 y culmina con el vuelo N°37 con fecha 11-05-2021, arrojando este último vuelo, una estimación de volumen de 45,3 m<sup>3</sup>, un valor más alto que en el término de la primera temporada, aunque hay que considerar que se realizó antes que en la temporada anterior. Los modelos elaborados y su estimación para los últimos vuelos de cada temporada se pueden

observar en la figura 4.7 En cuanto al total volumen error, éste es calculado por el software y determina el error de volumen estimado para el área seleccionada. El software, calcula el error de cada cuadro por píxel. En cuanto al ajuste de altura, ésta hace referencia a un ajuste que se debió realizar en la mayoría de los vuelos y corresponde a la diferencia de altura que hay entre el dron y la superficie (suelo) desde la perspectiva del dron, de ahí el valor negativo.

**Cuadro 4.1.** Tabla resumen de volumen estimado dentro de las temporadas 2019/2020 y 2020/ 2021.

N° de mediciones Correlativas	Fecha Vuelo 3D	Total Volume (m3)	Total Volume Error (m3)	ajuste de altura
1	15-11-2019	177,956	1,4703	-31,44
2	29-11-2019	208,804	1,48594	-31,44
3	09-12-2019	248,056	1,49065	-30,94
4	17-12-2019	n.a	n.a	n.a
5	26-12-2019	228,134	1,40929	-30,44
6	02-01-2020	226,663	1,43439	-30,94
7	11-01-2020	219,811	1,39392	-29,44
8	18-01-2020	226,223	1,41216	-29,94
9	26-01-2020	226,122	1,44001	-30,44
10	03-02-2020	245,263	1,4363	-30,94
11	11-02-2020	231,849	1,38504	-29,94
12	19-02-2020	219,939	1,45123	-32,1
13	27-02-2020	235,272	1,42	-31
14	06-03-2020	245,482	1,39369	-31,44
15	14-03-2020	n.a	n.a	n.a
16	31-03-2020	n.a	n.a	n.a
17	15-04-2020	229,954	1,47538	-31,44
18	25-05-2020	n.a	n.a	n.a
19	05-06-2020	4,230	1,35057	-28.9
20	05-10-2020	n.a	n.a	n.a
21	29-10-2020	n.a	n.a	n.a
22	09-11-2020	136,440	1,44506	-31,44
23	17-11-2020	218,744	1,37832	-30,05
24	25-11-2020	183,554	1,47042	-32,25
25	03-12-2020	229,992	1,50057	-31,8
26	10-12-2020	232,818	1,45492	-30,3
27	21-12-2020	201,176	1,4346	-30,7
28	28-12-2020	178,119	1,45329	-31,44
29	04-01-2021	283,963	1,47052	-33,05
30	12-01-2021	318,186	1,45293	-32,1
31	20-01-2021	167,593	1,41746	-32,94
32	10-02-2021	251,831	1,45992	-31,44
33	17-02-2021	n.a	n.a	n.a
34	22-02-2021	141,509	1,40628	-31,44
35	01-03-2021	212,318	1,40626	-30,44
36	09-03-2021	207,943	1,40075	-30,44
37	11-05-2021	45,355	1,70157	-29,2

Donde n/a = no disponible (*not available* en inglés).

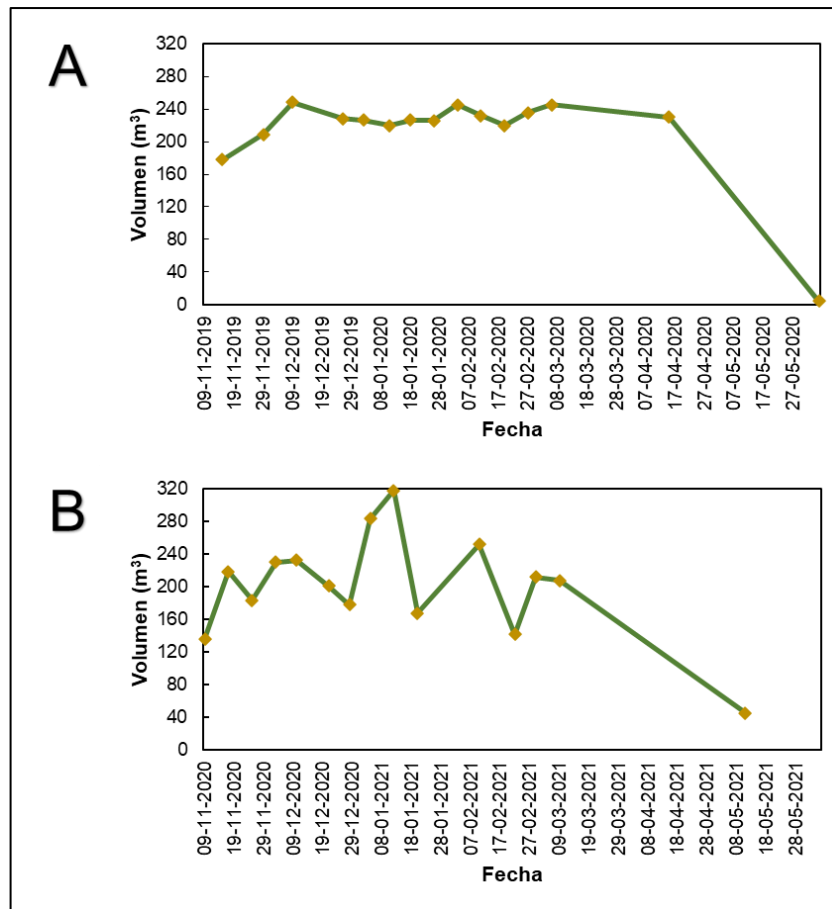


**Figura 4.7.** Volumen calculado para la última medición de cada temporada, vuelo 19 y 37 respectivamente. **A.** temporada 2019-2020. **B.** temporada 2020-2021.

La figura 4.8 grafica los datos presentados en el cuadro 4.1. Podemos observar la evolución del volumen estimado, a través de los vuelos realizados entre los periodos de estudio de cada temporada. El ciclo vegetativo del avellano europeo comienza con la brotación a mediados de septiembre, para culminar en la diferenciación floral masculina en el mes de enero (Ellena *et al.*, 2018), por lo cual deberíamos esperar crecimiento vegetativo y por ende volumétrico entre el periodo mencionado. La caída de hoja comienza a mediados del mes de abril para culminar a mediados del mes de mayo (Ellena, *et al.*, 2018) por lo que se espera defoliación y por ende disminución del volumen estimado entre el periodo mencionado. Los valores estimados, fueron en general consistentes respecto a lo esperado con ciertas diferencias entre una y otra temporada, presentando una clara curva de desarrollo y posterior defoliación del cultivo. La temporada 2019-2020, registra su máximo estimado a principios de diciembre, medición N°3, con 248.056 m<sup>3</sup>, luego presenta valores entre los 219.000 m<sup>3</sup> hasta los 245.000 m<sup>3</sup> aprox. para decaer fuertemente en la última medición de la temporada, N°19, en el mes de junio. La temporada 2020-2021 nos presentó un volumen mucho más alto, este se calculó a mediados de enero en la



medición N°30, registrando 318.186 m<sup>3</sup>, el resto de la temporada registro valores entre 167.000 m<sup>3</sup> y 251.00 m<sup>3</sup> aprox. para disminuir fuertemente en la última estimación de la temporada.



**Figura 4.8.** Evolución del volumen (m<sup>3</sup>) de la arquitectura del dosel de la zona de estudio estimado con el software Pix4D. **A.** Temporada 2019-2020. **B.** Temporada 2020-2021.

Los datos, nos muestran volúmenes irregulares que fluctúan de gran forma, sobre todo en la temporada B, donde vemos un crecimiento sostenido hasta el sexto vuelo de esa temporada, donde desciende bruscamente para luego ascender al volumen máximo de la temporada, fluctuando de gran forma el resto de temporada (Figura 4.8). Un factor para tener en cuenta es que en el huerto estudiado no se realizó la poda de invierno antes de entrar a la temporada B lo que generaría un mayor vigor para esta temporada, que además afectaría las estimaciones de volumen para dicha temporada. Estas dimensiones irregulares o incorrectas para los árboles pueden atribuirse además a un mala generación de los DSM por falta de calidad de las imágenes capturadas. Como mencionábamos en materiales y métodos, se seleccionó un área dentro del total, que se mantuviera lo más homogéneo durante ambas temporadas para evitar una estimación volumétrica errónea. Jiménez-Brenes *et al.*, (2017) generó mapas 3D con un VANT

en un procesamiento similar y al observar detalladamente sus resultados, reveló estimaciones incorrectas para los árboles de olivo, lo que lo atribuyó a errores durante la generación de DSM. También factores como el viento o la velocidad en que se configuró el VANT, pueden generar “ruido” en las imágenes, tanto en su calidad o en su geolocalización, muy probable por turbulencias o error de precisión del GPS al momento de la captura de la imagen y su correspondiente georreferenciación. El mismo Jiménez-Brenes *et al.*, (2017) en su trabajo, comparte que factores con respecto a condiciones climáticas (viento o nubes) o problemas operativos (por ejemplo, altitud de vuelo, orientación de los ejes del sensor o velocidad del UAV) podrían producir ligeros cambios aleatorios en el momento de la toma de imágenes, de hecho, en su estudio solo analizaron el 80% del total de árboles, el resto de los árboles fueron descartados para evitar conclusiones imprecisas por datos erróneos.

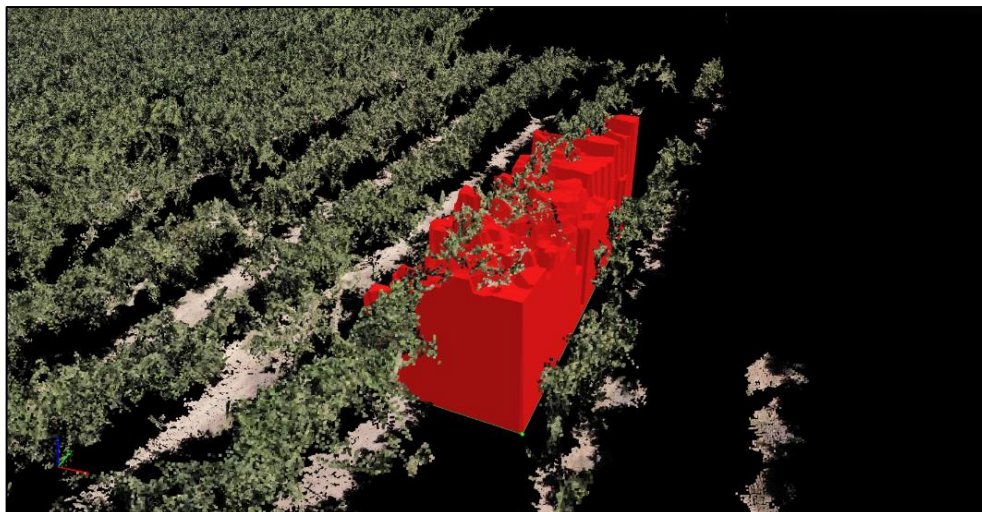
En cuanto al ángulo de la inclinación de la cámara, en nuestro caso 35°, éste pudo no ser el indicado, lo cual impediría tomar buenas imágenes de los laterales de los árboles afectando la correcta toma de datos y una posterior estimación volumétrica. En un estudio realizado por Sinha *et al.*, (2021) menciona que en general para un dosel de cultivo alto, manzano en su estudio, una mayor inclinación del sensor puede proporcionar una mejor estimación del volumen de la fila de los árboles. En éste, analizan diferentes altitudes de vuelo e inclinación de la cámara, estimando que para manzanos (4 m de alto), lo mejor era una altitud de vuelo de 30 m con un ángulo de inclinación de 75°, lo que produjo un mejor mapeo del huerto. Esto nos abre una ventana de posibilidades para mejorar el estudio en avellanos, en adaptar de mejor forma el ángulo en que se encuentra la cámara a la hora de la toma de datos. En cuanto a la altura, coincidimos con el del estudio, pero no descartaría realizar un estudio para optimizarla.

Otro gran factor que puede estar afectando en la correcta toma de datos, sobre todo en la temporada B, es la condición de sobre vegetación o emboscado en que se encontraba el huerto por la falta de poda invernal en dicha temporada (Figura 4.9), que como mencionábamos, el software no es capaz de estimar de correcta forma el volumen de los árboles, ya que al no distinguir de forma correcta el perfil del suelo, éste asume que la entre hilera está cubierta de follaje y sobrestima el volumen. Lo que pudo haber sucedido en la medición del vuelo 30, donde la estimación del volumen llega a su pick llegando a superar los 300 m<sup>3</sup>, como observamos en la figura 4.10 el software calculó una especie de rectángulo sobreestimando el volumen del cultivo, al no tener una correcta información de los laterales del dosel, entorpecida por la condición de sobre vegetación que se encontraba el huerto. Con respecto a cómo puede afectar el tamaño del dosel en estimaciones volumétricas, Anifantis *et al.*, (2019) menciona que, en su estudio en olivo, el modelamiento 3D con VANT se comportó de mejor forma en cultivares de menor densidad de follaje con filas defoliadas, que en cultivares con una mayor densidad del dosel. Jiménez-Brenes

*et al.* (2017) en su estudio que buscaba caracterizar tres tipos de poda en olivos con el uso de modelamiento 3D, basada en imágenes capturadas con VANT, determinó que la poda mecánica eliminó ramas sobresalientes, lo que produjo una forma más uniforme en el dosel de los olivos, facilitando la tarea de construcción geométrica de nube de puntos 3D. No así los árboles podados con una poda adaptada, que era uno de sus tipos de poda, la cual redujo drásticamente la biomasa del dosel lo que aumentó la heterogeneidad de la forma de la copa de los árboles, que tuvo como resultado la disminución de la precisión de la foto-reconstrucción, llegando a la conclusión que la poda afecta la arquitectura de dosel, afectando de forma positiva o negativa la calidad de las estimaciones 3D generados por VANT e imágenes RGB. En nuestro estudio la falta de poda para la temporada 2020-2021 estaría afectando de forma negativa la estimación volumétrica del dosel.



**Figura 4.9.** Condiciones en que se encontraba el huerto de avellano europeo en el área de estudio, para el mes de febrero de la temporada 2020-2021.



**Figura 4.10.** Volumen calculado para el vuelo 30 correspondiente a la temporada 2020-2021

**Cuadro 4.2.** Tabla resumen de volumen estimado de la temporada 2019-2020.

N° de mediciones Correlativas	Fecha Vuelo 3D	Total Volume (m3)	Total Volume Error (m3)	ajuste de altura
1	15-11-2019	743,126	3,66945	-31,03
2	29-11-2019	677,890	3,79034	-30,7
3	09-12-2019	677,148	3,81808	-30,7
4	17-12-2019	n.a	n.a	n.a
5	26-12-2019	798,016	3,60941	-29,7
6	02-01-2020	689,722	3,67375	-30,2
7	11-01-2020	139,152	3,56997	-29,7
8	18-01-2020	431,129	3,61948	-30,2
9	26-01-2020	32,062	3,61118	-29,97
10	03-02-2020	190,287	3,67892	-29,7
11	11-02-2020	525,293	3,54715	-29,7
12	19-02-2020	197,296	3,68691	-30,2
13	27-02-2020	89,714	3,63686	-30,2
14	06-03-2020	79,033	3,5694	-29,7
15	14-03-2020	n.a	n.a	n.a
16	31-03-2020	n.a	n.a	n.a
17	15-04-2020	388,586	3,77895	-30,2
18	25-05-2020	n.a	n.a	n.a
19	05-06-2020	29,830	3,43473	-27,4

En el cuadro 4.2 nos muestra la evolución del volumen estimado para el área de estudio que abarca 14 árboles en dos hileras y que estaban sometidas a un estudio de estrés hídricos, los cuales por una fuerte ola de calor sufrieron senescencia en sus hojas (figura 4.11). Esto nos permitió realizar esta estimación y observar cómo se comportaría el software ante situaciones de pérdida de follaje ante un fuerte estrés hídrico. A fines de diciembre de la temporada 2019-2020, se registró una ola de calor que supero los 30°C, que afectó de gran forma a los árboles sujetos a este estudio de estrés hídrico en avellano europeo, lo que les generó una pérdida importante de sus hojas. El avellano es una especie sensible a la falta de agua y presenta una baja capacidad de regulación estomática, lo que afecta negativamente el crecimiento (Ellena *et al.*, 2013).



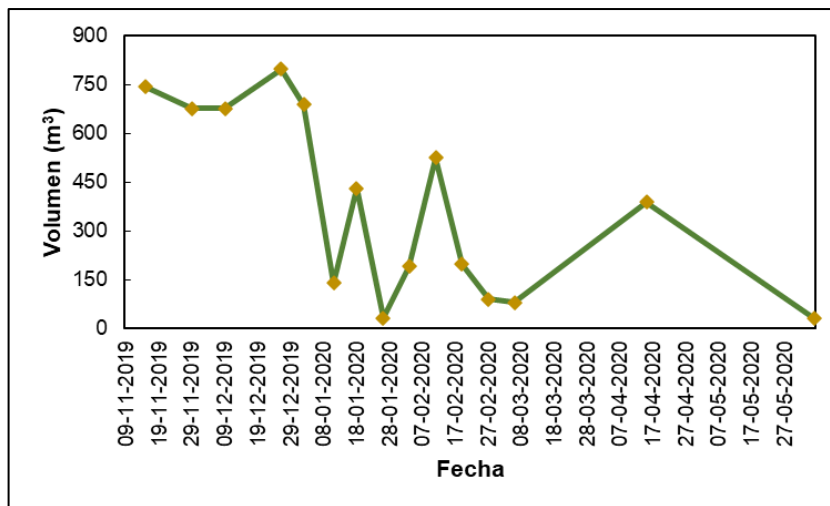
Normalmente, a medida que el contenido hídrico de la planta disminuye, las células se encogen y las paredes celulares se relajan, esta reducción en el volumen genera una disminución en la presión de turgencia dentro de la célula, por ende la expansión foliar al ser un proceso inducido por la turgencia, es extremadamente sensible al déficit hídrico (Taiz y Zeiger, 2006), por lo cual un primer efecto esperado, sería la reducción de volumen provocado por esta pérdida de turgencia en las hojas, ante las condiciones de estrés hídrico. Taiz y Zeiger (2006) también mencionan que las plantas al verse sometidas a un estrés hídrico después de haber desarrollado una importante cantidad de área foliar, las hojas sufren senescencia y posible abscisión del órgano, como se vio reflejado para esas fechas en los árboles de avellano observados.



**Figura 4.11.** Árboles con síntomas de defoliación foliar por estrés severo.

En la figura 4.12 podemos observar el vuelo N°5, con fecha 26-12-2019, que fue el registro antes de la ola de calor y su volumen estimado fue de 798.016 m<sup>3</sup>, en medio de la ola de calor, en el vuelo N°6 se estimó un volumen de 689.722 m<sup>3</sup>, donde ya se comenzó a observar el efecto del estrés sobre las hojas, para posteriormente disminuir fuertemente el volumen estimado a 139.152 m<sup>3</sup> para el vuelo N°7. Si bien la estimación del volumen posterior al evento de estrés fluctúa en el resto de temporada, posiblemente por el efecto que tuvo la pérdida de hojas, genera una superficie muy heterogénea que perjudicaría la estimación del volumen, entre otros factores como se discutieron anteriormente. En el momento donde ocurrió la ola de calor, el software pudo detectar la disminución de volumen ante un evento de estrés hídrico del árbol y su posterior pérdida de hojas. También se observó que, al realizar una estimación de volumen en un área

más grande, hay que tener en consideración las pendientes que existan dentro del huerto, que pueden afectar la óptima estimación de volumen, esto no se vio reflejado en la estimación de volumen que abarco solo 5 árboles, ya que al ser una superficie más pequeña la pendiente de ese sector no fluctúa significativamente.



**Figura 4.12** Evolución del volumen (m³) de la arquitectura del dosel en la zona de estrés hídrico estimado con el software Pix4D para la temporada 2019-2020.

Otro punto importante para mencionar dentro del marco del modelamiento 3D, en base a información recopilada con un VANT de bajo costo, es la falta de la validación de este método de estimación con sistemas ya validados como los sensores LiDAR. Sinha *et al.*, (2021) justifica estudios futuros para comparar los parámetros de vigor estimados del dosel con VANT con datos adquiridos con técnicas de detección terrestre como el LiDAR. Aunque estudios destacan que el uso de cámaras a bordo de un VANT de bajo costo puede proporcionar precisiones similares a la de los sistemas LiDAR, más complejos y costosos que se utilizan actualmente, para aplicaciones agrícolas y medioambientales (Zarco-Tejeda *et al.*, 2014), pero que requiere de una validación que se ajuste a las condiciones del huerto.

En cuanto a otros métodos que pudieran generar estimaciones volumétricas de la copa de los árboles, podemos mencionar la estimación directa, éstas son mucho más laboriosas dado que implicaría la cosecha del individuo completo (defoliación del árbol) y el transporte de este material a laboratorio para su estimación. Este método, requiere de mucho tiempo y recursos, lo cual dificulta obtener estimaciones repetidas en el espacio y tiempo (Verma *et al.*, 2016; Nafarrate, 2017), lo cual no sería viable para huertos intensivos con cientos de hectáreas que buscan ser productivos. Nafarrate (2017) en su tesis menciona las ecuaciones alométricas, que son una manera de estimar la biomasa aérea de forma precisa pero costosas (tanto en tiempo como en

recursos) y muy específicas, por lo que utilizar ecuaciones entre sectores poco homogéneos podría derivar en un error importante en la precisión de los valores de biomasa obtenidos. Un estudio de Verma *et al.*, (2016) comparó el uso de imágenes multiespectrales extraídas del worldView-2, un satélite capaz de obtener imágenes multiespectrales, con el uso del sensor LIDAR para obtener valores de altura y diámetro del dosel para así estimar posteriormente el volumen de la copa de eucaliptos, concluyó que el uso de imágenes multiespectrales tienen como ventaja la reducción de costo y procesamiento complejo asociado al LIDAR, pero no descarta el mejor rendimiento del LIDAR para la obtención de las métrica, a su vez menciona que la caracterización del terreno como pendientes, deberían considerarse a la hora de estimar parámetros con las imágenes multiespectrales, error que no sucedería con la toma de imágenes de VANT, ya que, su toma de datos al estar más cerca de la superficie, permitiría analizarla en bloques más homogéneos, en cuanto a sus características topográficas. Otro punto para considerar de su estudio es que, en la estimación, solo consideró el diámetro y la altura del árbol, por lo cual en su ecuación estaría sobreestimando el volumen. Otra experiencia de imágenes multiespectrales para determinar la altura y el diámetro fue de Chang *et al.*, (2020) comparó medidas en terreno con las estimaciones en base a imágenes multiespectrales basada en VANT, sus resultados mostraron que los coeficientes de correlación fueron de 0,7 y 0,8 para la altura y diámetro de la copa respectivamente, las cuales fueron utilizadas para estimar el volumen. Otra experiencia en vid de Matese *et al.*, (2016) estimó el volumen de una forma similar a las anteriores, calculando el ancho y la altura del dosel mediante imágenes multiespectrales, además observaron una buena correlación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), determinando que un modelo 3D desarrollado por imágenes de VANT puede ser útil para una evaluación de biomasa simple y rápida.

Un factor entre los métodos mencionados es que, si bien utilizan imágenes multiespectrales, ya sea obtenidos en VANT o de satélites, logran estimar el volumen, lo hacen de forma indirecta utilizando solo parámetros como la altura y ancho del dosel. En cambio, el cálculo mediante modelamiento 3D de RGB, podría proporcionar una estimación mucho más ajustada a la realidad, ya que, calcula el volumen mediante la forma de la estructura del dosel, generada por el procesamiento de datos y ajustándose a la forma de la copa de los árboles. Lo que sí resulta interesante, es la correlación que menciona Matese *et al.*, (2016) sobre el índice de vegetación NDVI, el cual podría ser utilizado para relacionar el volumen generado con el modelamiento 3D, propuesto en este estudio y el índice mencionado u otros índices de vegetación, que puedan tener una relación importante con la caracterización de la arquitectura del dosel.

## 5 CONCLUSIÓN

Este estudio, examinó el uso de un VANT de bajo costo en un huerto intensivo de *C. avellana*, para determinar un modelamiento tridimensional de la arquitectura del dosel. Los resultados obtenidos, de acuerdo con el área de estudio, muestra que este procedimiento podría proporcionar una rápida y confiables estimaciones del volumen en avellanos o incluso en otros cultivos de una forma no destructiva, rápida y económica en comparación con otros métodos que buscan estimar el volumen del dosel. Sin embargo, las condiciones en que se encontraba el huerto de estudio, emboscado, dificultó la óptima toma de datos, generando datos erróneos al momento de modelar en 3D la arquitectura del dosel, lo que generaría estimaciones equivocadas dando como resultado valores que sobreestimen o subestimen el volumen de los árboles analizados, sobre todo en la temporada 2020-2021 donde no existió una poda invernal previa a la temporada. Cabe destacar que esto abre la ventana de seguir investigando en circunstancias con un huerto mejor manejado, lo que pueda mejorar la calidad de los datos y realizar estudios que además busquen optimizar factores como la altura del vuelo o el ángulo de la cámara, a la hora de la recolección de datos y cómo estos factores impactan en el resultado final del modelamiento tridimensional o métricas topográficas, como la pendiente de las áreas de estudio que entorpecerían la estimación volumétrica. También, si bien existen registro que esta técnica de modelamiento 3D se asemeja a LIDAR, se debería realizar estudios en avellanos que busca validar la técnica de modelamiento 3D de la arquitectura del dosel mediante un VANT de bajo costo. Si profundizamos en estos temas en futuros estudios y se logra optimizar de gran medida esta técnica, permitiría a la comunidad agrícola realizar estimaciones volumétricos de una forma económica, rápida y sencilla.



## 6 CITAS BIBLIOGRAFÍA.

Abarca, P. 2020. ¿Cómo determinar el volumen de aplicación en frutales utilizando pulverizadores hidroneumáticos? Ficha técnica INIA Rayentué. no. 48. [En línea]. Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/67261>>. Consultado el 08 de junio del 2021.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-Fao Irrigation and Drainage Paper 56. [En línea]. Recuperado en: <<http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>>. Consultado el 26 de junio de 2021.

Allen, R., Pereira, L, Raes, D., y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudios FAO, Riego y Drenaje N°56. [En línea]. Recuperado en: < <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>>. Consultado el 12 de marzo del 2022.

Ambrosio, G., Gonzáles, J. y Arevalo, V. 2002. Corrección Radiométrica y Geométrica de Imágenes para la Detección de Cambios en una Serie Temporal. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga. [En línea]. Disponible en: < <http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/ambrosio2002crg.pdf>>. Consultado el 02 de julio del 2021.

Anifantis, A., Camposeo, S., Vivaldi, G., Santoro, F. and Pascuzzi, S. 2019. Comparison of UAV Photogrammetry and 3D Modeling Techniques with Other Currently Used Methods for Estimation of the Tree Row Volume of a Super-High-Density Olive Orchard. Agriculture, 9(11), 233.

Britannica. 2019. Mediterranean climate. Encyclopedia Britannica. [En línea] Recuperado en: <<https://www.britannica.com/science/Mediterranean-climate>>. Consultado el 12 de marzo del 2022.

Campbell, G. and Norman, J. 1990. Page 1 in: Plant canopies: Their Growth, Form and Function. Edited by Russell, G., Marshall, B., and Jarvis, P.G. First edition Cambridge University Press. London, Great Britain. 192p.

Centro de información de recursos naturales (CIREN). 2022. Catastro frutícola, Catastro frutícola, Región del Maule 2019. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. [En línea]

Recuperado en: < <https://www.ciren.cl/proyectos/catastros/catastro-fruticola/>>. Consultado el 29 de marzo del 2022.

Chang, A., Yeom, J., Jung, J., and Landivar, J. 2020. Comparison of Canopy Shape and Vegetation Indices of Citrus Trees Derived from UAV Multispectral Images for Characterization of Citrus Greening Disease. *Remote Sensing*, 12(24), 4122.

Colaço, A., Molin, J., Rosell-Polo, J., and Escolà, A. 2018. Application of light detection and ranging and ultrasonic sensors to high-throughput phenotyping and precision horticulture: current status and challenges. *Horticulture Research*, 5, 1-11.

Ellena, M., Sandoval, P., Gonzales, A., Montenegro, A., Azócar, G. y Medina, L. 2013. Avellano europeo: Establecimiento y formación de la estructura productiva. *Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. no. 274. [En línea]. Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7684>>. Consultado el 18 de abril del 2021.

Ellena, M., Sandoval, P., Gonzalez, A., Jequier, J., Contreras, M., and Grau Beretta, P. 2014. Chilean hazelnut situation and perspectives. *Acta Horticulturae*, 1052: 329–342.

Ellena, M., Mejías, J., Sellés, G., Roversi, A., Díaz, J., Montenegro, A., y Avendaño, L. 2018. El avellano europeo en Chile. Una década de recopilación e investigación. Temuco: Colección Libros INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 36. [En línea]. Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/3591>>. Consultado el 25 de abril del 2021.

Farinelli, D., Boco, M., and Tombesi, A. 2005. Influence of canopy density on fruit growth and flower formation. *Acta Horticulturae*, 686: 247–252.

Ferreira, R. y Selles, G. 2001. Riego deficitario controlado en uva de mesa, estrategias de riego para enfrentar situaciones de escasez de agua en frutales. *Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. Centro Regional de Investigación La Platina. N° 60. [En línea]. Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7585>>. Consultado el 14 de marzo del 2021.

Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO). 2022. FAO Stats, production, crops. Organization of the United Nation. [En línea] Recuperado en: < <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> >. Consultada el 29 de marzo del 2022.

Gálvez, R., Callejas, R. y Reginato, G. 2011. Comparación de la cámara de presión tipo Scholander modelo Pump-up respecto a la cámara de presión tradicional en vides de mesa. INDESIA (Chile) Volumen 29, n°2. 175-179

Grau, P. 2003. Avellano europeo, manual de plantación y manejo. Boletín INIA – Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 108. [En línea] Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/6992>>. Consultado el 28 de mayo del 2021.

Grau, P. 2009. Manual de avellano europeo. Boletín INIA – Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 195. [En línea] Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7435>>. Consultado el 28 de mayo del 2021.

Grau, P., and Sandoval, P. (2009). Xylematic Water Potential and Stomata Density in Three Cultivars of Hazelnut (*Corylus avellana* L.) in Region del Bio Bio, Chile. Acta Horticulturae, (845), 249–254.

Hampson, C., Azarenko, A., and Potter, J.R. 1996. Photosynthetic Rate, Flowering, and Yield Component Alteration in Hazelnut in Response to Different Light Environments. Journal of the American Society for Horticultural Science, 121, 1103-1111.

International Nut & Dried Fruit (INC). 2021. Statistical Yearbooks, Material for the nut and dried fruit industry. [En línea] Recuperado en: <<https://www.nutfruit.org/industry/technical-resources?category=statistical-yearbooks>>. Consultado el 07 de junio del 2021.

Jiménez-Brenes, F., López-Granados, F., de Castro, A., Torres-Sánchez, J., Serrano, N., and Peña, J. 2017. Quantifying pruning impacts on olive tree architecture and annual canopy growth by using UAV-based 3D modelling. Plant Methods, 13:55.

Kasapligil, B. 1964. A contribution to the histotaxonomy of *Corylus* (Betulaceae). Adansonia 4: 43-90.

Lemus, G. 2001. Frutales de nuez no tradicionales: Macadamia, Pistacho, Pecano, Avellano Europeo. Serie actas – Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 7. [En línea]. Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/8711>>. Consultado el 28 de mayo del 2021.

Leiva, C., Schmidt, C., y Gajardo, G. 2017. Cartilla hortofrutícola avellano europeo: proyecto modelo de adaptación al cambio climático por medio de la zonificación de aptitud productiva de

especies hortofrutícolas priorizadas en la Región del Biobío. Folleto IREN-CIREN, Centro de Información de Recursos Naturales (Chile). [En línea]. Recuperado en: <<http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26467>>. Consultado el 02 junio de 2021.

Lobos, W. 1986. Antecedentes de propagación del avellano europeo (*Corylus avellana* L.). Ipa Carillanca N°3. [En línea]. Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/31356/NR04764.pdf?sequence=1>>. Consultado el 18 de abril de 2021.

Matese, A., Di Gennaro, S. F., and Berton, A. 2016. Assessment of a canopy height model (CHM) in a vineyard using UAV-based multispectral imaging. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2150–2160.

Mejía de Tafur, M., Zapata, C., Urrego, J., Ibarra, D. y Leal, J. 2017. Efecto del estrés hídrico sobre la acumulación y distribución de biomasa en *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Acta Agron.* 66. 56-62.

Nafarrate, A. 2017. Estimación directa e indirecta del índice de área foliar (IAF) y su modelación con LiDAR en un bosque tropical seco de Yucatán. Una tesis presentada en opción al título Maestro en Ciencias (Ciencias biológicas: Opción Recursos Naturales). Yucatán, México, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Posgrado en Ciencias Biológicas. 95 p.

Norman, J. and Campbell, G. 1989. Page 301 in: *Plant Physiological Ecology*. Edited by Pearcy, R.W., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., and Rundel, P.W. First edition. Chapman and Hall. New York, USA. 457 p.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2022. Estadísticas de frutales Superficie plantada nacional, regional, números de huertos e infraestructura frutícola. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. [En línea] Recuperado en: <<https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>>. Consultado el 29 de marzo del 2021.

Ortega-Farias, S., Villalobos-Soublett, E., Riveros-Burgos, C., Zúñiga, M., and Ahumada-Orellana, L. E. 2020. Effect of irrigation cut-off strategies on yield, water productivity and gas exchange in a drip-irrigated hazelnut (*Corylus avellana* L. cv. Tonda di Giffoni) orchard under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 238, 106173.

Puri, V., Nayyar, A., and Raja, L. 2017. Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of Statistics and Management Systems*, 20, 507–518.

Rioseco, R., y Tesser, C. 2005. Cartografía interactiva de los climas de Chile. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. [En línea] Recuperado en: <[http://www7.uc.cl/sw\\_educ/geografia/cartografiainteractiva/Inicio/Paginas/UntitledFrameset-1.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/Inicio/Paginas/UntitledFrameset-1.htm)>. Consultado el 12 de marzo del 2022.

Rosell, J. R., and Sanz, R. 2012. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 124–141.

Selles, G. y Ferreyra, R. 2006. Sistema de monitoreo de planta. Boletín INIA Chillan- Instituto de invstigacion agropecuaria. [En línea] Recuperado en: <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7138>>. Consultado el 26 de junio del 2021.

Sinha, R., Quirós, J. J., Sankaran, S., and Khot, L. R. 2021. High resolution aerial photogrammetry-based 3D mapping of fruit crop canopies for precision inputs management. *Information Processing in Agriculture*. [En línea] Recuperado en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317321000068>>. Consultado el 21 de marzo del 2022

Stuart, L., Kadriye, K., Bihter, A., Richard, B., and Ipek, B. 2021. A chromosome-scale genome assembly of European Hazel (*Corylus avellana* L.) reveals targets for crop improvement. *The Plant Journal* 105: 1413–1430.

Taiz, L., Zeiger W., E. 2006. Fisiología del estrés. En: Fisiología vegetal. 3a. edición. Castellón de la Plana, España: Universitat Jaume.

Torres-Rua, A. 2017. Use of UAV for support of intensive agricultural management decisions: from science to commercial applications. *Proc. de SPIE* Vol. 10218.

Welles, J. M. 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, 5: 31–43.

Wu, D. 2019. Measuring canopy structure for horticulture tree crops using remote sensing datasets. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Brisbane, Australia, School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland. 118 p.

Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., and Loudjani, P. 2014. Tree height quantification using very high-resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55, 89–99.