



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PRODUCTIVO PARA EL CULTIVO DEL QUILLAY,  
MEDIANTE UNA ÓPTIMA DENSIDAD DE PLANTACIÓN Y USO EFICIENTE DEL RECURSO HÍDRICO.**

**MEMORIA DE TITULO**  
**VANIA LEONOR BARROS BUSTAMANTE**

**TALCA, CHILE**

**2021**

## 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

## HOJA DE APROBACIÓN

APROBACIÓN

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'César Acevedo Opazo', written in a cursive style.

---

Profesor Guía: César Acevedo Opazo, Ingeniero Agrónomo, Doctor y Magister en Ciencias Agronómicas.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Paulo Cañete Salinas', written in a cursive style.

---

Profesor Co-guía: Paulo Cañete Salinas, Ingeniero Agrónomo, Doctor en Ciencias Agrarias

Fecha de presentación de la Defensa de Memoria: 23 de diciembre, 2021

## AGRADECIMIENTOS

En Primer lugar, quiero agradecer a Dios y a mis padres, Beatriz y Ernesto, por darme la oportunidad de estudiar, por su amor y apoyo incondicional en cada momento. Mi padre hoy ya no me acompaña físicamente, pero sé que en el lugar que se encuentre debe estar orgulloso de ver que ya estoy culminando esta etapa.

En especial agradecer a mi hija Sofía y a Valeriano, quien es el hombre que camina de mi mano, gracias por su paciencia, amor y por su apoyo en cada segundo.

Agradecer a mis hermanos Roberto, Nélide, Eugenia y Luis, quienes de distinta manera han sido un apoyo durante mi paso por la universidad.

A mis cuñados José, Catalina y Claudio, gracias por siempre estar presentes en esta maravillosa etapa.

A mi suegra, Sra Magali Riquelme, quien fue parte de este lindo proceso y quien fue mi apoyo en todo momento.

A mis amigas de universidad Victoria, María José y Daniela, quienes siempre me entregaron su apoyo, consejos e hicieron de esta etapa una etapa inolvidable.

A mi amiga de infancia Michele, quien ha estado presente en cada etapa de mi vida.

A mi profesor guía Dr. César Acevedo Opazo y a mi profesor informante Dr. Paulo Cañete Saldías, gracias por la confianza, disposición, paciencia, apoyo y consejos durante la realización de este estudio.

## RESUMEN

El quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) es un árbol nativo endémico de Chile que se caracteriza por su alto contenido de saponinas. La producción de este metabolito, extraído desde la biomasa de quillay se realiza exclusivamente, y casi en un 98% a partir del bosque nativo, lo que implica una sobre explotación de este recurso, convirtiendo a esta actividad en una amenaza para la sobrevivencia de esta especie, Esto hace necesario que se realicen plantaciones comerciales de esta especie. Al ser el quillay un cultivo cuya domesticación está recién comenzando, no se conoce el volumen de agua necesario para su óptimo desarrollo productivo, ni tampoco la densidad de plantación ideal para la obtención de una mayor cantidad de biomasa. El objetivo de este estudio es implementar un sistema de manejo sustentable para el cultivo de quillay, mediante una óptima densidad de plantación y un uso eficiente del recurso hídrico, con la finalidad de maximizar la producción de biomasa de quillay por unidad de superficie, sin afectar negativamente la respuesta fisiológica de la planta. Para esto se sometieron plantas de quillay a dos tratamientos de riego, es decir, T1 (riego optimizado, el cual consistió en dos riegos de 1 hora durante el día (8 AM y 8PM); 8 l/día/planta) y T2 (riego deficitario, el cual consistió en un riego de 1 hora a las 8 AM; 4 l/día/planta); y dos tratamientos de densidad de plantación, es decir, D1 baja densidad (marco de plantación de 1.5m x 2m, es decir, 3.333 plantas/hectárea) y D2 alta densidad (marco de plantación de 0.66m x 2 m, es decir, 8.333 plantas/hectárea). Los resultados indicaron que no sería recomendable realizar una estrategia de riego deficitario controlado en quillay, ya que influiría negativamente sobre el crecimiento vegetativo de esta especie, debido a que las plantas sometidas a riego deficitario presentan potenciales hídricos xilemáticos totales inferiores a los -1,21 MPa, diferenciándolo en un 34% con respecto de un riego óptimo. Por otro lado, evaluando el factor tipo de riego, para la variable diámetro de cuello, las plantas sometidas a un riego optimizado presentaron un crecimiento superior en un 103% en comparación de un riego deficitario. La densidad de plantación no presentó efectos significativos sobre el desarrollo vegetativo del quillay, por lo tanto, al momento de establecer un huerto comercial con esta especie sería recomendable utilizar un sistema de alta densidad de plantación, aumentando la producción de biomasa por superficie.

Palabras claves: *Quillaja saponaria*, saponina, densidad de plantación, potencial hídrico, riego óptimo, riego deficitario.

## ABSTRACT

Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) is a native tree endemic of Chile that is characterized by its high content of saponins. The production of this metabolite, extracted from Quillay biomass, is carried out almost 98% from the native forest, which implies an overexploitation of this resource, making this activity a threat to the survival of this specie. For that reason, it is necessary to do commercial plantations of this specie. As Quillay is a crop whose domestication is just beginning, the volume of water necessary for its optimal productive development is not known, nor is the ideal plantation density to obtain a greater amount of biomass. The objective of this study is to implement a sustainable management system for Quillay cultivation, through optimal planting density and efficient use of water resources, in order to maximize Quillay biomass production per unit area, without affecting negatively the physiological response of the plant. For this reason, Quillay plants were subjected to two irrigation treatments. That is to say, T1 (optimized irrigation, which consisted of two irrigations of 1 hour during the day (8 AM and 8PM); 8 l / day / plant) and T2 (deficit irrigation, which consisted of 1 hour irrigation at 8 AM; 4 l / day / plant); and two treatments of plantation density, that is to say, D1 low density (plantation area of 1.5mx 2m, that is, 3,333 plants / hectare) and D2 high density (plantation area of 0.66mx 2 m, that is, 8,333 plants /hectare). The results indicated that it would not be advisable to effectuate a controlled deficit irrigation strategy in Quillay, since it would influence negatively upon the vegetative growth of this species. As the plants subjected to deficit irrigation present total xylem water potentials lower than -1.21 MPa, differentiating it by 34% with respect to optimal irrigation. On the other hand, evaluating the type of irrigation factor, for the variable neck diameter, the plant subject to optimized irrigation showed growth of 103% compared to a deficit irrigation. The plantation density did not show significant effects on the vegetative development of the Quillay, therefore, at the moment of plant a commercial orchard with this species, it would be advisable to use a high-density plantation system, increasing biomass production per surface area.

Key words: *Quillaja saponaria*, saponin, plantation density, water potential, optimal irrigation, deficit irrigation.

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	11
1.1.	Hipótesis .....	12
1.2.	Objetivo general .....	12
1.3.	Objetivos específicos .....	12
2.	REVISION DE LITERATURA .....	13
2.1.	Cultivo del quillay .....	13
2.2.	Crecimiento del quillay y contenido de saponinas .....	13
2.3.	Propiedades y usos de la saponina .....	14
2.4.	Importancia económica para la extracción de saponinas en quillay .....	14
2.5.	Recurso hídrico .....	15
2.6.	Uso de índices multiespectrales para estimar la expresión vegetativas .....	16
3.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
3.1.	Descripción del sitio experimental .....	18
3.2.	Material vegetal y diseño experimental .....	18
3.3.	Mediciones de campo .....	19
3.3.1.	Potencial hídrico xilemático .....	19
3.3.2.	Medición de intercambio gaseoso en quillay .....	19
3.3.3.	Mediciones de crecimiento .....	20
3.3.4.	Análisis climático y consumo de agua .....	20
3.3.5.	Imágenes satelitales .....	21
3.3.6.	Análisis estadístico .....	22
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	23
4.1.	Mediciones dasométricas .....	23
4.2.	Respuesta fisiológica e hídrica de planta .....	24
4.3.	Análisis de imágenes satelitales .....	31

5.	CONCLUSIÓN.....	36
6.	BIBLIOGRAFIA CITADA .....	37

## INDICE DE CUADROS

CUADRO 1. DISEÑO SITIO EXPERIMENTAL ENSAYO QUILLAY. ....	19
CUADRO 2. DATOS CLIMÁTICOS PROMEDIO MENSUAL PARA FUNDO EL ALMENDRO DURANTE EL PERIODO DE MEDICIONES. ....	20
CUADRO 3. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS VARIABLES DASOMÉTRICAS EN RELACIÓN CON EL TRATAMIENTO DE RIEGO Y DENSIDAD DE PLANTACIÓN. (NIVEL DE SIGNIFICANCIA 0.05. N.S. NO SIGNIFICANCIA. SEPARACIÓN DE MEDIAS TUKEY HSD; DISTINTAS LETRAS INDICAN DIFERENCIAS ESTADÍSTICAS. ....	23

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ECUACIONES PARA CÁLCULO DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN DIFERENCIAL NORMALIZADO (NDVI) E ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO DEL SUELO (SAVI).....	17
FIGURA 2. DISEÑO SITIO EXPERIMENTAL .....	19
FIGURA 3. VOLUMEN DE AGUA A APLICAR EN M <sup>3</sup> /HA SEGÚN TRATAMIENTO.....	21
FIGURA 4. IMAGEN SENTINEL-2 MSI GENERADAS EN ENSAYO QUILLAY. ....	22
FIGURA 5. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE DE CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA (MMOL/M <sup>2</sup> /S) EN DOS TRATAMIENTOS DE RIEGO (RIEGO ÓPTIMO DOS RIEGOS DE 1 HORA DURANTE EL DÍA EQUIVALENTES A 8 L/DÍA/PLANTA Y RIEGO DEFICITARIO DOS RIEGOS DE 1 HORA DURANTE EL DÍA DE 4 L/DÍA/PLANTA). (NIVEL DE SIGNIFICANCIA 0.05. N.S. NO SIGNIFICANCIA. SEPARACIÓN DE MEDIAS TUKEY HSD; DISTINTAS LETRAS INDICAN DIFERENCIAS ESTADÍSTICAS ENTRE LOS TRATAMIENTOS). ....	25
FIGURA 6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE DE POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO (MPA) EN DOS TRATAMIENTOS DE RIEGO (RIEGO ÓPTIMO DOS RIEGOS DE 1 HORA DURANTE EL DÍA EQUIVALENTES A 8 L/DÍA/PLANTA RIEGO DEFICITARIO DOS RIEGOS DE 1 HORA DURANTE EL DÍA DE 4 L/DÍA/PLANTA).....	27
FIGURA 7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE DE CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA (MMOL/M <sup>2</sup> /S) EN DOS TRATAMIENTOS DE DENSIDAD DE PLANTACIÓN (ALTA DENSIDAD DE PLANTACIÓN 0.66M SOBRE HILERA X 2 M ENTRE HILERA Y BAJA DENSIDAD DE PLANTACIÓN 1.5M SOBRE HILERA X 2M ENTRE HILERA). ....	28
FIGURA 8. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE DE POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO (MPA) EN DOS TRATAMIENTOS DE DENSIDAD DE PLANTACIÓN (ALTA DENSIDAD DE PLANTACIÓN 0.66M SOBRE HILERA X 2 M ENTRE HILERA Y BAJA DENSIDAD DE PLANTACIÓN 1.5 M SOBRE HILERA X 2M ENTRE HILERA). ....	30
FIGURA 9. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES NDVI EN RELACIÓN AL CRECIMIENTO EN ALTURA DEL EJE DEL ÁRBOL (CM) PARA T1D2 CORRESPONDIENTE A UN RIEGO OPTIMO EN CONJUNTO DE UNA DENSIDAD DE PLANTACIÓN ALTA. ....	31

FIGURA 10. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES NDVI EN RELACIÓN AL CRECIMIENTO EN ALTURA DEL EJE DEL ÁRBOL (CM) PARA T2D2 CORRESPONDIENTE A UN RIEGO DEFICITARIO EN CONJUNTO DE UNA DENSIDAD DE PLANTACIÓN ALTA. ....	31
FIGURA 11. . ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES NDVI EN RELACIÓN AL CRECIMIENTO EN ALTURA DEL EJE DEL ÁRBOL (CM) PARA T1D1 CORRESPONDIENTE A UN RIEGO OPTIMO EN CONJUNTO DE UNA DENSIDAD DE PLANTACIÓN BAJA.....	32
FIGURA 12. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES NDVI EN RELACIÓN AL CRECIMIENTO EN ALTURA DEL EJE DEL ÁRBOL (CM) PARA T2D1 CORRESPONDIENTE A UN RIEGO DEFICITARIO EN CONJUNTO DE UNA DENSIDAD DE PLANTACIÓN BAJA. ....	32
FIGURA 13. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES SAVI EN RELACIÓN AL CRECIMIENTO EN ALTURA DEL EJE DEL ÁRBOL (CM) PARA T1D2 CORRESPONDIENTE A UN RIEGO OPTIMO EN CONJUNTO DE UNA DENSIDAD DE PLANTACIÓN ALTA. ....	33
FIGURA 14. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES SAVI EN RELACIÓN AL CRECIMIENTO EN ALTURA DEL EJE DEL ÁRBOL (CM) PARA T2D2 CORRESPONDIENTE A UN RIEGO DEFICITARIO EN CONJUNTO DE UNA DENSIDAD DE PLANTACIÓN ALTA. ....	33
FIGURA 15. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES SAVI EN RELACIÓN AL CRECIMIENTO EN ALTURA DEL EJE DEL ÁRBOL (CM) PARA T1D1 CORRESPONDIENTE A UN RIEGO OPTIMO EN CONJUNTO DE UNA DENSIDAD DE PLANTACIÓN BAJA. ....	34
FIGURA 16. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES SAVI EN RELACIÓN AL CRECIMIENTO EN ALTURA DEL EJE DEL ÁRBOL (CM) PARA T2D1 CORRESPONDIENTE A UN RIEGO DEFICITARIO EN CONJUNTO DE UNA DENSIDAD DE PLANTACIÓN BAJA. ....	34

## 1. INTRODUCCIÓN

El quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) es un árbol nativo endémico de Chile, perteneciente a la familia de las Rosaceae, que puede alcanzar hasta los 15 metros de altura. Es una especie que se caracteriza principalmente por su alto contenido de saponinas, metabolito secundario que se concentra principalmente en la corteza, en hasta un 42%. La saponina se utiliza para la obtención de productos concentrados líquidos, los cuales son deshidratados y comercializados como polvo seco. Este extracto base es utilizado para la producción de productos con una mayor elaboración, tales como vacunas e insumos para fotografía. En este último destino se comercializa el 35% de las saponinas producidas (Benedetti *et al.*, 2000).

La saponina es un producto biodegradable, que posee grandes cualidades como agente humectante y emulsionante, siendo la saponina triterpénica el producto comercial más demandado a nivel mundial (De Conchard Vega, 1997). La producción de saponinas en base a biomasa de quillay se realiza exclusivamente, y casi en un 98% a partir del bosque nativo, lo que implica una sobre explotación de este recurso, convirtiendo a esta actividad en una amenaza para la sobrevivencia de esta especie. Actualmente existen plantaciones de quillay no naturales establecidas por el hombre, como medio de compensaciones forestales por la alteración de superficies de bosque nativo debido a obras civiles de gran envergadura (Acevedo y Guerra, 2017).

A la fecha existen algunas experiencias de plantaciones de quillay de baja densidad (entre 300 – 400 plantas por hectárea) con rotaciones proyectadas a 15 años, con el propósito de producir biomasa para la extracción de saponinas, pero los volúmenes producidos y los tiempos de rotación (cosecha), no han incentivado su escalamiento masivo a nivel de productor (Acevedo y Guerra, 2017).

Al ser el quillay un cultivo cuya domesticación está recién comenzando, no se conoce el volumen de agua necesario para su óptimo desarrollo productivo, ni tampoco la densidad de plantación ideal para la obtención de una mayor cantidad de biomasa. Esto pasa a ser un problema de importancia, debido principalmente al cambio climático y al aumento de la demanda de agua por parte del sector agrícola. Según el INIA, (2018), en un boletín emitido para la región del Maule, a pesar de las lluvias presentes en el mes de noviembre, persiste una sequía promedio cercana al 37%. Por otro lado, Chile está constantemente influenciado por los fenómenos ENOS, es decir las oscilaciones climáticas del sur (Fenómeno del Niño y la Niña) (Meza L. *et al.*, 2010), generando una inestabilidad climática constante en la región, potenciando la ocurrencia de eventos extremos con altas temperaturas (olas de calor) y sequías cada vez más recurrentes y severas.

Bajo este escenario, toma especial relevancia la optimización del uso eficiente y ahorro del recurso hídrico a nivel global, siendo indispensable contar con herramientas más objetivas para un adecuado manejo del riego. Por esta razón para mejorar la eficiencia del recurso hídrico es fundamental conocer el comportamiento hídrico del quillay, con el fin de optimizar el riego agrícola, el cual es cada vez más escaso,

de manera de mantenerlos rendimientos actuales, disminuyendo los costos y la huella hídrica en las labores agrícolas.

### 1.1. Hipótesis

Un aumento en la cantidad de agua aplicada mediante riego por goteo generaría un incremento positivo en la respuesta fisiológica de planta, maximizando el crecimiento vegetativo del Quillay. Asimismo, una mayor densidad de plantación no genera una disminución en la respuesta fisiológica de la planta, maximizando la producción de biomasa por unidad de superficie.

### 1.2. Objetivo general

Implementar un sistema de manejo sustentable para el cultivo de quillay, mediante una óptima densidad de plantación y un uso eficiente del recurso hídrico, con la finalidad de maximizar la producción de biomasa de quillay por unidad de superficie, sin afectar negativamente la respuesta fisiológica de la planta.

### 1.3. Objetivos específicos

- Determinar el volumen óptimo de agua a aplicar durante la temporada, maximizando la producción de biomasa del quillay, sin afectar negativamente la respuesta fisiológica de la planta.
- Definir la densidad óptima de plantación, con la finalidad de maximizar el crecimiento vegetativo del quillay, sin afectar la respuesta fisiológica de planta.
- Determinar la relación óptima entre la densidad de plantación y cantidad de agua aplicada durante la temporada agrícola.

## 2. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. Cultivo del quillay

El quillay es un árbol polígamo-monoico o hermafrodita perteneciente a la familia Rosaceae, con flores blanquecinas y aplanadas, dispuestas generalmente en pequeños corimbos terminales o bien solitarias o sobre pedúnculos axilares de 3 a 5 flores. El quillay alcanza hasta 15 m de altura y un metro de diámetro, posee una corteza cenicienta, rasgada longitudinalmente (Rodríguez *et al.*, 1983). Esta especie es endémica de nuestro país, con una amplia distribución en el territorio nacional, desde la provincia de Limarí en la región de Coquimbo, hasta la provincia del Biobío, en la zona litoral, central y andina, desde los 15 a los 1.600 m.s.n.m (Rodríguez *et al.*, 1983). Posee un sistema radical de gran envergadura, tanto en profundidad como horizontalmente, cualidad que le permiten capturar eficientemente los nutrientes y el agua del suelo. Debido a estas características es frecuentemente utilizado para estabilizar suelos y además es considerada una excelente alternativa en procesos de forestación y recuperación de zonas degradadas. Esto se debe a su gran capacidad para establecerse exitosamente en suelos de baja fertilidad y erosionados (INFOR, 2000; Valenzuela, 2007 citado en Correa y Martínez, 2013).

### 2.2. Crecimiento del quillay y contenido de saponinas.

Basado en el trabajo de Mena *et al.*, (2015), las saponinas corresponden a glucósidos hidrosolubles, con propiedades tensoactivas y hemolíticas. Estos metabolitos también pueden ejercer una amplia actividad biológica y farmacológica. Este apreciado compuesto se encuentra distribuido en todos los órganos de la planta, con contenidos de 10 – 19% en corteza, 6,1% en hojas, 8,8% en madera y 10% en ramillas (Martín, 1989). Es por esta razón que se le da un importante valor comercial a esta especie, ya que el alto contenido de saponina que posee la corteza del quillay permite su uso tanto a nivel artesanal como industrial (Cabello, 2004).

### 2.3. Propiedades y usos de la saponina

Como fue discutido anteriormente el quillay se caracteriza principalmente por presentar en su corteza, madera y hojas con altos contenidos de saponinas, las que exhiben variadas propiedades, tanto químicas (espumante natural) como biológicas. Estas propiedades pueden ser utilizadas para la reducción del colesterol, adyuvante en vacunas para humanos y animales, además de vacunas anti – hongos, nematocida natural, supresor de neblina ácida en la industria minera, aditivos para alimentación animal, emulsificante en alimentos, entre otros (Aceituno *et al.*, 2014). Por otro lado, destacan la fabricación de champú, jabón líquido y dentífricos (Rodríguez *et al.*, 1983); productos cosméticos, reveladores fotográficos, bebidas de fantasía, extinguidores de incendio, industria del papel y como medicina especialmente en enfermedades respiratorias y dérmicas (Martín, 1989).

### 2.4. Importancia económica para la extracción de saponinas en quillay

El quillay como especie arbórea se ha destacado entre las especies nativas forestales de la zona central del país, por su gran importancia económica, la cual radica en la multiplicidad de usos que se le puede dar a la producción de biomasa, entre las que destacan la extracción de saponinas desde la corteza del árbol y la comercialización de su biomasa, la que ocurre principalmente a nivel de grandes productores de saponina. Cabe mencionar que los principales abastecedores de materia prima son los propietarios de bosques naturales existentes en el país, encontrándose este recurso notablemente deteriorado debido a esta actividad económica (Benedetti *et al.*, 2000).

En la actualidad, Chile exporta cerca de 2.000 millones de dólares anuales en productos forestales. Sin embargo, estas exportaciones están basadas casi en un 85% en las plantaciones de Pino insigne (*Pinus radiata* D. Don) y Eucalipto (*Eucalyptus spp.*). Para revertir esta situación, el estado, ha iniciado una campaña de diversificación forestal, tendiente a abrir un abanico de especies sobre las cuales se sustente la economía del sector. El uso sustentable del Quillay con fines industriales ampliaría el espectro de especies forestales sobre las cuales se sustentaría el desarrollo futuro del sector forestal de nuestro país (Cruz *et al.*, 2003).

## 2.5. Recurso hídrico

Los bosques son sistemas productivos que demandan importantes volúmenes de recursos hídricos, ya que consumen una gran cantidad de agua una vez que han alcanzado su edad productiva (altura máxima a la que crecerá durante su ciclo de vida) y durante la temporada de crecimiento más activo. La cantidad de agua consumida por los bosques depende también del clima, la topografía, el suelo, la edad del bosque, la composición de las especies y las prácticas de manejo. Tanto la falta de agua (como resultado de precipitaciones insuficientes o una disminución del agua subterránea disponible) como su exceso (es decir, encharcamientos) pueden tener efectos negativos en el estado sanitario y en el desarrollo de los bosques (FAO, 2013). Según Vita, (1990) y Benedetti *et al.*, (2000), citado en Valenzuela, (2007), la sobrevivencia durante el primer período vegetativo depende de la cantidad y la distribución de las precipitaciones caídas durante el año, debido a que en las plantaciones de quillay se debe considerar un riego inicial durante los dos primeros años, aplicando 5 litros/planta/día durante el período estival, debido a que son sensibles a la falta de agua.

En un estudio publicado por Muñoz y Navarro en el año 2011, se estableció que la capacidad de los embalses en la Región del Maule para almacenar agua es alta respecto de otras regiones del país. Pese a esto, se observa también que el promedio histórico de 2.065 millones de m<sup>3</sup>, está por debajo de la capacidad máxima que supera los 2.600 millones de m<sup>3</sup>. Por lo tanto, existen excedentes de agua que no están siendo aprovechadas, pues las precipitaciones no alcanzan para que los embalses lleguen a sus niveles máximos.

Según la DGAC (2021), en el reporte anual de la evolución del clima en Chile, las precipitaciones se han presentado bajo el promedio 1961-1990 (Promedio climatológico recomendado por la OMM) de manera continua desde el año 2007 alcanzando en 2020 un déficit de 26% en promedio. El año 1998 continúa siendo el que presentó el mayor déficit a nivel nacional desde 1961 con un 52 % de déficit seguido por 2019 que alcanzó un 39 % de déficit. El período decadal 2010-2019 es el más seco desde 1961 alcanzando un promedio de 20.6 % de déficit a nivel nacional, superando en 0.2% el período 2011-2020, esta última década promedia a nivel nacional un 20.4 % de déficit. Algunas de las principales señales de la implicancia del cambio climático en el clima en Chile, son la temperatura máxima y el déficit de precipitación. La precipitación total anual en el país (258 estaciones) está disminuyendo a razón de un 3% por década durante los últimos 60 años, tendencia que se incrementa a -7 % por década al considerar los últimos 40 años.

Los déficits de precipitación desde el 2007 (14 años consecutivos) han sido favorecido al empeoramiento de la sequía en Chile, siendo la falta de lluvias una de las principales causas. En términos del índice estandarizado de sequía; el cual permite comparar a nivel nacional las zonas con mayor impacto producto de la falta de precipitación; el 2020 fue en general un mejor invierno que el ocurrido en el 2019 (DGAC, 2021).

En un estudio realizado por Donoso *et al.*, (2011), se dice, que el déficit hídrico afecta varios aspectos del funcionamiento de las plantas, desde el metabolismo celular (incluyendo la fotosíntesis) hasta el

crecimiento. Según Woodruff *et al.*, (2004) y Dickson y Tomlinson, (1996), citado en Donoso *et al.*, 2011, el transporte de agua en la planta es una parte integral del proceso de crecimiento, este proceso incluye la formación y expansión de las células vegetales, que son altamente dependientes de la presión de turgor y del volumen celular. Por tanto, las relaciones existentes entre las variables hídricas, fotosíntesis y conductancia estomática son aspectos clave para la comprensión del proceso de tolerancia de las plantas al estrés.

## 2.6. Uso de índices multispectrales para estimar la expresión vegetativas.

Para estimar las dinámicas en el comportamiento vegetacional de especies agrícolas y forestales, es cada vez más común el uso de imágenes satelitales, a través de la implementación de índices multispectrales. El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), tiene como objetivo separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse *et al.*, 1974). La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR). Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas. Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores (Díaz, 2015).

Por otro lado, el índice de vegetación ajustado del suelo (SAVI), también considera la reflectividad del suelo y permite aislar la información que aporta la vegetación. Para lograr el objetivo de separar las radiancias del suelo y la vegetación, se añadió una constante L al denominador del NVDI, donde L puede tomar valores entre 0 y 1, dependiendo de la densidad de la vegetación (valores más altos del índice, para densidades más bajas). Para mantener el mismo rango de variación que el NDVI, el resultado debe multiplicarse por  $1 + L$ . Huete (1988), basándose en un modelo de transferencia radiativa, mostró que un valor de  $L = 0,5$  permite mejorar el ajuste (CIREN, 2013).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}$$

$$\text{SAVI} = (1 + L) (\text{NIR} - \text{R})$$

Figura 1. Ecuaciones para cálculo de índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) e índice de vegetación ajustado del suelo (SAVI).

Donde NIR = Banda infrarroja cercana (canal 8), resolución espectral 842 nm, resolución espacial 10 m; R = Banda roja (canal 4), resolución espectral 665 nm, resolución espacial 10 m, L= componentes del brillo del suelo (0,5). Información de referencia para Sentinel-2.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción del sitio experimental.

El estudio se llevó a cabo durante la temporada 2019-2020 en el rodal experimental fundo El Almendro, perteneciente a la arrocera Vitacura, ubicado en la localidad de Retiro, provincia de Linares, Región del Maule, Chile (35° 54'54.7" S 71° 47'37.4" W). El sitio experimental tiene una dimensión de 3.600 m<sup>2</sup>.

En cuanto a las características edafoclimáticas, la Provincia de Retiro presenta suelos de origen volcánico de textura franco a franco–arcillosa. Estos suelos presentan una topografía plana, alta fertilidad natural, permeabilidad moderadamente lenta, escurrimiento superficial muy lento, pedregosidad, salinidad nula, fácil acceso al riego por afluentes naturales y capacidad de uso I, II y III de riego dependiendo de la ubicación. En cuanto a las condiciones medioambientales presenta un clima mediterráneo, con una estación seca prolongada de 6 meses y temperaturas que oscilan entre 8° C para la época invernal y 31° C para la estival, con un total de precipitaciones de 1.150 mm para un año normal (CIREN CORFO, 1997).

#### 3.2. Material vegetal y diseño experimental

El estudio incluyó a la especie Quillay, la cual fue sometida a dos tratamientos de riego y dos tratamientos de densidad de plantación (diseño factorial). Para los tratamientos de riego, se utilizó riego por goteo, con un gotero por planta de 4 l/hr. Así, los tratamientos de riego corresponden a T1 (riego optimizado, el cual consistió en dos riegos de 1 hora durante el día (8 AM y 8PM); 8 l/día/planta) y T2 (riego deficitario, el cual consistió en un riego de 1 hora a las 8 AM; 4 l/día/planta). En cuanto a los tratamientos de densidad, estos corresponden a D1 baja densidad (marco de plantación de 1.5m x 2m, es decir, 3.333 plantas/hectárea) y D2 alta densidad (marco de plantación de 0.66m x 2 m, es decir, 8.333 plantas/hectárea). Por lo tanto, el diseño factorial queda ordenando según lo presentado en el cuadro 1 y figura 2.



Figura 2. Diseño sitio experimental

Cuadro 1. Diseño sitio experimental ensayo Quillay.

T1D1	Riego óptimo, baja densidad de plantación
T1D2	Riego óptimo, alta densidad de plantación
T2D1	Riego deficitario, baja densidad de plantación
T2D2	Riego deficitario, alta densidad de plantación

### 3.3. Mediciones de campo

#### 3.3.1. Potencial hídrico xilemático.

Para caracterizar el estado hídrico del quillay, se midió el potencial hídrico xilemático al medio día ( $\Psi_x$ ) utilizando una cámara de presión Scholander (PMS Instrument Co., modelo 1000, Corvallis, Oregon, USA; Scholander *et al.*, 1965). Esta medición se realizó en cada uno de los tratamientos, para lo cual en cada unidad experimental se seleccionaron 3 hojas expuestas al sol, ubicadas entre la base, y el tercio medio de las plantas. Estas fueron cubiertas con una lámina de plástico para evitar el intercambio gaseoso, y luego con un papel de aluminio para evitar el proceso de fotosíntesis y el calentamiento de las hojas, de tal forma de lograr un equilibrio entre el potencial hídrico del tallo y de la hoja. En total se llevaron a cabo seis mediciones por tratamiento durante la temporada.

#### 3.3.2. Medición de intercambio gaseoso en quillay.

Para caracterizar la respuesta fisiológica de la planta (conductancia estomática ( $g_s$ )) en las distintas estrategias de manejos hídricos, se utilizó un Porómetro (PMR-5 PP-System, USA y (CIRAS-2, PP-System, USA). Esta medición se realizó en cada uno de los tratamientos de riego, para lo cual, en cada unidad experimental, se seleccionaron tres hojas, ubicadas entre la base, y el tercio medio de la planta. Las

mediciones de intercambio gaseoso fueron llevadas a cabo de manera simultánea a las mediciones del potencial hídrico xilemático de medio día.

### 3.3.3. Mediciones de crecimiento.

Para determinar el efecto de los tratamientos de riego sobre el crecimiento de los árboles de quillay en las variables de planta:

- i. Diámetro del cuello
- ii. Altura del eje y largo de brote

Estas mediciones fueron llevadas a cabo mediante la utilización de un pie de metro y una cinta métrica respectivamente, según la metodología propuesta por Barría (2011), en un intervalo de tiempo de 14 días.

### 3.3.4. Análisis climático y consumo de agua.

Para caracterizar el comportamiento de las variables climáticas y las entradas de agua por precipitaciones, se utilizó la información climática recolectada de una estación meteorológica automática (EMA, marca Adcon Telemetría, modelo A730, Klosterneuburg, Austria) ubicadas en el fundo El Almendro perteneciente a la arrocera Vitacura (Cuadro 2). La EMA entregó información climática básica de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento en intervalos de 15 minutos. Esta información fue utilizada para calcular la  $ET_0$  utilizando el modelo de Penman-Monteith (FAO, 1998).

*Cuadro 2. Datos climáticos promedio mensual para fundo El Almendro durante el periodo de mediciones.*

Variable	Diciembre	Enero	Febrero
Horas de frío	0	0	0
Grados día	7	10,5	9,45
Evapotranspiración	4	6	5,05
T° C Min	8,6	10,85	8,15
T° C Max	25	29,3	30,7
Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	21	31,5	28,5
HR % Min	37	24,8	25,2

HR %Max	95	93,65	90,65
Precipitaciones (mm/m <sup>2</sup> )	0	0	0
Dirección del viento (Grados)	86	41,15	82,7
Velocidad del viento (km/h)	17	15,5	11,55

En lo que respecta a las entradas de agua artificiales al sistema (riego), fueron medidas utilizando un contador volumétrico marca Woltman de 2", ubicado en los cabezales de cada uno de los tratamientos de riego aplicados. La cantidad de agua aplicada en cada uno de los tratamientos se observa en el Figura 3.

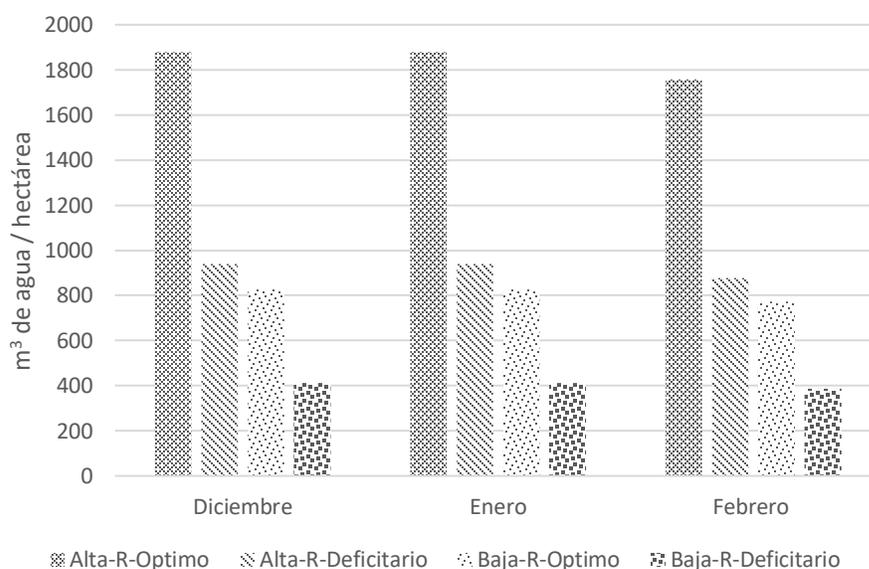


Figura 3. Volumen de agua a aplicar en m<sup>3</sup>/ha según tratamiento.

### 3.3.5. Imágenes satelitales.

Adicionalmente para estimar la expresión vegetativa de las plantas de quillay, se calcularon índices espectrales, los cuales fueron correlacionadas con el crecimiento del brote en cada uno de las plantas evaluadas. Para esto se obtuvo una serie de imágenes satelitales del sensor Sentinel-2 MSI (Drusch *et al.*, 2012) para el mismo día o cerca de cada una de las fechas de medición para el largo de brote.

Las imágenes fueron descargadas utilizando el visor de visualización global de USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) y fueron seleccionadas cuidadosamente en días despejados (sin nubes) y corregida geométrica y radiométricamente. Además, las imágenes fueron corregidas atmosféricamente utilizando el algoritmo sen2cor (Louis *et al.*, 2016) para obtener la reflectancia de la superficie. Finalmente, se extrajo un total de 13 bandas espectrales utilizando el software QGIS versión 3.12. Cada imagen de satélite

utilizada tiene una resolución espacial de 10 m, mientras que cada punto de medición una dimensión de 20 x 20 m, por lo que la superficie estaba representada por aproximadamente 4 píxeles (Cañete *et al.*, 2020).

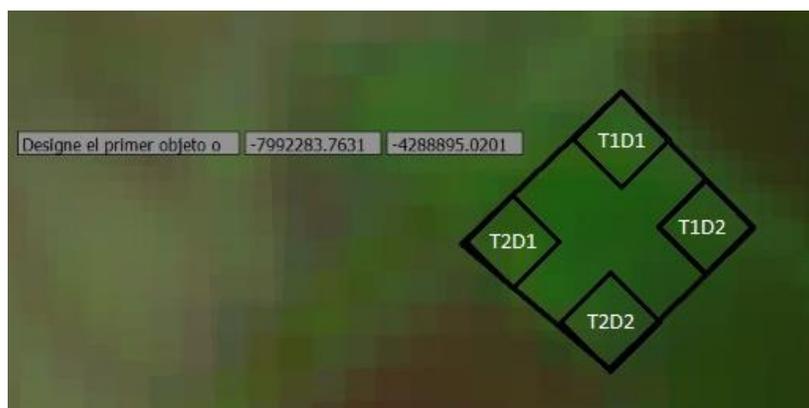


Figura 4. Imagen sentinel-2 MSI generadas en ensayo quillay.

Una vez extraídas las bandas espectrales y utilizando la calculadora Raster disponible en Qgis, se calcularon los índices de vegetación NDVI y SAVI, respectivamente. Mediante la fórmula presentada en la figura 1, se obtuvieron tres resultados por tratamiento y fecha (los cuales fueron promediados). Con la información obtenida se procede a comparar los resultados obtenidos mediante un gráfico los índices por separado en seis fechas diferentes, con el crecimiento del eje de quillay. Para comparar la correlación existente entre el índices espectral y largo de brote, se confeccionó una regresión lineal para cada uno de los casos antes expuestos, además se calculó el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) (Mayer & Butler., 1993).

### 3.3.6. Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para evaluar las diferencias entre las variables estudiadas, para esto se utilizó el software Statgraphic Centurión XVI. En el caso de encontrar diferencias significativas entre los tratamientos, para la separación de medias se utilizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (valor- $p \leq 0.05$ ). Para evaluar la homogeneidad de las varianzas se utilizó la prueba de Levene (valor- $p \geq 0.05$ ).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Mediciones dasométricas.

Se realizó un ANDEVA simple, en el cual se evaluaron las diferencias de crecimiento para el diámetro del cuello (mm) y largo del eje (cm) en relación con los tratamientos de riego aplicado (óptimo – deficitario) y de densidad de plantación (alta – baja). En el cuadro 3 se presenta los resultados.

*Cuadro 3. Análisis de varianza para las variables dasométricas en relación con el tratamiento de riego y densidad de plantación. (Nivel de significancia 0.05. n.s. No significancia. Separación de medias Tukey HSD; Distintas letras indican diferencias estadísticas.*

Tratamiento	Diámetro del cuello (mm)	Largo del eje (cm)
TIPO DE RIEGO		
Riego óptimo	19,37 <sup>a</sup>	49,1
Riego deficitario	9,54 <sup>b</sup>	31,3
Significancia	*	n.s.
DENSIDAD DE PLANTACIÓN		
Densidad alta	18,08	42,75
Densidad baja	10,83	37,0
Significancia	n.s.	n.s.

Al analizar la variable de diámetro de cuello (DAC), se observa que entre un riego óptimo y un riego deficitario existen diferencias estadísticas significativas (valor-p  $\leq$  0,05). Para el tratamiento de riego óptimo se observa un mayor diámetro del cuello (19,37 mm), en comparación con el tratamiento de riego deficitario (9,54 mm), con un aumento del 103% para la variable evaluada. Resultados similares fueron obtenidos por Luna (2006), quien seleccionó 39 individuos de quillay de dos años de edad en macetas los cuales fueron distribuidas al azar en un sitio abierto de un vivero, manteniéndolas a capacidad de campo durante un mes, los cuales, después del período de adaptación, fueron sometidos a los siguientes tratamientos: 21 individuos con riego restringido hasta alcanzar un potencial hídrico de base cercano a  $-3,5$  MPa (Tratamiento con déficit

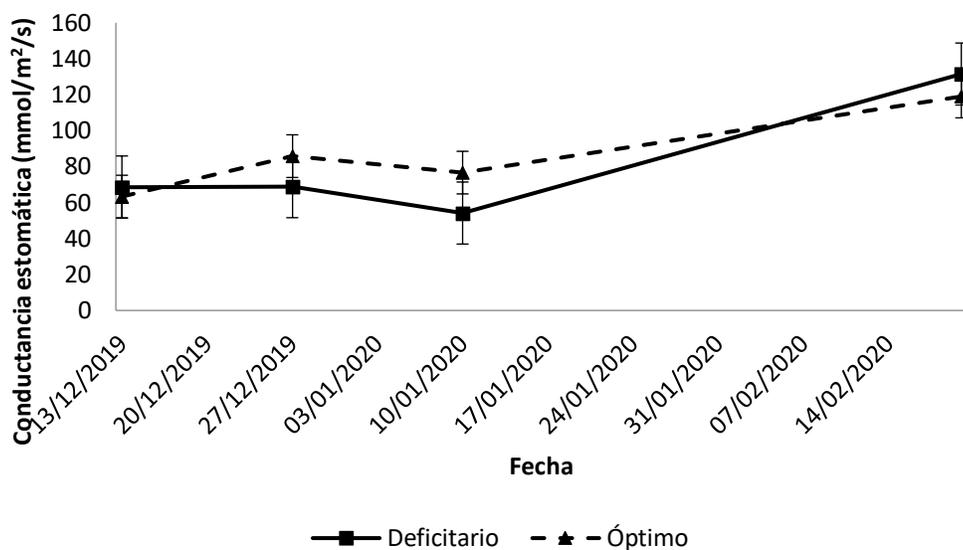
hídrico = T1) y como testigo se utilizaron 15 individuos con riegos frecuentes a capacidad de campo (Testigo = T0), obteniendo diferencias significativas entre los tratamientos de un 48% en el crecimiento del diámetro de cuello. De igual forma Ilabaca (2008), seleccionó 63 plantas de *Peumus boldus* Mol. de 3 años, las cuales fueron trasplantadas y ubicadas bajo condiciones ambientales naturales, en un sitio sin cubierta en un vivero. De estas plantas se seleccionaron al azar 40 individuos, los cuales fueron sometidos a restricción hídrica controlada (tratamiento de restricción hídrica = TR) y 20 individuos manejados con un aporte hídrico regular (tratamiento control = TC), obteniendo una diferencia significativa de un 78% en lo que corresponde a DAC entre ambos tratamientos. La reducción del DAC en las plantas estresadas, se debe a la disminución del contenido hídrico celular. Este aspecto ha sido documentado por varios autores (Kozlowski, 1967, Klepper et al., 1971, Molz y Klepper, 1972), que han evaluado el comportamiento de plantas sometidas a un período de sequía o reducción del aporte hídrico (Luna, 2006).

En cuanto a la variable largo del eje en relación a los tratamientos de riego aplicados, no se observan diferencias estadísticas significativas (valor  $p \leq 0,05$ ) entre los tratamientos, aunque se observa una tendencia de mayor crecimiento para el riego optimizado, con 18 cm más en relación con el largo promedio, equivalente a 57% de diferencia entre los tratamientos. De estos resultados podemos desprender que el crecimiento en altura de quillay, se ve afectado al ser expuesto a un riego deficitario. Resultados similares obtuvo Luna (2006), que como se mencionó anteriormente, en un estudio realizado en plantas de quillay sometidas a restricciones hídricas, las cuales fueron comparadas con plantas manejadas con riegos a CC, se observaron diferencias de 70% entre los tratamientos de riego. Esta diferencia en altura del eje podría estar explicada por las condiciones edafoclimáticas a las que fueron expuesta la planta (Clima y suelo), riego y edad de las plantas.

Finalmente, para el factor densidad de plantación en relación con la variable diámetro del cuello y largo del eje no se observaron diferencias estadísticas significativas (valor- $p \leq 0,05$ ). Por lo tanto, una mayor densidad de plantas sobre hilera no generaría un efecto negativo sobre el crecimiento vegetativo de las plantas. Este resultado es relevante, ya que para las condiciones edafoclimáticas de Retiro sería posible proponer un sistema productivo con una mayor densidad de plantación, generando de esta manera mayor volumen de biomasa de quillay por unidad de superficie.

#### 4.2. Respuesta fisiológica e hídrica de planta.

Se realizó un ANDEVA simple, en el cual se evaluaron las variables de conductancia estomática ( $\text{mmol/m}^2/\text{s}$ ) y potencial hídrico xilemático (MPa) en relación al tipo de riego (Óptimo – deficitario) y a la densidad de plantación (Alta – baja). Los resultados se presentan en las figuras 4, 5, 6 y 7.



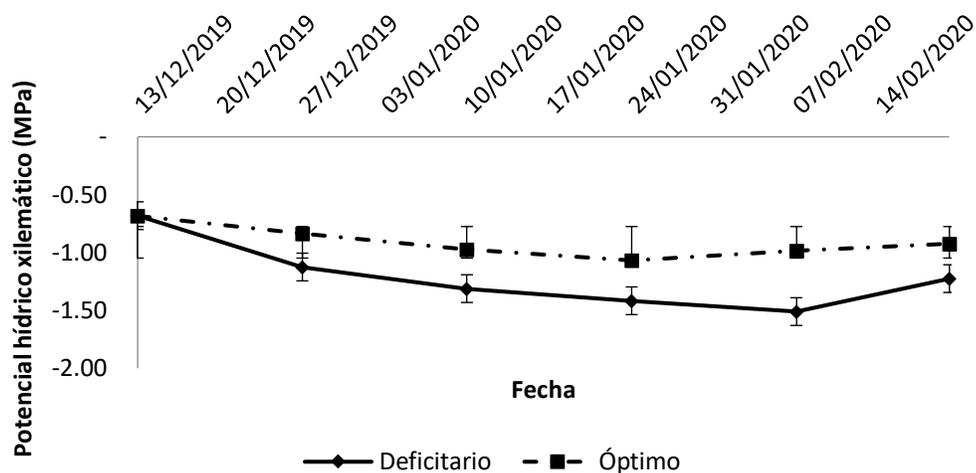
Fecha	13-12-19	27-12-19	10-01-20	24-01-20	07-02-20	20-02-20	Total temporada
Riego óptimo	63,33	85,83	80,60 a	-	-	119,0	87,47
Riego deficitario	68,66	68,83	54,16b	-	-	131,5	80,79
Significancia	n.s.	n.s.	*	-	-	n.s.	n.s.

Figura 5. Análisis de varianza para la variable de conductancia estomática (mmol/m<sup>2</sup>/s) en dos tratamientos de riego (Riego óptimo dos riegos de 1 hora durante el día equivalentes a 8 l/día/planta y riego deficitario dos riegos de 1 hora durante el día de 4 l/día/planta). (Nivel de significancia 0.05. n.s. No significancia. Separación de medias Tukey HSD; Distintas letras indican diferencias estadísticas entre los tratamientos).

La evaluación de los tratamientos de riego tanto óptimo como deficitario, fueron realizadas en seis momentos diferentes de la temporada, siendo la fecha número tres (10 enero 2020), el último día en que se evaluó conductancia estomática con riego diferenciado entre los tratamientos aplicados. Este se debió a que posterior a la fecha mencionada se generaron problemas con el suministro de agua y el sistema de riego, debido a la poca agua caída y embalsada durante la época invernal. Cabe mencionar que al comienzo de la temporada no se observaron diferencias significativas en conductancia estomática para ninguno de los tratamientos de riego, pero al avanzar la temporada se comenzó a observar diferencias, siendo el tratamiento con riego deficitario el que presentó el menor valor de conductancia estomática (54,16 mmol/m<sup>2</sup>/s) en comparación con el riego óptimo (80,60 mmol/m<sup>2</sup>/s), para la medición realizada el 10-01-20. Estos resultados se explican debido que a mayor déficit hídrico se observa un menor intercambio gaseoso en las plantas, por lo cual los estomas se tienden a cerrar para evitar así la pérdida de agua y deshidratación prematura de los tejidos vegetales.

Si bien no se observan diferencias estadísticas entre los tratamientos de riego en la mayor parte de las fechas de medición, existe una tendencia a presentar una mayor tasa de intercambio gaseoso en el tratamiento con riego optimizado. Estos resultados concuerdan con los reportados por Donoso *et al.*, (2011), en un trabajo realizado tanto en quillay como peumo, en plantas de dos años. En esta investigación seleccionaron 40 individuos de cada especie, de forma aleatoria, donde 15 plantas correspondieron al tratamiento testigo con un riego regular y los 25 restantes fueron sometidas a restricción hídrica. Cabe destacar que el seguimiento y control de la pérdida de humedad del sustrato se realizó cada dos días, mediante la determinación del contenido hídrico en la maceta. Las plantas del tratamiento testigo se mantuvieron con valores de contenido hídrico del sustrato entre 75 y 100% durante todo el ensayo, mientras que a los individuos del tratamiento con restricción se les suspendió el riego y fueron evaluados periódicamente hasta llegar a un valor del 40%. Posterior a esto, la suspensión del riego se prolongó durante un mes, hasta alcanzar un potencial hídrico antes del amanecer cercano a los -3,5 MPa. Realizado esto, se observó una respuesta negativa en la tasa de intercambio gaseoso de ambas especies evaluadas al ser sometidas a una condición de restricción hídrica. Las variables de intercambio gaseoso, tales como tasa de asimilación, conductancia estomática y transpiración, también experimentaron una drástica reducción en sus valores en plantas sometidas a restricción hídrica.

Al finalizar la temporada se observa un aumento en la conductancia estomática de las plantas con riego deficitario, en comparación con las plantas bajo riego óptimo, debido a que en este punto de la temporada ambos tratamientos no recibieron aportes de agua mediante riego. Las plantas con riego restringido presentan un crecimiento y acumulación de biomasa sustantivamente menor que las plantas sometidas a un aporte hídrico permanente. Bajo condiciones de déficit hídrico, el quillay disminuye significativamente la relación biomasa aérea/biomasa radical, debido a la defoliación que sufre y al incremento de la biomasa de raíces (Donoso *et al.*,2011).



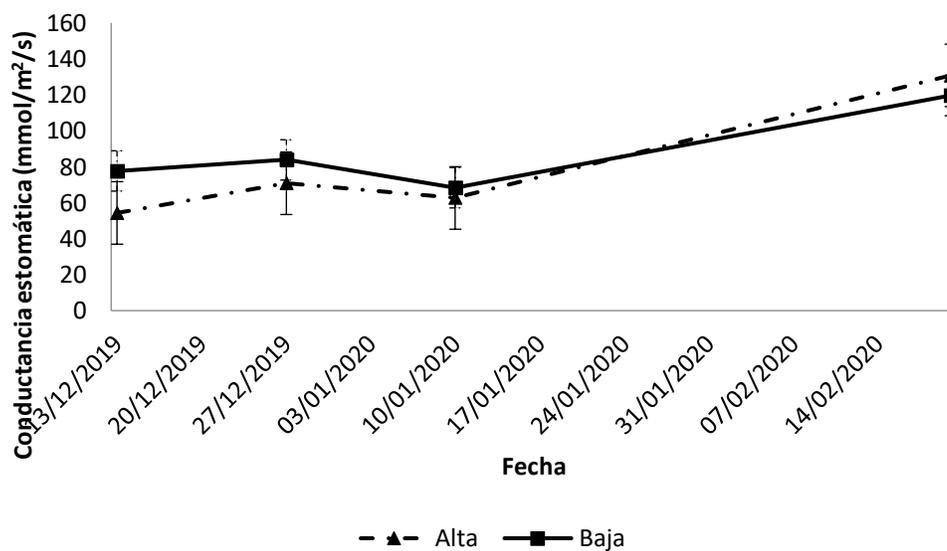
Fecha	13-12-19	20-12-19	10-01-20	24-01-20	07-02-20	20-02-20	Total temporada
Riego óptimo	-0,68	-0,83a	-0,97a	-1,07a	-0,98a	-0,92a	-0,90b
Riego deficitario	-0,68	-1,12b	-1,31b	-1,41b	-1,51b	-1,22b	-1,21a
Significancia	n.s	*	*	*	*	*	*

Figura 6. Análisis de varianza para la variable de potencial hídrico xilemático (MPa) en dos tratamientos de riego (Riego óptimo dos riegos de 1 hora durante el día equivalentes a 8 l/día/planta riego deficitario dos riegos de 1 hora durante el día de 4 l/día/planta).

El resultado de interacción entre el potencial hídrico xilemático y el tratamiento de riego no presentaron diferencias estadísticas significativas a inicio de temporada, pero a medida que esta avanza, las diferencias comenzaron a ser significativas. Las plantas sometidas a riego deficitario presentan potenciales hídricos xilemáticos totales inferiores a los -1,21 MPa, en comparación con aquellas plantas sometidas a un riego óptimo con valores de -0,90 MPa, mostrando diferencias de un 34%. Resultados similares fueron obtenidos por Luna (2006) en plantas de quillay e Ilabaca (2008) en plantas de *Peumus boldus* y Guajardo (2010) en *Litrhaea caustica*, cuyos tratamientos sometidos a una restricción hídrica importante presentaron diferencias significativas, alcanzando potenciales xilemáticos del orden de -3,3 MPa, -3,7MPa y -1,4 MPa respectivamente. Estas diferencias se acentúan aún más en la medida que el déficit hídrico va aumentando, lo que gatilla el cierre estomático, ya que los estomas son altamente sensibles a variaciones del estado hídrico al que se encuentra sometida la planta, limitando el intercambio gaseoso entre la cavidad sub estomática y la atmósfera (Yoon&Ritcher, 1990), actuando como un mecanismo de defensa a nivel fisiológico de la planta. Los resultados obtenidos en estudios similares demuestran que quillay puede alcanzar valores más restrictivos de potencial hídrico xilemático, por lo que hubiera sido interesante haber generado mayores niveles de estrés

hídrico en este estudio. Una mayor restricción hídrica hubiera generado una mayor diferencia en el crecimiento de los brotes y el DAC.

El proceso de cierre de los estomas ocurre cuando el mesófilo comienza a sufrir deshidratación, además se encuentra regulado por el ácido abscísico (ABA) (Leung y Giraudat 1998, citado en Moreno 2009). El contenido de ABA en la hoja se incrementa debido a la descompartmentalización y redistribución desde los cloroplastos de las células del mesófilo y a la síntesis y transporte desde las raíces, siendo liberado al apoplasto para llegar a las células guarda a través de la corriente de transpiración (Zhang y Outlaw, 2001, citado en Moreno 2009). El cierre estomático va a generar un descenso de las tasas fotosintética y una disminución del transporte de agua en el xilema. Ello a su vez, implica un descenso del transporte, por flujo en masa, de los elementos absorbidos en la raíz, hacia el resto de la planta (Shaner y Boyer, 1976).



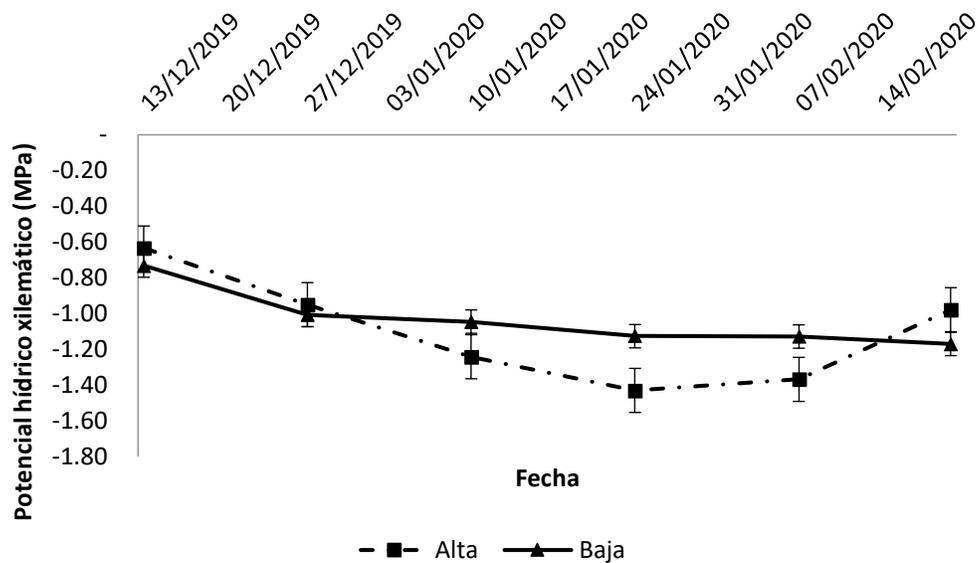
Fecha	13-12-19	13-12-19	10-01-20	24-01-20	07-02-20	20-02-20	Total temporada
Alta densidad	54,33	70,83	62,66	-	-	130,83	79,66
Baja densidad	77,66	83,83	70,4	-	-	119,66	88,65
Significancia	n.s	n.s.	n.s.	-	-	n.s.	n.s.

Figura 7. Análisis de varianza para la variable de conductancia estomática (mmol/m<sup>2</sup>/s) en dos tratamientos de densidad de plantación (Alta densidad de plantación 0.66m sobre hilera x 2 m entre hilera y baja densidad de plantación 1.5m sobre hilera x 2m entre hilera).

Al evaluar la relación conductancia estomática y densidad de plantación, se observó que tanto al comienzo de la temporada como al final de esta, los valores se mantienen estables, sin presentar diferencias estadísticas significativas durante toda la temporada de estudio. Sin embargo, cabe destacar que al finalizar la

temporada se observa la tendencia de mayores valores de conductancia estomática en los tratamientos con mayor densidad de plantación, con diferencias de 9,3%. Estos resultados tienen mucha relevancia, ya que la variable de conductancia estomática no se vio afectada significativamente por una mayor densidad de plantación, pudiendo de esta manera proponer una plantación de alta densidad, lo que permitiría producir un mayor volumen de biomasa por unidad de superficie, lo que se traduciría en un mayor porcentaje de saponinas extraídas por hectárea al momento de la cosecha.

Si bien no existen otros estudios en quillay donde se haya evaluado densidad de plantación, si es posible encontrar investigaciones similares en otras especies arbóreas de rápido crecimiento como álamo. En este contexto, Toillon *et al.*, (2013), encontró resultados disímiles. En este estudio se utilizaron 56 genotipos de *Populus deltoides* x *P. nigra*, plantados bajo SRC (Matorrales de rotación corta) con una densidad de plantación de 2 m x 3,5 m y SRF (Sistemas forestales de rotación corta) con una densidad de plantación de 0,75 m x 2 m, los cuales fueron replicados en dos sitios con condiciones climáticas distintas. Los árboles no recibieron riego durante el primer año, pero durante el segundo año recibieron precipitaciones de verano que alcanzan los 382 mm en el sitio ubicado en el norte de Francia en Échigey (ECH) y 189 mm en el sitio ubicado en Saint - Cyr-en-Val (SCV). Los efectos de densidad de plantación sobre el crecimiento y la eficiencia de transpiración en álamo, dependen de las características del sitio (Fertilidad y disponibilidad de agua). Cuando las condiciones del suelo fueron favorables, el aumento de la densidad de plantación se acentúa principalmente en la competencia de las plantas por la luz, lo que da como resultado que los árboles muestren una mayor altura de tallo y menor eficiencia de transpiración. Asimismo, cuando la disponibilidad de agua en el suelo se vuelve limitante, el aumento de la densidad de plantación acentúa la competencia de las plantas por agua, lo que da como resultado que los árboles muestren una altura de tallo limitada y una eficiencia de transpiración más alta. Como resultado de este estudio, se infirió que la densidad de plantación afecta los rasgos relacionados con el crecimiento de los árboles, y esta mediado por la competencia en la adquisición de recursos. Por su parte, Benomar *et al.* (2011), citado en Toillon *et al.*, (2013) hace referencia, que en dos genotipos de álamo, las tasas de fotosíntesis se encuentran saturadas de luz en arboles cultivados en espaciamiento más cercano (10.000 árboles por há), por el contrario, en árboles que crecen a baja densidad de plantación (400 – 1100 árboles por há) fueron menores. Mientras que no observo ningún efecto significativo para la conducción estomática, lo que sugiere que la eficiencia intrínseca del uso de agua del suelo fue de menor a mayor densidad de plantas.



Fecha	13-12-19	13-12-19	10-01-20	24-01-20	07-02-20	20-02-20	Total temporada
Alta densidad	-0,63	-0,95	-1,24	-1,42	-1,36	-0,97	-1,09
Baja densidad	-0,73	-1,00	-1,04	-1,12	-1,12	-1,17	-1,03
Significancia	n.s.						

Figura 8. Análisis de varianza para la variable de potencial hídrico xilemático (MPa) en dos tratamientos de densidad de plantación (Alta densidad de plantación 0.66m sobre hilera x 2 m entre hilera y baja densidad de plantación 1.5 m sobre hilera x 2m entre hilera).

La variable de potencial hídrico xilemático no se ve afectado por diferencias en la densidad de plantación. En la Figura 7 podemos observar que, al comienzo de la temporada, tanto la plantación de alta densidad como baja presentan valores de estado hídrico similares, sin observar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, pero al ir avanzando durante la temporada, la baja densidad de plantación incrementa los valores de potencial hídrico xilemático por sobre el tratamiento de alta densidad en 6%, sin llegar a presentar diferencias estadísticas significativas. Por lo tanto, la densidad de plantación tampoco tendría un efecto significativo sobre la respuesta hídrica de la planta, sobre todo considerando que, para el diseño del experimento, se consideró sólo un gotero por planta.

### 4.3. Análisis de imágenes satelitales

Para caracterizar la expresión vegetativa de las plantas se realizó un análisis utilizando imágenes satelitales (sensor Sentinel-2 MSI), en el cual se evaluaron los valores de expresión vegetativa, a través de índices de vegetación como NDVI y SAVI en relación específicamente con la altura del eje del árbol, para los diferentes tratamientos evaluados.

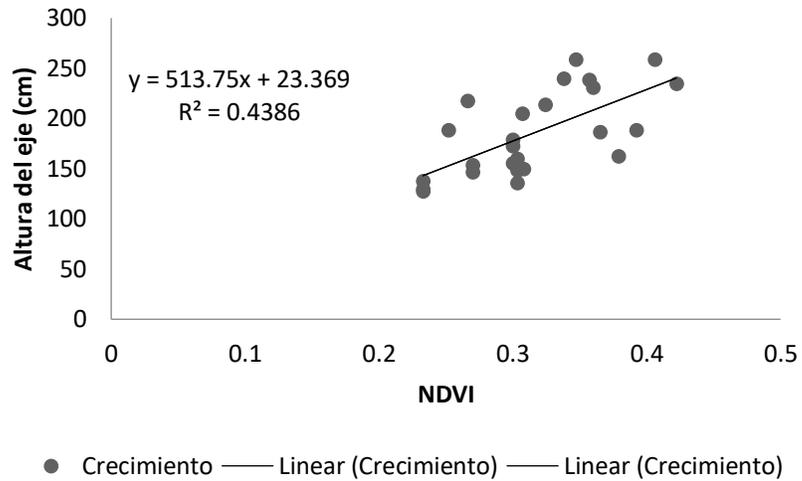


Figura 9. Análisis de imágenes satelitales NDVI en relación al crecimiento en altura del eje del árbol (cm) para T1D2 correspondiente a un riego óptimo en conjunto de una densidad de plantación alta.

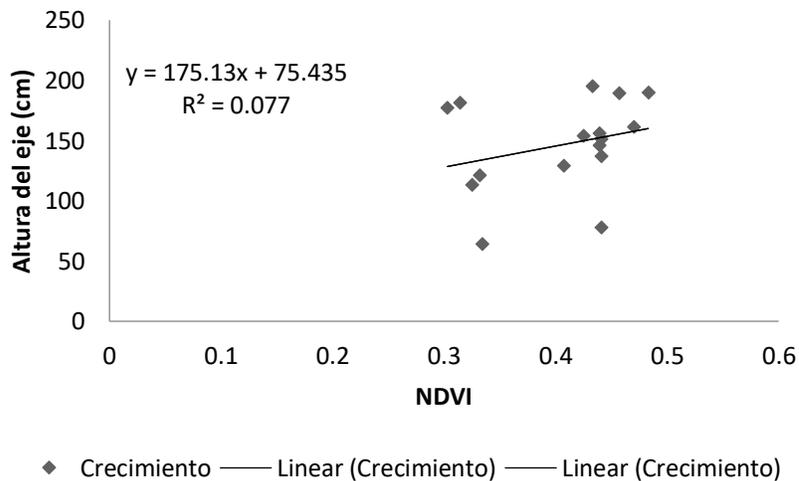


Figura 10. Análisis de imágenes satelitales NDVI en relación al crecimiento en altura del eje del árbol (cm) para T2D2 correspondiente a un riego deficitario en conjunto de una densidad de plantación alta.

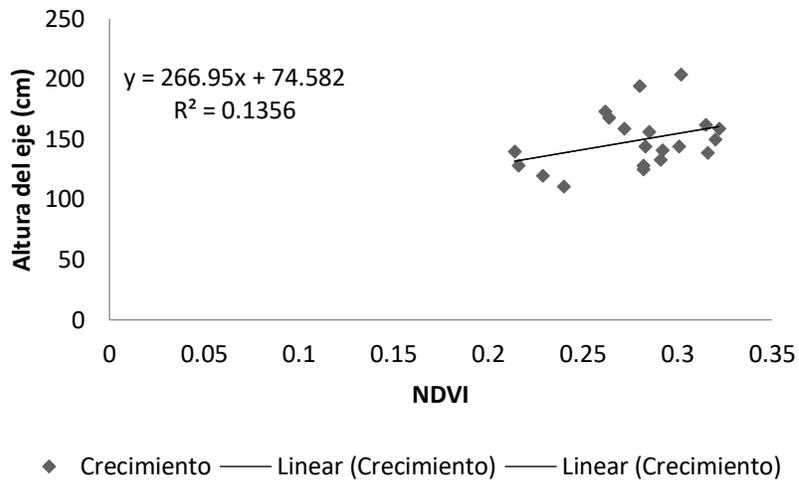


Figura 11. . Análisis de imágenes satelitales NDVI en relación al crecimiento en altura del eje del árbol (cm) para T1D1 correspondiente a un riego optimo en conjunto de una densidad de plantación baja.

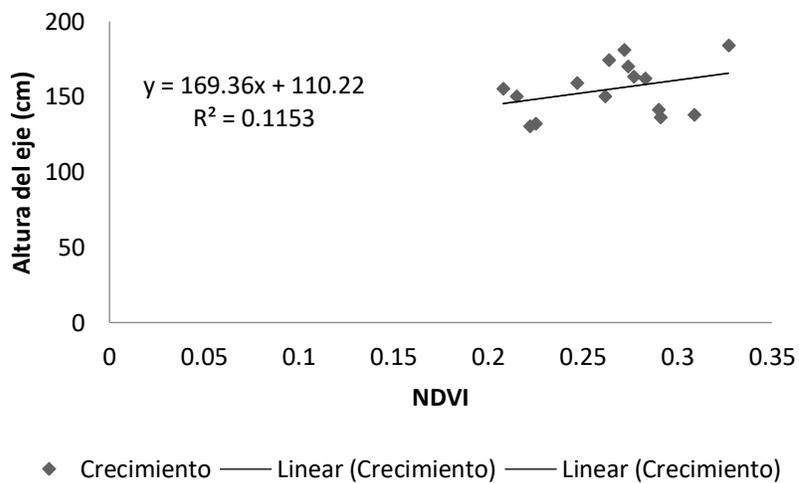


Figura 12. Análisis de imágenes satelitales NDVI en relación al crecimiento en altura del eje del árbol (cm) para T2D1 correspondiente a un riego deficitario en conjunto de una densidad de plantación baja.

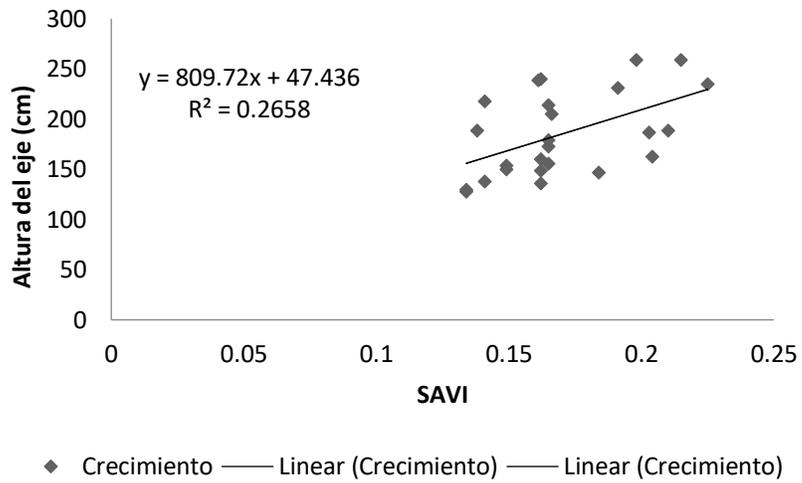


Figura 13. Análisis de imágenes satelitales SAVI en relación al crecimiento en altura del eje del árbol (cm) para T1D2 correspondiente a un riego óptimo en conjunto de una densidad de plantación alta.

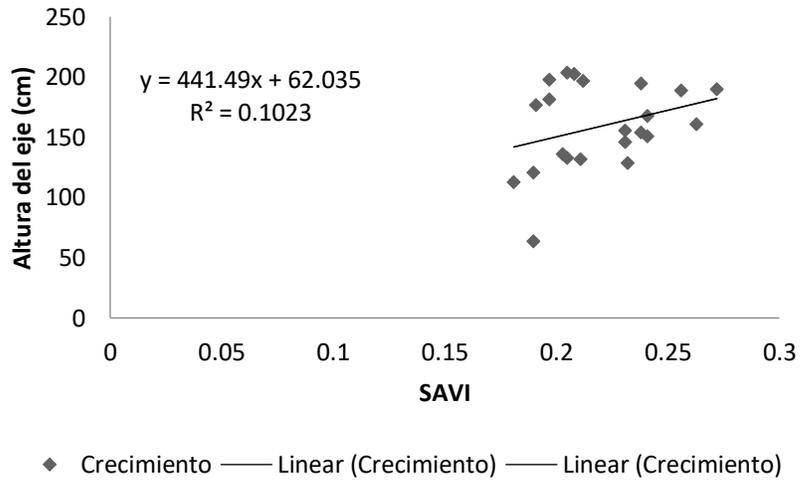


Figura 14. Análisis de imágenes satelitales SAVI en relación al crecimiento en altura del eje del árbol (cm) para T2D2 correspondiente a un riego deficitario en conjunto de una densidad de plantación alta.

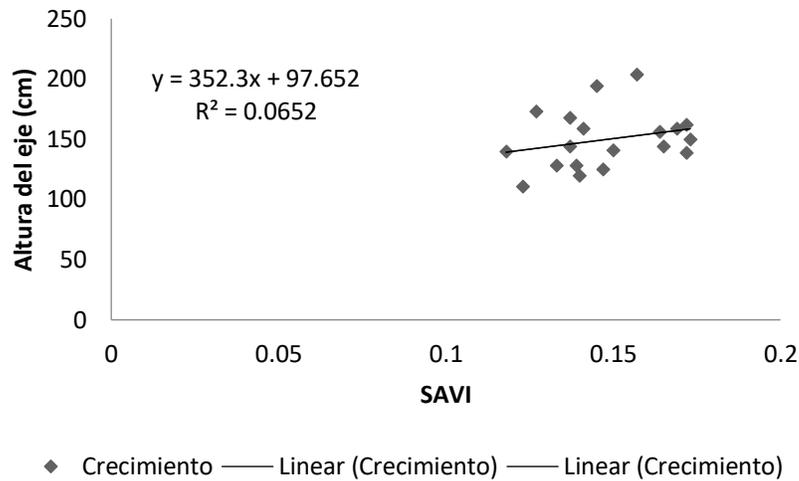


Figura 15. Análisis de imágenes satelitales SAVI en relación al crecimiento en altura del eje del árbol (cm) para T1D1 correspondiente a un riego óptimo en conjunto de una densidad de plantación baja.

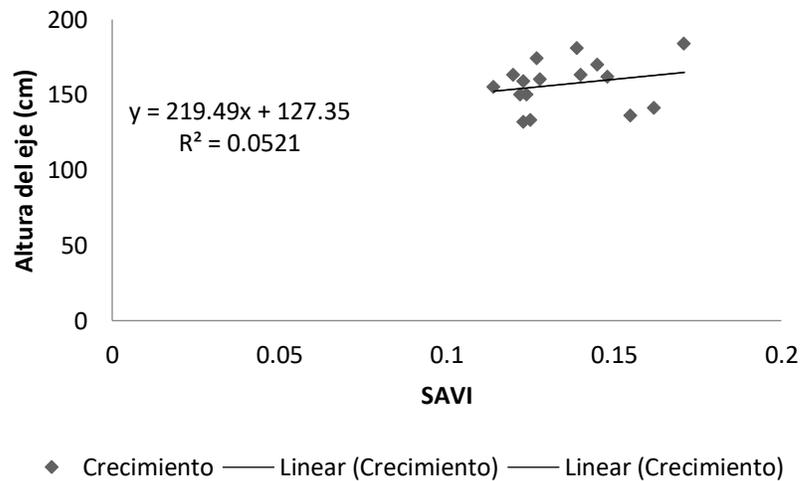


Figura 16. Análisis de imágenes satelitales SAVI en relación al crecimiento en altura del eje del árbol (cm) para T2D1 correspondiente a un riego deficitario en conjunto de una densidad de plantación baja.

Para el índice vegetacional NDVI, se llevaron a cabo regresiones lineales y cálculo del coeficiente de correlación lineal ( $R^2$ ) para determinar el nivel de asociación con el largo de brote. Bajo este análisis T1D2 (Riego óptimo – Alta densidad de plantación) presenta un mejor ajuste lineal, mostrando un  $R^2$  de 0,43. Por otro lado, T2D2 (Riego deficitario – Densidad de plantación alta) expresa una baja representatividad del modelo lineal con un  $R^2$  de 0,07. Debemos tener en cuenta que el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) funciona mucho mejor en coberturas vegetativas completas, situación que se observa principalmente en T1D2. Las plantas de quillay al ser sometidas a un riego optimizado, y al existir un mayor número de plantas

por superficie, el nivel de cobertura de suelo es mayor, permitiendo obtener una mejor respuesta por parte del análisis de imágenes satelitales, sobre todo considerando que la resolución espacial de Sentinel-2 es de 10 m.

Por su parte, el índice de vegetación SAVI tiende a funcionar mejor con datos extraídos de una superficie con cobertura vegetal de carácter parcial o discontinua. Los mejores resultados de ajuste lineal para este índice fueron para el tratamiento T1D2 (Riego óptimo – Alta densidad de plantación), el cual presentó valor de  $R^2$  de 0,26. Por otro lado T2D1 (Riego deficitario – Densidad de plantación baja) fue el más bajo con un valor de  $R^2$  de 0,05. Si bien se debería esperar una mejor correlación de SAVI para las condiciones de este ensayo, se observó una gran cantidad de ruido en la extracción de la información, sobre todo por el efecto ocasionado a la presencia de malezas en la entre hilera de la parcela y también la presencia de una malla anti-malezas en la zona de la sobre hilera. Debido a que las plantas en los tratamientos deficitarios presentaron una menor cobertura del suelo, en donde los efectos de estos elementos fueron significativos para este análisis.

Revisando el desempeño de ambos índices de vegetación, el NDVI fue el índice que presentó el mejor ajuste lineal para el tratamiento T1D2, el cual consideró un riego óptimo con una alta densidad de plantación, lo que es favorable para este estudio, ya que busca aumentar la cantidad de biomasa disponible en las plantas de *quillay*, para así obtener un mayor porcentaje de saponinas extraíbles por unidad de superficie plantada.

## 5. CONCLUSIÓN

Entre las variables dasométricas analizadas para este estudio, sólo se observaron diferencias estadísticas significativas en la variable de diámetro del cuello en relación a la estrategia de riego, es decir, en aquellos tratamientos donde el riego implementado fue óptimo (dos riegos de 1 hora durante el día ), se evidenció un aumento significativo en el diámetro del cuello y por el contrario, en tratamientos con riego deficitario (un riego de 1 hora al día) esta variable fue consistentemente inferior.

El agua entregada a la planta mediante el riego es un factor determinante para el desarrollo del crecimiento vegetativo de quillay, por lo tanto, en base a los resultados expuestos, no sería recomendable realizar una estrategia de riego deficitario controlado en quillay, ya que influiría negativamente sobre el crecimiento vegetativo de esta especie.

La densidad de plantación no presentó efectos significativos sobre el desarrollo vegetativo del quillay, por lo tanto, al momento de establecer un huerto comercial con esta especie sería recomendable utilizar un sistema de alta densidad de plantación (0.66m x 2 m, es decir, 8.333 plantas/hectárea), ya que de esta manera se obtendría un mayor volumen de biomasa, lo que generaría un mayor volumen de saponina extraíble por unidad de superficie, siendo esta una estrategia que podría ser relevante para la cosecha de quillay de alta densidad bajo un sistema productivo de corta rotación.

La combinación de una estrategia de riego optimizado con una mayor densidad de plantación, permitiría maximizar la biomasa producida por unidad de superficie, siendo una alternativa productiva interesante para productores de la zona central de Chile con suelos marginales poco aptos para la producción agrícola.

En cuanto a la utilización de imágenes satelitales, estas podrían ser una herramienta interesante al momento de determinar de manera rápida la cobertura vegetal o el crecimiento vegetativo de plantas leñosas como quillay. Si bien los resultados obtenidos en esta investigación no mostraron altas correlaciones hay que considerar que bajo condiciones de cobertura total (plantas adultas), la estimación de estos índices mejoraría significativamente.

## 6. BIBLIOGRAFIA CITADA

- Aceituno F., Inversiones San Martin S.A, Inversiones Dk Chile Ltda. 2014. Antivirales en base a saponinas de quillay. Repositorio digital CORFO, Santiago, Chile.
- Allen, R.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M.: Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, edit. Estudio FAO Riego y Drenaje 56, Ed. FAO, ISBN-92-5-304219-2, Roma, 2006
- Barría, Ximena. (2011). Respuestas fisiológicas y de crecimiento en plantas de *Quillaja Saponaria* Mol. (Quillay), sometidas a distintos niveles de restricción hídrica, memoria para optar al título de profesional de ingeniero forestal. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 29p.
- Benedetti, S., Delard, C. y Roach, F. 2000. Quillay: Una alternativa multipropósito para la zona central. Documento divulgativo 20. PRODECOP SECANO – INFOR – FIA., Santiago, Chile.
- Cañete-Salinas P, Zamudio Francisco, Yáñez Marco, Gajardo John, Valdés Héctor, Espinosa Cristian, Venegas Jaime, Retamal Luis, Ortega-Farias Samuel, Acevedo-Opazo César (2020). Evaluation of models to determine LAI on poplar stands usings pectral indices from Sentinel-2 satellite images. EcologicalModelling
- Centro de información de recursos naturales (CIREN). 2013. Apuntes de teledetección: índices de vegetación. Centro de información de recursos naturales, Santiago, Chile. 15 p. Recuperado en: [Tema Índices de vegetación, Pedro Muñoz A.pdf \(ciren.cl\)](#), consultado el: 28 de Julio de 2021.
- CIREN CORFO, 1997. Estudio agroecológico VII Región. Publicación CIREN N° 117. 659 p.
- C. Acevedo y F. Guerra (2017). Sistema mixto de producción de miel mono floral y saponinas. Proyecto FIC Maule 2017 adjudicado a Universidad de Talca.
- C. Correa y A. Martínez. (2013). Información tecnológica de productos forestales no madereros del bosque nativo en Chile. Antecedentes silvícolas y tecnológicos de *Quillaja saponaria* Mol. Santiago, Chile.
- Cruz G., Bravo R., Promis A. y Caldentey J. 2003. Nueva alternativa de manejo forestal para un uso sustentable de *Quillaja saponaria* MOL. En la zona mediterránea de Chile. In: Actas del XII Congreso Forestal Mundial. B - Bosques para el planeta. Québec, Canadá.
- DE Conchard Vega, P. (1997). Estudio de mercado de la corteza y saponina de Quillay (*Quillaja saponaria*, MOL.) y perspectivas de desarrollo futuro, memoria para optar al título profesional de Ingeniero forestal. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 92 p.

- DGAC (Dirección general de aeronáutica civil). (2021). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile*. Chile.
- Díaz García-Cervigón J. (2015), Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Memoria para optar al título de máster en tecnologías de la información geográfica. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España. 78 p.
- Dickson R, P Tomlinson. 1996. Oak growth, development and carbon metabolism in response to water stress. *Annals of Forest Science* 53: 181-196.
- Donoso, S., Peña, K., Pacheco, C., Luna, G., & Aguirre, A. (2011). Respuesta fisiológica y de crecimiento en plantas de *Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica (2.ª ed.). Valdivia, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Departamento de Silvicultura. Recuperado de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0717-92002011000200009&script=sci\\_arttext](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0717-92002011000200009&script=sci_arttext)
- Drusch, M, Del Bello, U, Carlier, S, Colin, O, Fernandez, V, Gascon, F, Hoersch, B, Isola, C, Laberinti, P, Martimort, P, Meygret, A, Spoto, F, Sy, O, Marchese, F, Bargellini, P, 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.* 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.
- FAO. (1995). Consulta de expertos sobre productos forestales no madereros para América Latina y el Caribe. Serie Forestal N° 1. Santiago, Chile
- Guajardo V, A. (2010). Respuestas ecofisiológicas de plantas *Lithraea caustica* (Mol.) Hook et Arn. Sometidas a una restricción hídrica controlada, memoria para optar al título profesional de Ingeniero forestal. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 38p.
- Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). 2018. Boletín nacional de análisis de riesgos agroclimáticos para las principales especies frutales y cultivos, y la ganadería. Instituto de investigaciones agropecuarias, Santiago, Chile. 14 p. Recuperado en: <https://www.agromet.cl/sites/default/files/Boletin%20INIA%20dic%202018.pdf>, consultado el: 30 de diciembre de 2018.
- ILABACA, D. 2008 respuestas ecofisiológicas desarrolladas por *Peumus boldus* MOL., frente a condiciones de restricción hídrica. Memoria Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 32 p.
- J. Maturana, M. Bello y M. Manley. 2004. Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. Octubre 02, 2018, de Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Departamento de oceanografía.

- Lic. Licet Mena Valdés, Dra. Beatriz Tamargo Santos, MSc. Eva Salas Olivet, Dr. Luis Enrique Plaza Paredes, Lic. Yisel Blanco Hernández, DrCs. Anselmo Otero González, Dr. Gustavo Sierra González. 2015. Determinación de saponinas y otros metabolitos secundarios en extractos acuosos de *Sapindus saponaria* L. (jaboncillo) – Revista cubana de plantas medicinales. 20 (1): 106 – 116.
- Louis, J, Debaecker, V, Pflug, B, Main-Knorn, M, Bieniarz, J, Mueller-Wilm, U, Cadau, E, Gascon, F, 2016. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A ProcessorforUsers. Proceedingsofthe Living PlanetSymposium (Spacebooks Online). Prague. CzechRepublic. pp. 1–8.
- LUNA, G. 2006.Evaluación de parámetros fisiológicos y de crecimiento en plantas de Quillaja saponaria Mol. Bajo condiciones de déficit hídrico. Memoria Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 35 p.
- Maldonado I, Isaac y Aravena S, Rene (eds.) (2006) Redes de estaciones meteorológicas automáticas y sus aplicaciones productivas [en línea]. Chillan: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 145. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7121> (Consultado: 22 noviembre 2021).
- Martín, F. 1989. Extraíbles químicos de especies nativas en zonas áridas y semiáridas. Investigación y desarrollo de áreas silvestres en zonas áridas y semiáridas. FO: DP/CHI/83/017. Documento de trabajo N° 24. Santiago, Chile.
- Mayer, D. G., & Butler, D. G. (1993). Statistical validation. *Ecological Modelling*, 68(1–2), 21–32. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90105-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90105-2)
- Meza L., Corso S. y Soza S. 2010. Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile. Organización de las naciones unidad para la agricultura y la alimentación y Oficina de estudios y políticas agrarias. 125 p. Recuperado en: [https://www.unisdr.org/files/13992\\_climachl.pdf](https://www.unisdr.org/files/13992_climachl.pdf).
- Moreno F., L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179-191. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/11131>
- Muñoz E. y Navarro P. 2011. Análisis del Déficit Hídrico en la Agricultura de la Región del Maule, Chile – Revista interamericana de ambiente y turismo. Volumen 7, Número 1, P 25 – 32.
- Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). 2002. Cumbre mundial sobre la alimentación, junio del 2002 [En línea] Recuperado en: <http://www.fao.org/WorldFoodSummit/sideevents/papers/Y6899S.htm>. Consultado el 28 de noviembre del 2018.
- Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). 2013. Bosque y agua – Impulso y acción internacional. Roma.

- Rodríguez Roberto, Oscar Matthei y Max Quesada 1983. Flora arbórea de Chile. Editorial Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Scholander, P.F.; Hammel, H.T.; Hemingsen, E.A.; Bradstreet, E.D. Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. *Proceedings of the National Academy Science*, v.51, p.119-125, 1965.
- SHANER, D. y BOYER, J. 1976. Nitrate Reductase Activity in Maize (*Zea mays* L.) Leaves. *Plant Physiology* 58: 505 - 509.
- Silva Cabello, J. (2004). Caracterización de plantaciones con especies nativas para fines de protección, en la cuenca periurbana de la ciudad de Illapel, Región de Coquimbo. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero forestal. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 105 p.
- Toillon, J., Fichot, R., Dallé, E., Berthelot, A., Brignolas, F., Marron, N. (2013). Planting density affects growth and water-use efficiency depending on site in *Populus deltoides* x *P. nigra*. *Forest Ecology and Management*, volumen 304, pages 345 – 354. <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S03781127113003162?via%3Dihub>
- Valenzuela Díaz, L. (2007). Evaluación de un ensayo de riego y fertilización de quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), en la comuna de San Pedro, provincia de Melipilla, Región Metropolitana. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero forestal. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 66 p.
- Woodruff D, B Bond, F Meinzer. 2004. Does turgor limit growth in tall trees? *Plant, Cell & Environment* 27: 229-236.
- Yoon, T., & Richter, H. 1990. Seasonal changes in stomatal responses of sweet cherry and plum to water status in detached leaves. *Physiologia Plantarum*. 80(4): 520-526. Doi:10.1111/j.1399-3054.1990.tb05673.x.