



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
INGENIERIA FORESTAL

**POTENCIAL DE CRECIMIENTO RADICULAR EN *Quillaja saponaria* Y  
*Aristotelia chilensis* BAJO EL EFECTO DE CONCENTRACIONES DE  
FÓSFORO Y LA PODA QUÍMICA DE RAÍZ**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de  
Concepción para optar al título profesional de Ingeniera Forestal

POR: Yulissa Torres Muñoz

Profesor Guía: Manuel Sánchez Olate

Marzo, 2025

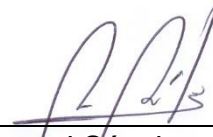
Concepción, Chile

© 2024, Yulissa Alejandra Torres Muñoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

**POTENCIAL DE CRECIMIENTO RADICULAR EN *Quillaja saponaria* Y  
*Aristotelia chilensis* BAJO EL EFECTO DE CONCENTRACIONES DE  
FÓSFORO Y LA PODA QUÍMICA DE RAÍZ**

Profesor Guía

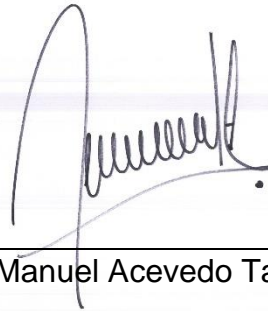


---

Manuel Sánchez Olate

Profesor Asociado, Dr.

Profesor Guía



---

Manuel Acevedo Tapia

Colaborador Externo, Dr.

Profesor Guía



---

Fiorella Calderón Ureña

Colaborador Externo, Dra. (c)

## DEDICATORIA

*A mi familia y amigos, por su amor, su constante apoyo y por acompañarme en cada paso de este camino.*

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta investigación.

En primer lugar, a Fiorella Calderón, quien me motivó a realizar este proyecto, del cual ella ya formaba parte, y me involucró en su desarrollo. Su dedicación y paciencia fueron pilares fundamentales a lo largo de todo el proceso. A los profesores Manuel Sánchez y Manuel Acevedo, quienes actuaron como guías de esta tesis. Su experiencia y asesoría fueron esenciales para el desarrollo y la culminación del proyecto

Un especial reconocimiento al Instituto Forestal (INFOR), sede Biobío, en especial al Centro Tecnológico de la Planta Forestal (CTPF) y todos sus colaboradores, por brindar las instalaciones y recursos necesarios para llevar a cabo los experimentos de vivero.

De igual manera, expreso mi más profundo agradecimiento a mi familia y amigos, quienes me brindaron su apoyo incondicional, motivación, cariño y desconexión, además de sus valiosos aportes durante todo el proceso. Sin ellos, mi experiencia universitaria habría sido mucho más difícil.

Finalmente, un agradecimiento a la Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, por otorgar las facilidades académicas y administrativas que permitieron desarrollar esta tesis.

A todos quienes de una u otra forma contribuyeron a hacer realidad este trabajo, muchas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. METODOLOGÍA .....	5
2.1 Área de estudio .....	5
2.2 Datos de campo .....	5
2.2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo .....	5
2.2.2 Manejo del cultivo .....	7
2.2.3 Trasplante .....	9
2.3 Evaluaciones de potencial de crecimiento radicular (PCR) .....	10
2.4 Diseño experimental y análisis estadístico .....	12
3.1 Esquemas de riego .....	13
3.2 Resultados para <i>Quillaja saponaria</i> .....	15
3.3 Resultados para <i>Aristotelia chilensis</i> .....	20
IV. DISCUSIÓN .....	24
V. CONCLUSIONES .....	29
VI. BIBLIOGRAFÍA .....	31
VII. APÉNDICE .....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Análisis de varianza para las variables número de raíces nuevas (RN), longitud promedio de las tres raíces más largas (LRN) y peso seco de raíces nuevas (PRN) en <i>Quillaja saponaria</i> .....	<b>15</b>
<b>Tabla 2.</b> Análisis de varianza para las variables número de raíces nuevas (RN), longitud promedio de las tres raíces más largas (LRN) y peso seco de raíces nuevas (PRN) en <i>Aristolelia chilensis</i> .....	<b>20</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Figura N°</b>	<b>Pág.</b>
<b>Figura 2.1.</b> (a) Bañado de bandejas de poda química de raíces con solución de oxiclورو de cobre ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ); (b) Bandejas bañadas con solución de oxiclورو de cobre; (c) Llenado de bandejas con poda y sin poda con el sustrato de compost de corteza de pino.....	<b>6</b>
<b>Figura 2.2.</b> Repique de plántulas de <i>A. chilensis</i> (a) y <i>Q. saponaria</i> (b) en bandejas de 24 cavidades. ....	<b>7</b>
<b>Figura 2.3.</b> (a) Pesaje de bandejas para determinar el contenido gravimétrico de agua; (b) Sensores de humedad para determinación del contenido volumétrico de agua desde la bandeja. ....	<b>8</b>
<b>Figura 2.4.</b> (a) Trasplante de las plantas a los tubos grandes; (b) Monitoreo del riego mediante sensores de humedad. ....	<b>9</b>
<b>Figura 2.5.</b> (a) Corte de las plantas desde la base del sustrato; (b) Extracción de la planta desde el tubete para ser lavada; (c) Planta lavada dejando las raíces al descubierto.....	<b>10</b>
<b>Figura 2.6.</b> (a) Selección de las raíces más largas de <i>A. chilensis</i> ; (b) Medición de una de las raíces más largas de <i>A. chilensis</i> ; (c) Selección de las raíces más largas de <i>Q. saponaria</i> ; (d) Medición de una de las raíces más largas de <i>Q. saponaria</i> ; (e) Medición de peso seco de las nuevas raíces. ....	<b>11</b>
<b>Figura 2.7.</b> Manejo del riego en función del contenido de humedad del sustrato para <i>A. chilensis</i> durante febrero de 2023.....	<b>13</b>
<b>Figura 2.8.</b> Manejo del riego en función del contenido de humedad del sustrato para <i>Q. saponaria</i> durante febrero de 2023. ....	<b>14</b>
<b>Figura 3.9.</b> Número de raíces nuevas de <i>Quillaja saponaria</i> en relación con la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L <sup>-1</sup> P).....	<b>16</b>
<b>Figura 3.10.</b> (a) Longitud de raíces promedio (cm) de las tres raíces más largas de <i>Q. saponaria</i> en relación con la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L <sup>-1</sup> P). (b) Longitud promedio (cm) de las tres raíces más largas en función de la poda química de raíces (CP y SP) .....	<b>18</b>
<b>Figura 3.11.</b> Peso seco de raíces nuevas (g) de <i>Quillaja saponaria</i> en respuesta a la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L <sup>-1</sup> P).....	<b>19</b>
<b>Figura 3.12</b> (a) Número de raíces nuevas de <i>A. chilensis</i> en relación con la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L <sup>-1</sup> P); (b) Número de raíces nuevas en función de la poda química de raíces (CP y SP). ....	<b>21</b>
<b>Figura 3.13.</b> (a) Peso seco de las raíces nuevas (g) de <i>A. chilensis</i> en relación con la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L <sup>-1</sup> P); (b) Peso seco de número de raíces nuevas (g) en función de la poda química de raíces (CP y SP) .....	<b>23</b>



## RESUMEN

El desarrollo radicular es clave para el éxito de la restauración ecológica, especialmente en ecosistemas mediterráneos afectados por la sequía. La fertilización con fósforo y la poda química de raíces son prácticas comunes en viveros, pero su impacto en especies nativas de Chile aún es escasamente estudiado. En función de esto, este trabajo evaluó cómo estas prácticas influyen en el crecimiento radicular de *Quillaja saponaria* y *Aristotelia chilensis*.

Se estableció un ensayo en vivero utilizando concentraciones de fósforo (P) (0, 15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup>) y poda química (CP: con poda, SP: sin poda). Las variables medidas fueron el número de raíces nuevas, longitud promedio y peso seco de las raíces. Los resultados indicaron que la fertilización con P influyó significativamente en ambas especies, incrementando el desarrollo radicular. Ambas prácticas operan de forma independiente, sin interacción significativa. En *Q. saponaria*, el tratamiento SP generó un aumento significativo en la longitud promedio de las raíces. Además, las concentraciones superiores a 60 mg L<sup>-1</sup> no generan mejoras significativas en las variables evaluadas. Por otra parte, en *A. chilensis*, niveles de 15 mg L<sup>-1</sup> resultaron efectivos para generar un desarrollo radicular óptimo, mientras que el tratamiento CP resultaron menos raíces y menor biomasa.

Este estudio contribuye al conocimiento sobre prácticas de vivero, ofreciendo estrategias para maximizar el éxito en proyectos de reforestación en ecosistemas mediterráneos afectados por el cambio climático.

Palabras clave: Quillay, Maqui, fósforo, desarrollo radicular, potencial de crecimiento radicular, restauración ecológica.

## ABSTRACT

Root development is crucial for the success of ecological restoration, especially in Mediterranean ecosystems affected by drought. Phosphorus fertilization and chemical root pruning are common nursery practices, yet their impact on native Chilean species remains poorly studied. This study evaluated how these practices influence root growth in *Quillaja saponaria* and *Aristotelia chilensis*.

A nursery experiment was conducted using different phosphorus (P) concentrations (0, 15, 60, and 120 mg L<sup>-1</sup>) and chemical pruning treatments (CP: with pruning, SP: without pruning). The measured variables included the number of new roots, average root length, and dry root weight. Results showed that P fertilization significantly influenced both species, enhancing root development. Both practices operated independently, with no significant interaction. In *Q. saponaria*, the SP treatment significantly increased average root length. Additionally, concentrations above 60 mg L<sup>-1</sup> did not lead to further improvements in the evaluated variables. In *A. chilensis*, 15 mg L<sup>-1</sup> proved effective in promoting optimal root development, while CP resulted in fewer roots and lower biomass.

This study contributes to the understanding of nursery practices, providing strategies to maximize reforestation success in Mediterranean ecosystems affected by climate change.

Keywords: Quillay, Maqui, phosphorus, root development, root growth potential, ecological restoration.

## I. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual del cambio climático, las sequías recurrentes representan una de las mayores amenazas para la biodiversidad y los ecosistemas, especialmente en regiones mediterráneas como Chile central. Según Chapin et al. (1990), estas condiciones de estrés hídrico limitan el desarrollo vegetal y afectan la productividad de muchas especies vegetales. En este escenario, el sistema radicular adquiere un rol protagónico, ya que es clave para la supervivencia, adaptación y desempeño de las plantas, mejorando la productividad y resiliencia forestal (Honrubia, 2009).

Las raíces no solo proporcionan anclaje al suelo (Fitter, 2002), sino que cumplen funciones vitales como la absorción de agua y nutrientes, actuando como la interfaz principal entre la planta y el suelo (Lynch, 1995).

Durante la sequía, la arquitectura y el funcionamiento del sistema radicular se vuelven factores determinantes en la capacidad de las plantas para tolerar la falta de agua. Al respecto, Comas et al. (2013) indican que un sistema radicular profundo y bien desarrollado permite explorar mayores volúmenes de suelo, incrementando la posibilidad de acceder a recursos hídricos limitados. Por lo tanto, optimizar el desarrollo radicular de las plantas es crucial en estrategias de manejo y restauración de ecosistemas en áreas afectadas por el cambio climático.

Dada la importancia del sistema radicular, las prácticas de manejo en vivero que promueven su desarrollo óptimo son cruciales para el éxito de los proyectos de restauración y reforestación. Entre estas prácticas, se encuentra la fertilización

fosfórica, la cual, junto con un adecuado manejo del sustrato, se considera esencial para garantizar un sistema radicular saludable y funcional (Landis et al., 2022). El fósforo es un nutriente esencial que desempeña un papel clave en procesos como la transferencia de energía, la división celular y, notablemente, el desarrollo radicular (Marschner, 2012). Además, diversos autores reportan una relación directa entre la concentración de fósforo y la producción de nuevas raíces (Valdecantos et al., 2006, Oliet et al., 2008), lo que sin duda tiene una importancia fundamental en la supervivencia de las plantas.

Otra práctica relevante en el manejo de viveros es la poda química de raíces que se ha utilizado desde los años 60 (Saul, 1968). Esta práctica consiste en la aplicación de compuestos con cobre en las paredes internas del contenedor, la cual provoca la quema de los puntos de crecimiento del sistema radicular (Landis, 2005), generando la formación de nuevas raíces laterales, promoviendo un sistema radicular más ramificado y fibroso (Duryea, 1984), así como más robusto y adaptativo (Jacobs et al., 2005). Estas mejoras en la arquitectura de la raíz pueden influir positivamente en el desempeño de las plantas, un concepto fundamental en la producción de plantas en vivero.

El concepto de planta objetivo se refiere al conjunto de características morfológicas y fisiológicas que determinan el potencial de desempeño en el campo (Dumroese et al., 2016). Este concepto evalúa mediante indicadores específicos, tanto en condiciones controladas como en pruebas de terreno. En este contexto, el potencial de crecimiento radicular (PCR) destaca como un indicador importante del vigor de la planta y su capacidad para establecerse exitosamente en el campo. El PCR evalúa la capacidad de una planta para iniciar y elongar nuevas raíces cuando se

establece en un ambiente favorable (Ritchie & Tanaka, 1990), además, esta prueba proporciona información valiosa sobre el potencial de la planta y su probable desempeño post-trasplante. Un alto PCR se asocia generalmente con una mayor supervivencia y crecimiento inicial en el campo (Grossnickle, 2012).

En el contexto de las especies nativas chilenas, existe una notable escasez de información sobre estas prácticas de manejo en vivero y sus efectos en el desarrollo radicular. Este vacío de información es particularmente relevante considerando la importancia de las especies nativas en los proyectos de restauración y conservación de la biodiversidad (Echeverría et al., 2007).

El presente estudio se enfoca en dos especies endémicas de gran interés para la restauración en Chile: *Quillaja saponaria* (quillay) y *Aristotelia chilensis* (maqui). El quillay, especie arbórea y nativa de Chile, se distribuye desde la región de Coquimbo hasta la región de la Araucanía. El valor de esta especie no solo radica por el uso de sus saponinas, utilizadas en las industrias farmacéutica y cosmética, sino también por su resistencia a condiciones ambientales adversas, crecer en suelos pobres y en condiciones extremas de sequía (Prehn et al., 2003). Esta característica la convierte en una candidata natural para proyectos de restauración en zonas degradadas y propensas a la sequía (Donoso et al., 2011), siendo la especie nativa más producida en los viveros de Chile (Acevedo et al. 2021). Por su parte, el maqui, arbusto nativo de los bosques templados de Chile y Argentina, es reconocido por sus frutos ricos en antioxidantes y su capacidad para contribuir a la recuperación de suelos erosionados (Salinas et al., 2012). Se distribuye desde la región de Coquimbo hasta la región de Aysén. Su rápido crecimiento y adaptabilidad

a diferentes condiciones edáficas lo hacen valioso en estrategias de restauración ecológica (Vogel et al., 2014).

En función de lo anteriormente expuesto, el objetivo de esta investigación es evaluar el potencial de crecimiento radicular de *Quillaja saponaria* y *Aristotelia chilensis* en respuesta a diferentes concentraciones de fósforo y la aplicación de poda química de raíz aplicados durante la viverización. Los resultados de esta investigación no solo contribuirán al conocimiento básico sobre la ecofisiología de estas especies nativas, sino que también proporcionarán información valiosa para optimizar las prácticas de manejo en vivero, mejorando así el éxito de los proyectos de restauración en ecosistemas mediterráneos chilenos.

A partir de lo expuesto, se plantea la hipótesis que a mayor concentración de fósforo y aplicación de poda química de raíces durante la fase de viverización favorecerán un mayor potencial de crecimiento radicular (PCR) en *Q. saponaria* y *A. chilensis*. Se espera que estos tratamientos estimulen la emisión de nuevas raíces y mejoren la arquitectura radicular, lo que podría traducirse en un mejor desempeño inicial en campo y mayor éxito en proyectos de restauración.

## II. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el en el Centro Tecnológico de la Planta Forestal (CTPF) del Instituto Forestal (INFOR), sede Biobío, ubicado en la comuna de San Pedro de La Paz provincia de Concepción, Chile (36,84°S; 73,13°O), durante el periodo de agosto 2022 hasta diciembre 2023. Durante este periodo, la temperatura media diaria fue de 16,8 °C. La temperatura máxima diaria fue de 34,5 °C, y se registró en el mes de febrero, mientras que la temperatura mínima fue de -1 °C en el mes de mayo.

### 2.2 Datos de campo

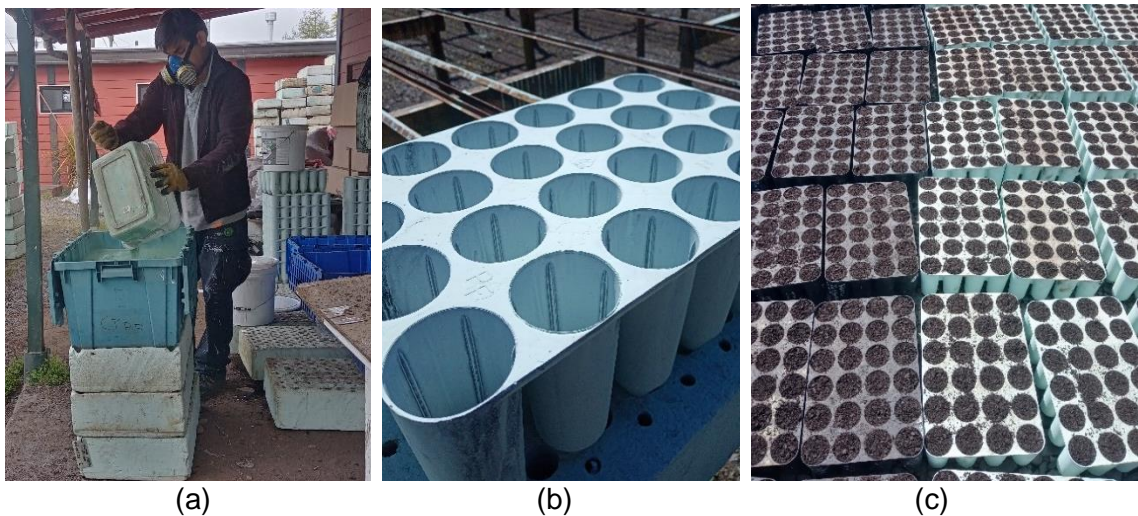
#### 2.2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo

Se utilizaron plantas de *Q. saponaria* y *A. chilensis*. Las procedencias de las semillas utilizadas fueron la comuna de Quillón (36,74°S;72,49°O), y El Morro (38,03°S;72,68°O) respectivamente. Las semillas se sembraron en camas de germinación (24 y 29 de agosto del 2022 para *A. chilensis* y *Q. saponaria* respectivamente), usando como sustrato, compost de corteza de pino G10 (granulometría < 10 mm). Previo a la emergencia de plántulas, la mitad de las bandejas fueron bañadas con una solución de oxiclورو de cobre ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ), a una concentración de 60 mg L<sup>-1</sup> (figura 1.a) asegurando que el interior de las



paredes del contenedor estuviese completamente cubiertas o bañadas, siendo estas bandejas las del tratamiento poda química de raíces (CP) (figura 1.b), mientras que el resto de las bandejas correspondieron al tratamiento sin poda química de raíz (SP) (figura 1.c).

Una vez lograda la emergencia de plántulas y el desarrollo de su primer par de hojas verdaderas, estas fueron repicadas a bandejas de 24 cavidades (280 cm<sup>3</sup>) utilizando el mismo sustrato antes señalado (figura 2.a-b). Este proceso se realizó el 25 de octubre de 2022 para *A. chilensis* y el 29 de diciembre de 2022 para *Q. saponaria*.



**Figura 1.** (a) Bañado de bandejas de poda química de raíces con solución de oxiclورو de cobre ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ); (b) Bandejas bañadas con solución de oxiclورو de cobre; (c) Llenado de bandejas con poda y sin poda con el sustrato de compost de corteza de pino.



**Figura 2.** Repique de plántulas de *A. chilensis* (a) y *Q. saponaria* (b) en bandejas de 24 cavidades.

### 2.2.2 Manejo del cultivo

La fertilización se realizó durante la etapa de pleno crecimiento de las plantas (noviembre 2022 - mayo 2023). Durante este periodo se aplicaron cuatro concentraciones de fósforo (P) (0, 15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup>), mientras que el resto de macro- y micro-nutrientes se mantuvieron a concentraciones constantes (mg L<sup>-1</sup>): nitrógeno (N, 400), potasio (K, 100), magnesio (Mg, 60), azufre (S, 80), calcio (Ca, 80), hierro (Fe, 10), manganeso (Mn, 6), cobre (Cu, 2), zinc (Zn, 6), molibdeno (Mo, 2) y boro (B, 2). El criterio de riego fue establecido en función del contenido de humedad del sustrato, el cual fue monitoreado mediante el pesaje de bandejas (figura 3.a) y sensores de humedad (figura 3.b). Cada evento de riego se realizó cuando el sustrato alcanzaba un 50% de pérdida de humedad, regando las bandejas hasta llegar a capacidad de campo nuevamente.

La aplicación del riego se realizó mediante fertirriego (riego con fertilizante soluble). Los eventos de fertirriego fueron intercalados con riegos y los micronutrientes se aplicaron cada 3 eventos de fertilización.



**Figura 3.** (a) Pesaje de bandejas para determinar el contenido gravimétrico de agua; (b) Sensores de humedad para determinación del contenido volumétrico de agua desde la bandeja.



### 2.2.3 Trasplante

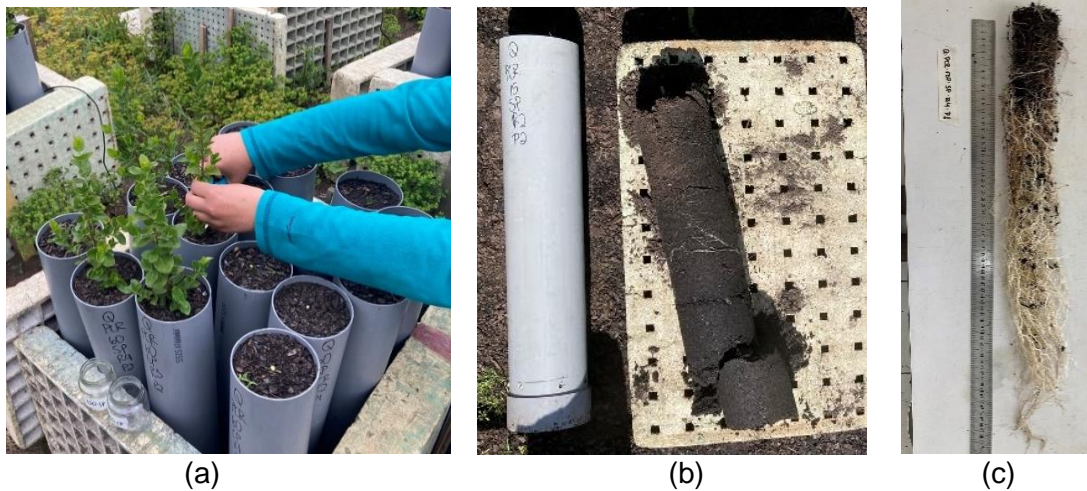
El 9 de agosto 2023, 64 plantas de cada especie (2 plantas x 4 concentraciones de P x 2 podas químicas x 4 repeticiones) fueron traspasadas desde las bandejas a tubos de mayor tamaño, (60 cm de longitud y 110 mm de diámetro) (figura 4.a), los que fueron llenados con compost de corteza de pino. Durante los 100 días posteriores el riego se realizó con agua hasta la saturación del sustrato, considerando como criterio la pérdida del 50% del agua disponible, monitoreado por sensores (figura 4.b).



**Figura 4.** (a) Trasplante de las plantas a los tubos grandes; (b) Monitoreo del riego mediante sensores de humedad.

### 2.3 Evaluaciones de potencial de crecimiento radicular (PCR)

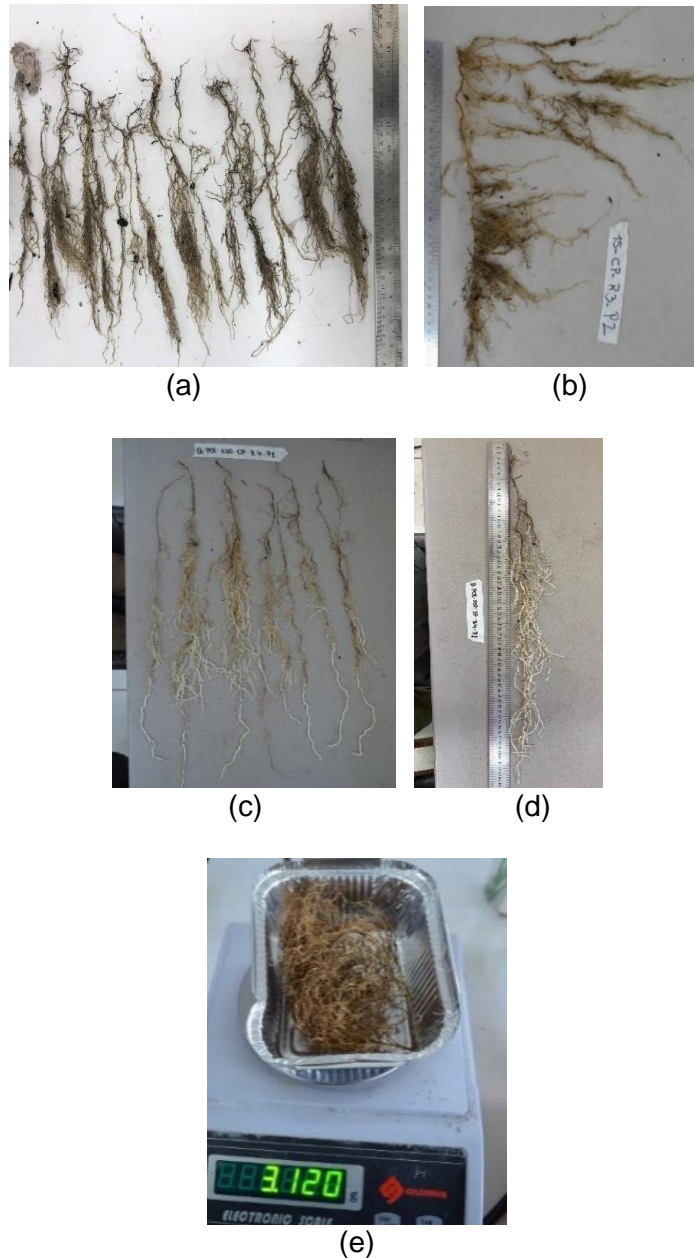
El 16 de noviembre de 2023, se realizó el corte de la parte aérea de todas las plantas para limitar su crecimiento radicular (figura 5.a). Para las mediciones de raíces se extrajo cuidadosamente la planta del tubete (figura 5.b), lavando el sistema radicular para eliminar el sustrato, dejando solo las raíces (figura 5.c).



**Figura 5.** (a) Corte de las plantas desde la base del sustrato; (b) Extracción de la planta desde el tubete para ser lavada; (c) Planta lavada dejando las raíces al descubierto.

Se contabilizaron todas las raíces nuevas (RN) (> a 1 cm de longitud) que sobresalían del cepellón, identificadas generalmente por su color más claro. Se seleccionaron y midieron las tres raíces más largas (LRN) (cm) (figuras 6.a-d). Posteriormente, todas las raíces nuevas fueron lavadas exhaustivamente y secadas en un horno de ventilación forzada a 60°C durante 72 horas para

determinar su peso seco (PRN) (g) (figura 6.e) utilizando una balanza digital con precisión de 0,001 g.



**Figura 6.** (a) Selección de las raíces más largas de *A. chilensis*; (b) Medición de una de las raíces más largas de *A. chilensis*; (c) Selección de las raíces más largas de *Q. saponaria*; (d) Medición de una de las raíces más largas de *Q. saponaria*; (e) Medición de peso seco de las nuevas raíces.

## 2.4 Diseño experimental y análisis estadístico

El análisis se realizó mediante un diseño factorial, considerando 4 niveles de concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup>) y 2 niveles de poda química radicular (con poda - CP y sin poda - SP), con tres variables de respuestas analizadas que fueron el número de raíces nuevas, la longitud promedio de raíces nuevas (cm) y el peso seco de raíces nuevas (g).

Para evaluar los efectos de los factores concentración de P y la poda química, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para los niveles de concentración fosfórica y la poda, de tipo factorial.

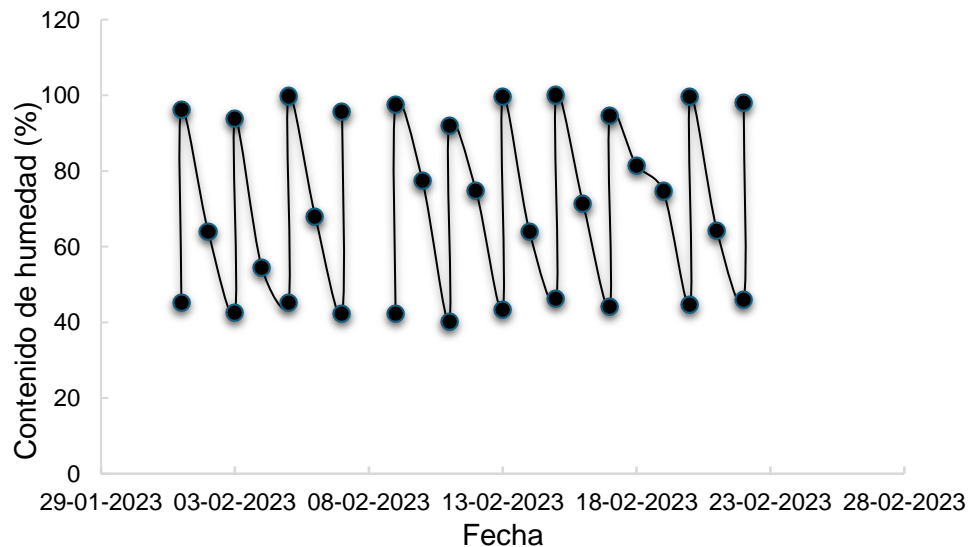
Las diferencias entre medias fueron evaluadas mediante la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para los tratamientos de concentración de P y poda química.

Todos los análisis y visualizaciones fueron realizadas mediante el software R Studio (versión 4.3.1).

### III. RESULTADOS

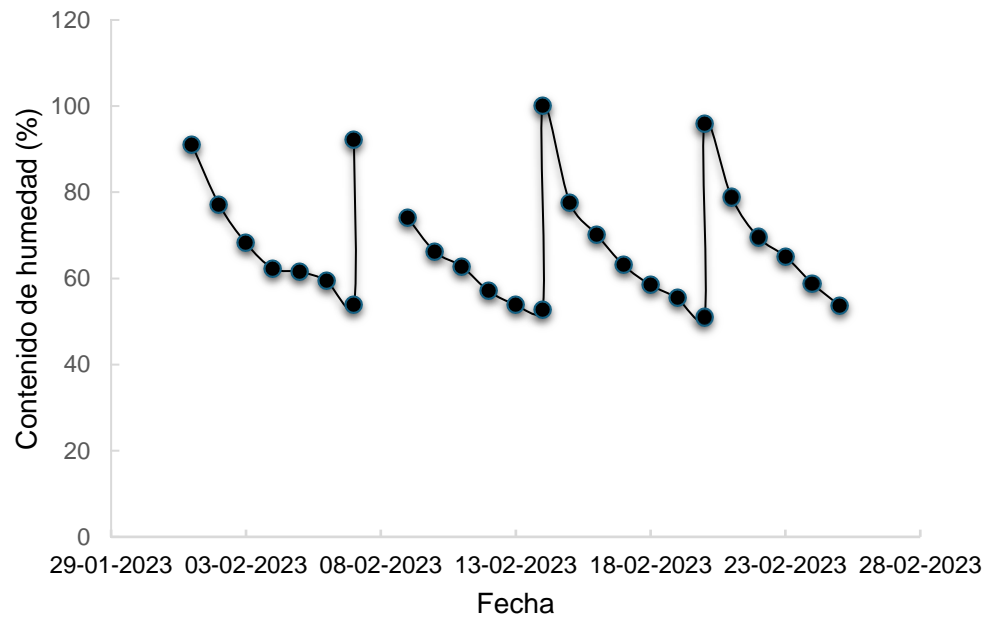
#### 3.1 Esquemas de riego

El análisis de los eventos de riego durante la etapa de pleno crecimiento evidenció diferencias en la demanda hídrica entre *Q. saponaria* y *A. chilensis*. Mientras que *Q. saponaria* recibió 20 eventos de riego y fertirriego, *A. chilensis* alcanzó un total de 60. Como se observa en las figuras 7 y 8, maqui presentó una mayor frecuencia de riego en comparación con quillay durante el mes de febrero, comportamiento que se mantuvo a lo largo del experimento, evidenciando una mayor demanda hídrica en esta especie.



**Figura 7.** Manejo del riego en función del contenido de humedad del sustrato para *A. chilensis* durante febrero de 2023.





**Figura 8.** Manejo del riego en función del contenido de humedad del sustrato para *Q. saponaria* durante febrero de 2023.

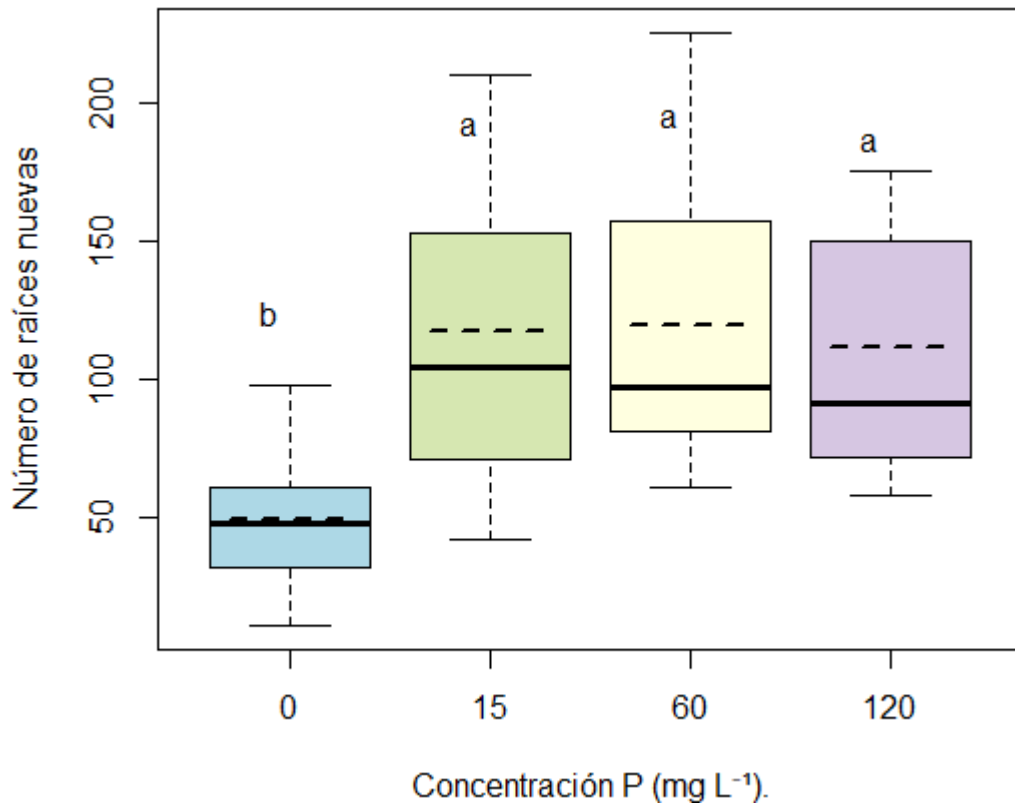
### 3.2 Resultados para *Quillaja saponaria*

La concentración de P generó un efecto significativo en todas las variables evaluadas: número de raíces nuevas (RN), longitud promedio de las tres raíces más largas (LRN) y peso seco de raíces nuevas (PRN). Por otro lado, la poda fue significativa solamente para LNR. Para quillay no se observó ningún efecto de interacción significativa para ninguna de las variables analizadas (tabla 1).

**Tabla 1.** Análisis de varianza para las variables número de raíces nuevas (RN), longitud promedio de las tres raíces más largas (LRN) y peso seco de raíces nuevas (PRN) en *Quillaja saponaria*.

Fuente de variación	Valor - <i>p</i>		
	RN	LRN	PRN
Concentración P	<b><u>0,0008</u></b>	<b><u>&lt;0,0001</u></b>	<b><u>&lt;0,0001</u></b>
Poda	0,5168	<b><u>0,0148</u></b>	0,3781
Conc. P * Poda	0,7986	0,1138	0,8000

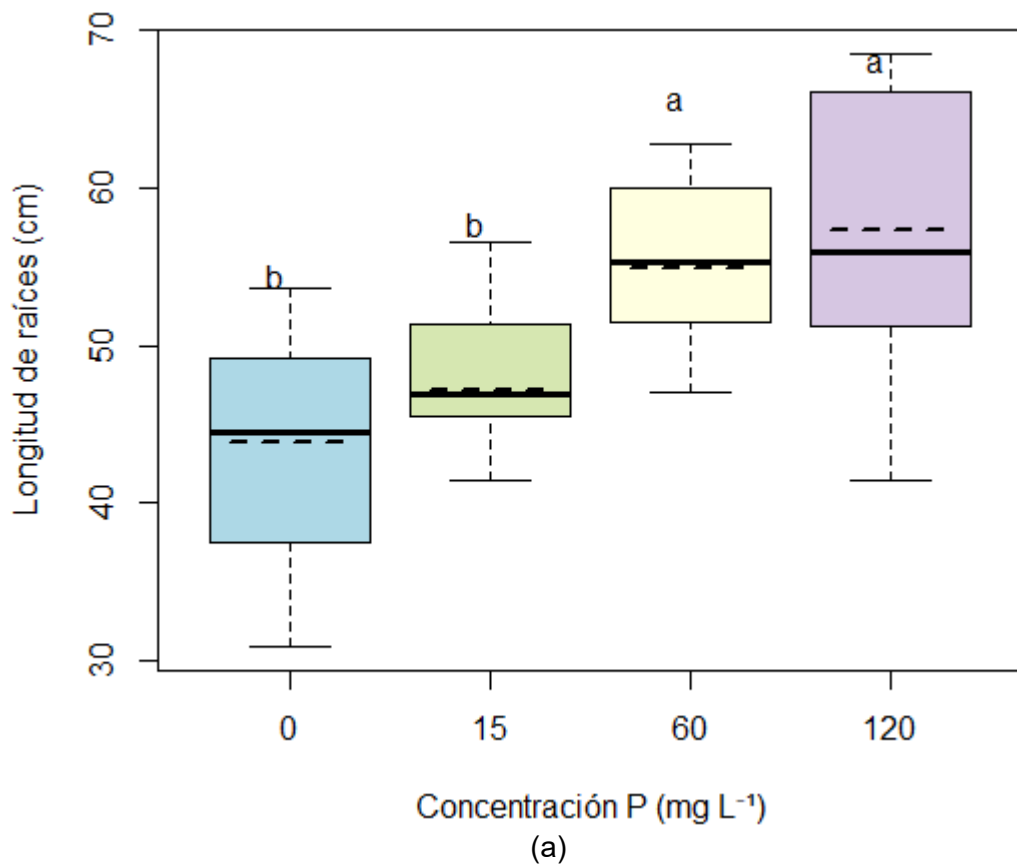
La distribución del número de raíces nuevas se observa en la figura 9, evidenciando mayor producción de raíces nuevas en los tratamientos que aportan P (15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup>) con respecto al nivel 0 mg L<sup>-1</sup> que fue significativamente menor.

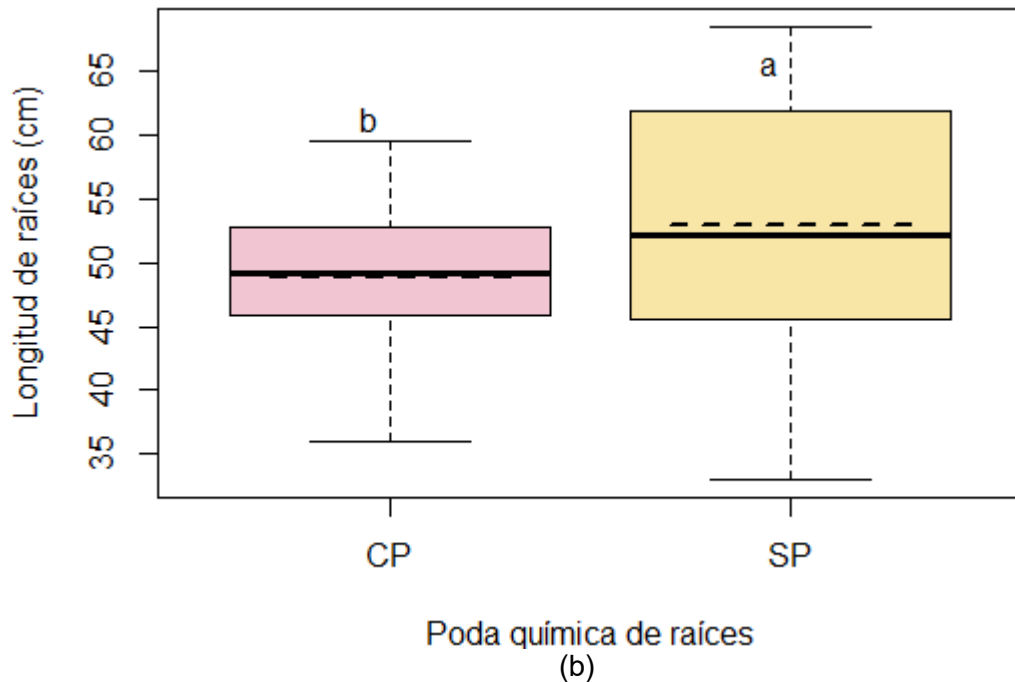


**Figura 9.** Número de raíces nuevas de *Quillaja saponaria* en relación con la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup> P). Los límites inferior y superior de las cajas representan los percentiles 25 y 75, respectivamente. La línea discontinua en el centro de cada caja corresponde al valor promedio, mientras que la línea sólida representa la mediana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con un  $p \leq 0,05$  según la prueba de Tukey.

Para la variable de longitud de raíces, la concentración de P y la poda química fueron significativas de forma independiente en *Q. saponaria* (tabla 1). AL respecto, la figura 10.a muestra un incremento progresivo en la longitud de raíces a medida que aumentan las concentraciones de fósforo, generando dos grupos estadísticamente distintos, 0–15, y 60-120 mg L<sup>-1</sup> de P. Por su parte el tratamiento SP generó una mayor longitud de raíces nuevas con respecto a CP (figura 10.b)

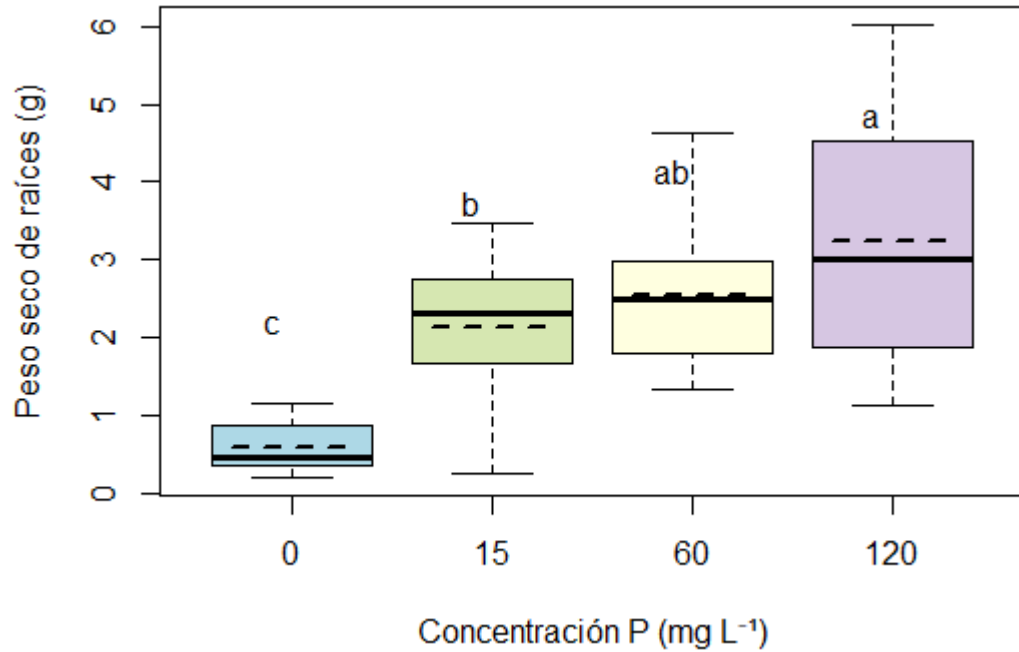
La prueba de Tukey mostró que las concentraciones P más altas (60 y 120 mg L<sup>-1</sup>) son significativamente diferentes en comparación con los más bajos (15 y 0 mg L<sup>-1</sup>). En cuanto a la poda, existió una diferencia, de 4,3 cm., donde las longitudes mayores se encontraron en SP en comparación con CP.





**Figura 10.** (a) Longitud de raíces promedio (cm) de las tres raíces más largas de *Q. saponaria* en relación con la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup> P). (b) Longitud promedio (cm) de las tres raíces más largas en función de la poda química de raíces (CP y SP). Los límites inferior y superior de las cajas representan los percentiles 25 y 75, respectivamente. La línea discontinua en el centro de cada caja corresponde al valor promedio, mientras que la línea sólida representa la mediana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con un  $p \leq 0,05$  según la prueba de Tukey.

Para el peso seco de raíces nuevas (g), el factor concentración de P afectó significativamente en *Q. saponaria* mientras que la poda química y la interacción entre factores no fueron significativos (tabla 1). Las concentraciones de fósforo más altas generaron mayor biomasa de raíces, concentrándose el mayor peso en la concentración de 120 mg L<sup>-1</sup>, seguido de 60 mg L<sup>-1</sup> de P (figura 11). Adicionalmente, 120 mg L<sup>-1</sup> P generó un peso seco de raíces significativamente mayor que 15 y 0 mg L<sup>-1</sup> P, siendo este último (0 mg L<sup>-1</sup> P) el de menor biomasa radicular.



**Figura 11.** Peso seco de raíces nuevas (g) de *Quillaja saponaria* en respuesta a la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup> P). Los límites inferior y superior de las cajas representan los percentiles 25 y 75, respectivamente. La línea discontinua en el centro de cada caja corresponde al valor promedio, mientras que la línea sólida representa la mediana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con un  $p \leq 0,05$  según la prueba de Tukey.

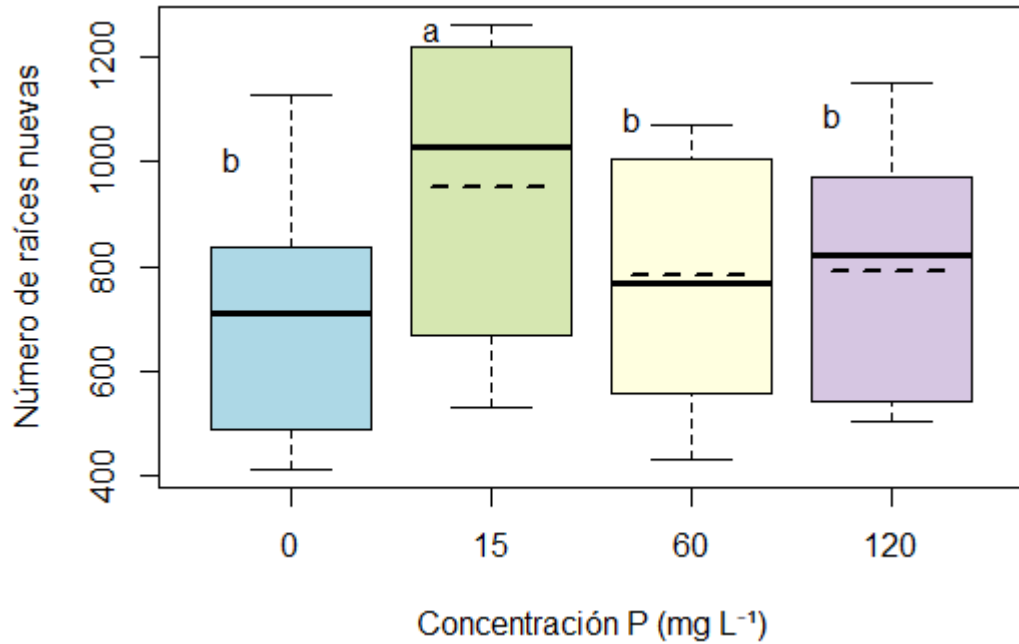
### 3.3 Resultados para *Aristotelia chilensis*

Los efectos principales, concentración de P y poda química, mostraron efectos significativos sobre el número de raíces nuevas (tabla 2). Las concentraciones de P generaron mayor cantidad de raíces nuevas producidas con respecto a la ausencia de este elemento (figura 12.a). En cuanto a las comparaciones de las concentraciones P en la cantidad de raíces nuevas, no hay diferencia en las concentraciones 0-60-120 con respecto a la concentración 15 mg L<sup>-1</sup> P.

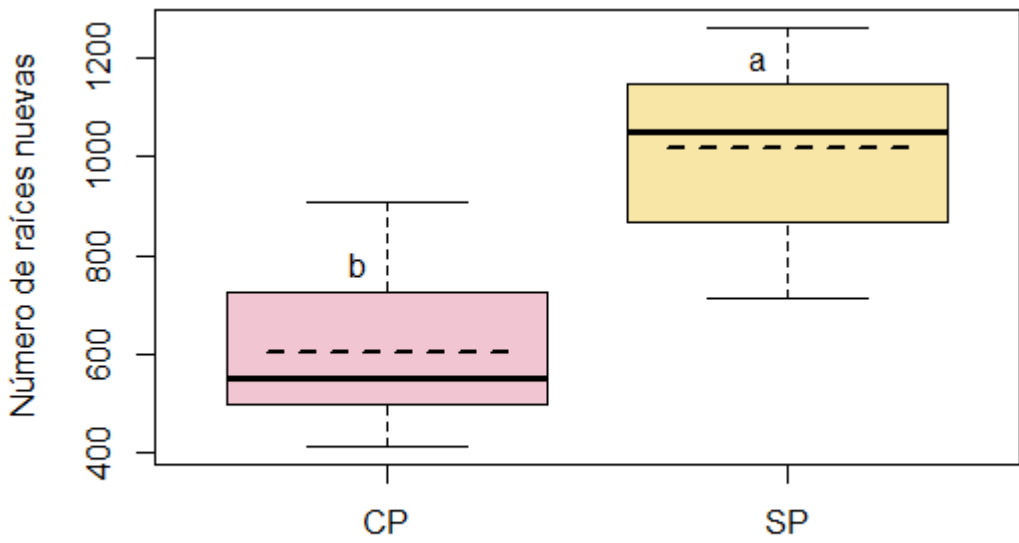
**Tabla 2.** Análisis de varianza para las variables número de raíces nuevas (RN), longitud promedio de las tres raíces más largas (LRN) y peso seco de raíces nuevas (PRN) en *Aristotelia chilensis*.

Fuente de variación	Valor- p		
	RN	LRN	PRN
Concentración P	<b><u>0,0004</u></b>	0,0600	<b><u>&lt;0,0001</u></b>
Poda	<b><u>&lt;0,0001</u></b>	0.0812	<b><u>0,0025</u></b>
Conc. P * Poda	0,4642	0,4850	0,4230

En cuanto a la poda química, el tratamiento SP generó un mayor número de raíces nuevas que las plantas CP (figura 12.b), generándose 1.015 raíces nuevas en SP y 602 en CP.



(a)



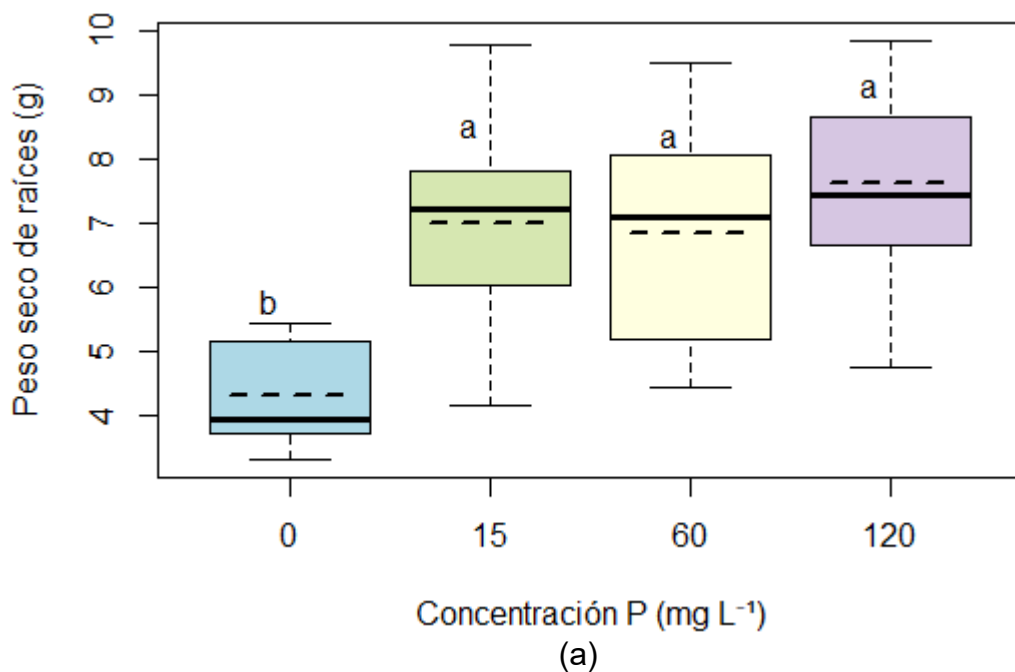
(b)

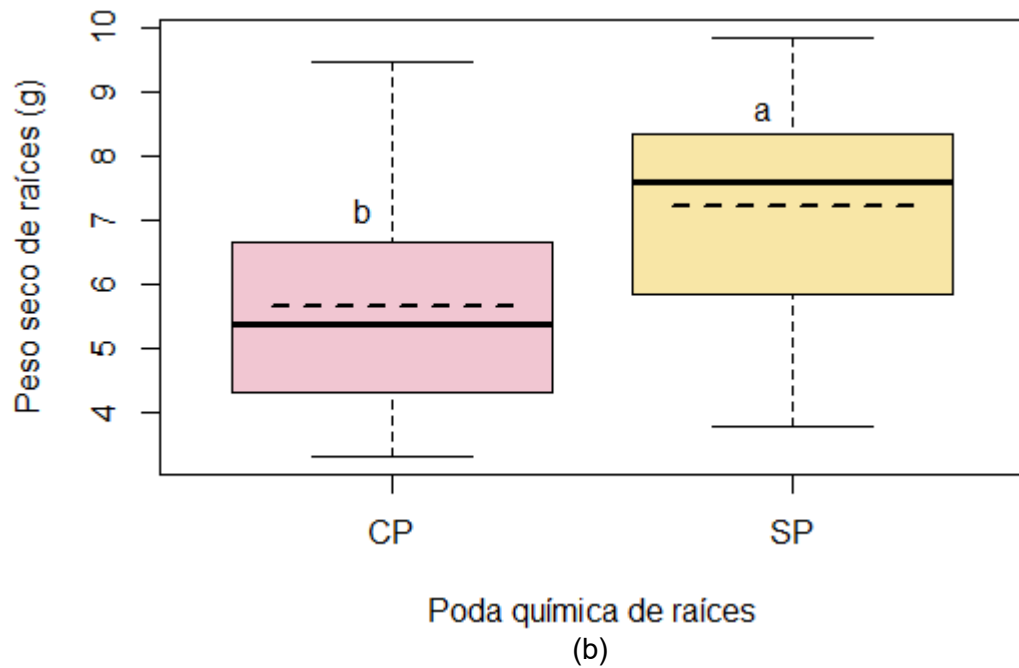
**Figura 12.** (a) Número de raíces nuevas de *A. chilensis* en relación con la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup> P). (b) Número de raíces nuevas en función de la poda química de raíces (CP y SP). Los límites inferior y superior de las cajas representan los percentiles 25 y 75, respectivamente. La línea discontinua en el centro de cada caja corresponde al valor promedio, mientras que la línea sólida representa la mediana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con un  $p \leq 0.05$  según la prueba de Tukey.



Para la variable de longitud de las tres raíces más largas, los resultados del análisis de varianza (tabla 2) reflejan que ninguna variable tiene significancia en *A. chilensis*. Los factores evaluados y su interacción no generaron ningún efecto significativo sobre la variable.

Tanto la fertilización fosfórica como la poda química generaron efectos significativos de forma independiente (efectos principales). El aporte de fósforo aumentó significativamente la biomasa de raíces nuevas, en comparación al tratamiento sin P (figura 13.a). Por su parte, la poda generó diferencias significativas al ser SP el tratamiento que generó mayor masa de raíces nuevas (figura 13.b), siendo esta diferencia en biomasa de raíces 1,6 gramos.





**Figura 13.** (a) Peso seco de las raíces nuevas (g) de *A. chilensis* en relación con la concentración de fósforo (0, 15, 60 y 120 mg L<sup>-1</sup> P). (b) Peso seco de número de raíces nuevas (g) en función de la poda química de raíces (CP y SP). Los límites inferior y superior de las cajas representan los percentiles 25 y 75, respectivamente. La línea discontinua en el centro de cada caja corresponde al valor promedio, mientras que la línea sólida representa la mediana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con un  $p \leq 0.05$  según la prueba de Tukey.

#### IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio muestran evidencia relevante sobre los efectos de la fertilización con fósforo y la poda química radicular en el desarrollo radicular de *Q. saponaria* y *A. chilensis*, dos especies nativas chilenas con un alto potencial para programas de restauración ecológica.

En cuanto a la evaluación de los eventos de riego, se evidenció que *A. chilensis* requirió una mayor frecuencia de riego y fertirriego en comparación con *Q. saponaria*, lo que sugiere diferencias en la demanda hídrica entre ambas especies. Esto puede estar relacionado con la estrategia de crecimiento de cada una. Además, especies de rápido crecimiento suelen tener una mayor eficiencia en la toma de agua y en el desarrollo de su arquitectura radicular para maximizar la exploración del sustrato (Villar-Salvador et al., 2012; Oliet et al., 2016). Por lo que *A. chilensis*, al ser una especie arbustiva de rápido crecimiento y desarrollo, colonizó más rápidamente el sustrato y generó una mayor biomasa radicular (Calderón-Ureña et al., 2025). En contraste, *Q. saponaria*, una especie arbórea, mostró un crecimiento más moderado en vivero, lo que podría explicar su menor requerimiento hídrico.

En ambas especies, la concentración de fósforo generó un impacto significativo en el desarrollo radicular. En el caso de *Q. saponaria*, los niveles de 60 y 120 mg L<sup>-1</sup> generaron respuestas de crecimiento similar, lo que indica que concentraciones superiores a 60 mg L<sup>-1</sup> no generan mejoras adicionales, sugiriendo este nivel como el óptimo. Por otra parte, en *A. chilensis*, una

concentración moderada de  $15 \text{ mg L}^{-1}$  fue suficiente para promover un desarrollo radicular significativo, lo que concuerda con estudios previos que destacan el papel esencial del fósforo en el crecimiento de raíces y cómo dosis controladas pueden optimizar costos sin afectar la calidad de las plantas (Oliet et al., 2008; Valdecantos et al., 2006).

En cuanto a la poda química de raíces, siendo esta una práctica que induce la quema de los meristemas apicales de la raíz y promueve un sistema radicular más fibroso se esperaba que promoviera la formación de nuevas raíces en ambas especies. Sin embargo, los resultados mostraron que en *Q. saponaria* la poda no generó efectos significativos, mientras que en *A. chilensis* generó una reducción tanto la cantidad como la biomasa de raíces nuevas. Otros estudios con especies leñosas, como *Pinus patula*, han reportado efectos variables. Aguilera et al. (2020) encontraron que, aunque la poda química genera un estrés inicial al afectar los meristemas radiculares, este no tuvo un impacto negativo en el crecimiento en campo. De hecho, las plantas sometidas a poda química presentaron mayor supervivencia, crecimiento en altura y tasas de crecimiento relativo en diámetro y altura en comparación con aquellas sin poda. De manera similar, Aguilera et al. (2021) reportaron que esta misma práctica promovió un mayor número de raíces nuevas y una tasa de crecimiento mensual de raíces de  $0,37 \text{ g g}^{-1} \text{ mes}^{-1}$ , comparado con  $0,25 \text{ g g}^{-1} \text{ mes}^{-1}$  en el tratamiento control. Adicionalmente, en *Pinus halapensis* se reportó un mayor número de raíces laterales y peso seco con la aplicación de la poda química con respecto al control

(Tsakalidimi y Ganatsas, 2006). Esto propone que la respuesta a la poda química de raíces es especie específica. De hecho, estudios previos han demostrado que la capacidad de regeneración radicular puede depender de la especie y su estrategia de absorción de recursos, donde algunas especies responden mejor a la poda química debido a su hábito de crecimiento y tolerancia al estrés radicular (Grossnickle, 2012; Villar-Salvador et al., 2012).

En *Q. saponaria*, se observó que las plantas sin poda presentaron raíces más largas, sugiriendo que la utilización de esta práctica puede limitar el desarrollo longitudinal en esta especie. Esto contrasta con lo reportado por Aguilera et al. (2021), quienes encontraron que la poda química en *Pinus patula* promovió la formación de raíces laterales y mejoró su distribución en el contenedor. Sin embargo, los resultados previos de su producción en vivero reportan que tanto las raíces finas como medianas generaron mayor longitud de raíces en las plantas sin poda química de raíces. (Calderón-Ureña et al., 2025) resultado que pudo afectar su comportamiento en el ensayo de desempeño.

Por su parte, *A. chilensis* generó un desarrollo radicular mayor que *Q. saponaria*, tanto en biomasa como en longitud. Este resultado se relaciona con su crecimiento en vivero, ya que *A. chilensis* desarrolló una estrategia de crecimiento más agresiva en vivero, colonizando completamente el contenedor (figura A1 – A2) y generando un sistema radicular más extenso. En contraste, *Q. saponaria* tuvo un crecimiento radicular más limitado en vivero, lo que concuerda con la observación de que esta especie responde de manera más moderada a

la fertilización con fósforo. El estudio de Calderón-Ureña et al. (2025), reportó que la poda química no superó la formación de raíces finas en *Q. saponaria*, en términos de longitud y volumen, en comparación con el tratamiento sin poda química, lo que sugiere que la respuesta radicular a esta técnica puede depender de la arquitectura propia de cada especie influenciada por su estrategia de crecimiento y exploración del sustrato.

La ausencia de interacción significativa entre la concentración de fósforo y la poda en ambas especies indica que los factores actúan de manera independiente, lo que simplifica la interpretación de los resultados y sugiere que las estrategias de manejo pueden abordarse por separado. Resultados similares se reportan en otros estudios con especies mediterráneas (Oliet et al., 2016; Villar-Salvador et al., 2012).

En función de estos resultados y considerando la necesidad en la producción de plantas que desarrollen un buen desempeño radicular para objetivos de restauración, para *Q. saponaria* es recomendable una fertilización con 60 mg L<sup>-1</sup> de fósforo para maximizar el desarrollo radicular, mientras que la poda química no es necesaria debido a su escaso efecto. Para *A. chilensis* en cambio la concentración de 15 mg L<sup>-1</sup> de P, fue suficiente para optimizar el crecimiento radicular, y se debe evitar la poda química, ya que afecta negativamente la regeneración de raíces.

Dado que el fósforo fue el nutriente central evaluado, futuras investigaciones podrían considerar combinaciones con nitrógeno y potasio, los cuales han

mostrado efectos sinérgicos en el desarrollo radicular en otros estudios (Razaq et al., 2017; Sardans y Peñuelas, 2005). No obstante, si bien el efecto de la poda fue menor que el de las concentraciones de fósforo, la respuesta generada en arquitectura radicular debe ser evaluada en pruebas de desempeño al déficit hídrico o durante el establecimiento en campo.

Este estudio aporta información relevante para optimizar prácticas de vivero en especies nativas chilenas de interés ecológico, promoviendo un desarrollo radicular eficiente y mejorando el éxito de las plantaciones en campo.

## V. CONCLUSIONES

La fertilización con fósforo tiene un impacto significativo en el desarrollo radicular de *Q. saponaria* y *A. chilensis*. En quillay, 60 mg L<sup>-1</sup> se identificó como la concentración óptima de fósforo, mientras que, para maqui, 15 mg L<sup>-1</sup> fue una concentración suficiente para promover su crecimiento radicular. Esta diferencia podría estar relacionada con el hábito de crecimiento de cada especie. Como árbol, *Q. saponaria* requiere una mayor inversión en raíces para sostener su crecimiento a largo plazo, mientras que *A. chilensis*, al ser un arbusto de crecimiento más rápido, aprovecha eficientemente concentraciones más bajas de fósforo para colonizar el sustrato en menos tiempo.

La poda química de raíz mostró un efecto significativo en *Q. saponaria* al limitar la longitud promedio de las raíces, siendo más largas en plantas sin poda. En *A. chilensis*, la poda química tuvo un impacto negativo en todas las variables evaluadas, reduciendo la cantidad, longitud y biomasa de raíces. Si bien esta práctica no promovió el desarrollo radicular en ninguna de las dos especies estudiadas, es necesario continuar sus evaluaciones en condiciones restrictivas como el déficit hídrico.

La interacción entre la concentración P y poda química no fue significativa para ambas especies, lo que propone que ambos factores operan de manera independiente en las especies evaluadas.



Se recomienda optimizar las prácticas de vivero mediante la fertilización ajustada a cada especie (*Q. saponaria*: 60 mg L<sup>-1</sup>; *A. chilensis*: 15 mg L<sup>-1</sup>) y evitando la poda química, especialmente en *A. chilensis*.

Este estudio aporta conocimientos prácticos para mejorar las estrategias de producción en vivero de especies nativas, favoreciendo su éxito en proyectos de restauración ecológica, particularmente en zonas mediterráneas afectadas por el cambio climático.

Las hipótesis planteadas al inicio del estudio se cumplen parcialmente: La fertilización con fósforo mejora el desarrollo radicular de ambas especies. La poda química no es efectiva para *Q. saponaria* y no promovió el crecimiento radicular en *A. chilensis*.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, M., Álvarez-Maldini, C., Dumroese, R. K., Bannister, J. R., Cartes, E., & González, M. (2021). Producción de plantas nativas en Chile. ¿Es posible alcanzar los objetivos de restauración para 2035? *Tierra*, 10(1), 71.

Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., López-López, M. A., & Ordaz-Chaparro, V. M. (2020). Outplanting performance of *Pinus patula* Schlttdl. & Cham. as an effect of root pruning and containers used in the nursery. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 265–280.

Aguilera-Rodríguez, M.; Aldrete, A.; Vargas-Hernández, J.J.; López-Upton, J.; López-López, M.Á.; Ordaz-Chaparro, V.M. (2021) Morphology and Root Growth Potential of *Pinus patula* Produced in Trays with Root Pruning. *Agrociencia*, 55, 81–97.

Calderón-Ureña, F., Álvarez-Maldini, C., Acevedo, M., Sánchez-Olate, M. E., Dumroese, R. K., Sierra-Olea, A., Ovalle, J. F., & Esquivel-Segura, E. (2025). Phosphorus Fertilization and Chemical Root Pruning: Effects on Root Traits During the Nursery Stage in Two Mediterranean Species from Central Chile. *Plants*, 14(195).

Chapin, F. S., Schulze, E. D., & Mooney, H. A. (1990). The ecology and economics of storage in plants. *Annual review of ecology and systematics*, 21(1), 423-447.

Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in plant science*, 4, 442.

Donoso, S., Peña-Rojas, K., Pacheco, C., Durán, S., Santelices, R., & Mascaró, C. (2011). The physiological and growth response of *Acacia caven* under water stress and the application of different levels of biosolids. *Ciencia e investigación agraria*, 38(3), 425-438.

Dumroese, R. K., Landis, T. D., Pinto, J. R., Haase, D. L., Wilkinson, K. W., & Davis, A. S. (2016). Enfrentando los desafíos de la restauración forestal: Utilizando el concepto de planta objetivo. *PARA*, 37–52.

Duryea, M. L. (1984). Nursery cultural practices: impacts on seedling quality. In *Forestry Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings* (pp. 143-164).

Echeverría, C., Newton, A. C., Lara, A., Benayas, J. M. R., & Coomes, D. A. (2007). Impacts of forest fragmentation on species composition and forest structure in the temperate landscape of southern Chile. *Global Ecology and Biogeography*, 16(4), 426-439.

Fitter, A. H. (2002). Characteristics and functions of root systems. In *Plant roots* (pp. 49-78). CRC Press.

Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests*, 43(5), 711-738.

Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and soil*, 321(1), 117-152.

Honrubia, M. (2009). Las micorrizas: Una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 66 (SUPPL. 1), 133–144.

Jacobs, D. F., Salifu, K. F., & Seifert, J. R. (2005). Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. *New Forests*, 30(2), 235-251.

Landis, T. D. (2005). Sidestit or airslit containers. *Forest Nursery Notes*, 19, 17-19.

Landis, T. D., Dumroese, R. K., & Haase, D. L. (2022). Forest nursery manual for native plants. USDA Forest Service. Chapter 6: Substrates and their role in root health.

Lynch, J. (1995). Root architecture and plant productivity. *Plant physiology*, 109(1), 7-13.

Lynch, J. P. (2011). Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. *Plant physiology*, 156(3), 1041-1049.

Marschner, H. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants. *Academic press*.

Oliet J, E Robredo, JM Salazar, R Villar. (2008). Fertilización otoñal de encina en vivero: efecto sobre la morfología, nutrientes, potencial de enraizamiento y respuesta post-transplante. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 28: 171-176.

Oliet J, R Planelles, F Artero, J Domingo-Santos. (2016). Establishing *Acacia salicina* under dry Mediterranean conditions: The effects of nursery fertilization and tree shelters on a mid-term experiment with saline irrigation. *Ciencia e Investigación Agraria* 43(1): 69-84.

Prehn, Doris, Serrano, Carolina, Berrios, Carmen Gloria, & Arce-Johnson, Patricio. (2003). Micropropagación de *Quillaja saponaria* Mol. a partir de semillas. *Bosque*, 24(2), 3-12.

Razaq M, P Zhang, H Shen H, Salahuddin. (2017). Influence of nitrogen and phosphorous on the growth and root morphology of *Acer mono*. *PLoS ONE* 12(2): e0171321.

Ritchie, G. A., & Tanaka, Y. (1990). Root growth potential and the target seedling. Target seedling symposium: Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations, 37-51.

Salinas, J., Fuentes Díaz, V., González González, M., Pavez, C., & Soto Aguirre, D. (2012). Monografía de MAQUI *Aristotelia chilensis* (Mol.) Stuntz. Programa de Investigación de productos forestales no madereros. Instituto Forestal.

Saul, G. H. (1968). Copper safely controls roots of tubed seedlings. *Tree Planters' Notes* 19(1): 7-9.

Sardans J, J Peñuelas. (2005). Disponibilidad y uso del fósforo en los ecosistemas terrestres mediterráneos: la inspiración de Margalef. *Ecosistemas* 14(1): 29-39.

Tsakalimi, M.N.; Ganatsas, P.P. (2006). Effect of Chemical Root Pruning on Stem Growth, Root Morphology and Field Performance of the Mediterranean Pine *Pinus halepensis* Mill. *Sci. Hortic.* 109, 183–189.

Valdecantos A, J Cortina, VR Vallejo. (2006). Nutrient status and field performance of tree seedlings planted in Mediterranean degraded areas. *Annals of Forest Science* 63: 249-256.

Villar-Salvador P, J Puértolas, B Cuesta, JL Peñuelas, M Uscola, N Heredia-Guerrero, JM Rey Benayas. (2012). Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations. Insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival. *New Forests* 43(5-6), 755-770.

Vogel, H., Peñailillo, P., Doll, U., Contreras, G., Catenacci, G., & González, B. (2014). Maqui (*Aristotelia chilensis*): Morpho-phenological characterization to design high-yielding cultivation techniques. *Journal of applied research on medicinal and aromatic plants*, 1(4), 123-133.

## VII. APÉNDICE

Figura A.1. Desarrollo del sistema radicular de *A. chilensis* bajo los tratamientos de poda (CP) y sin poda (SP) química de raíz.

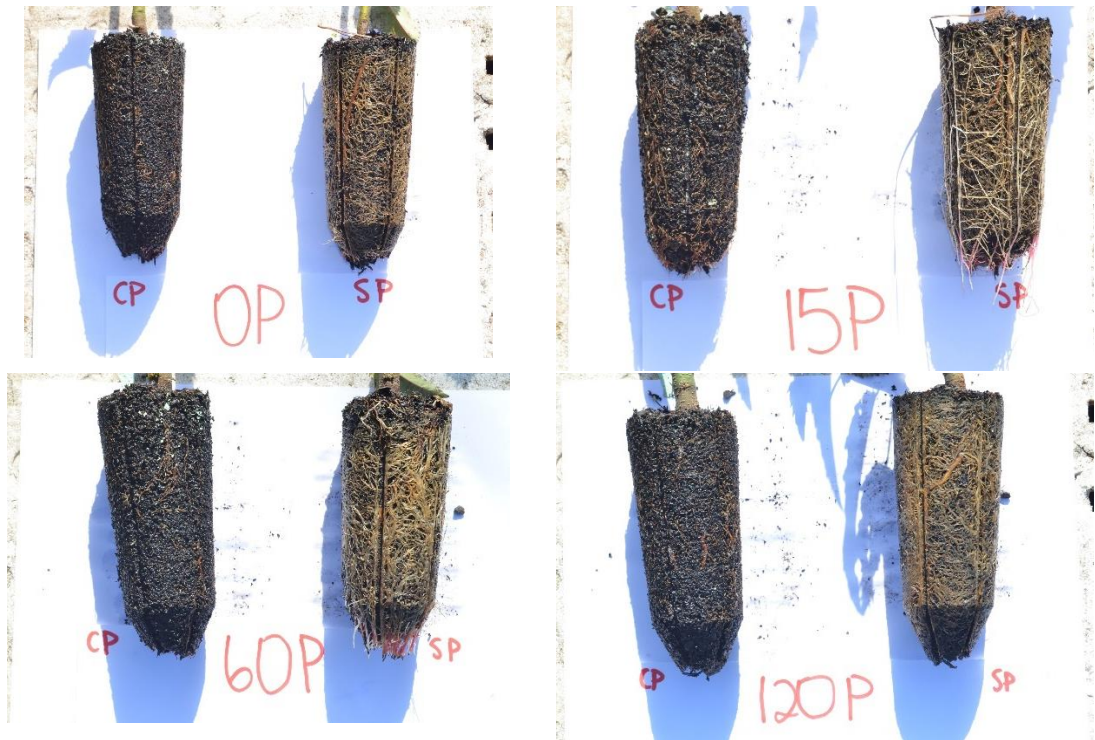


Figura A.2. Desarrollo del sistema radicular de *Q. saponaria* bajo los tratamientos de poda (CP) y sin poda (SP) química de raíz.

