



UNIVERSIDAD DE CHILE

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA CONSERVACIÓN
DE LA NATURALEZA**

**DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y DE LA CONSERVACIÓN DE
LA NATURALEZA**

**EFFECTO DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO EN UNA
PLANTACIÓN DE ESPECIES NATIVAS CON Y SIN RESTRICCIÓN
HÍDRICA EN LA REGIÓN DEL MAULE**

Memoria para optar a Título

Profesional de Ingeniero Forestal

SEBASTIÁN IGNACIO CASALI BUSTOS

Profesor Guía: Sr. Eduardo Martínez Herrera. Ingeniero Forestal. Doctor en Ciencias
Silvoagropecuarias y Veterinarias.

Colaborador: Sr. Sergio Espinoza M. Ingeniero Forestal. Doctor en Ciencias
Silvoagropecuarias y Veterinarias.

Santiago, Chile

2022

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y DE LA CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

EFECTO DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO EN UNA PLANTACIÓN DE ESPECIES NATIVAS CON Y SIN RESTRICCIÓN HÍDRICA EN LA REGIÓN DEL MAULE

Memoria para optar a Título

Profesional de Ingeniero Forestal

SEBASTIÁN IGNACIO CASALI BUSTOS

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Dr. Eduardo Martínez Herrera	7.0
Prof. Consejero Dr. Oscar Seguel Seguel	6.5
Prof. Consejero Dr. Carlos Magni Díaz	7.0

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por su ejemplo de lucha y coraje para siempre salir adelante, a su apoyo incondicional y a su esfuerzo para que nunca me haya faltado nada. A mis hermanos y padre por siempre creer en mí, a mi pareja Amaya Olavarría por brindarme su amor y apoyo incondicional para siempre salir adelante y a mis amigos/as y compañeros/as que cumplieron un rol fundamental en todo el proceso universitario.

Agradecer a Eduardo Martínez, mi profesor guía por brindarme su confianza, apoyo y conocimientos durante el desarrollo de la presente memoria y por su notable entrega como persona y docente durante mi estadía universitaria. Igualmente, agradecer a mis profesores consejeros Carlos Magni y Oscar Seguel por su disponibilidad y consejos.

A Paula Gonzáles, Ángela Faúndez, Suraj Vaswani e Imara Malverde por brindarme constante apoyo, consejos, conocimientos y preocupación durante todo el proceso. Y por supuesto al Centro de Semillas y Arboles Forestales (CESAF) de la Universidad de Chile, por gestionar y facilitar sus instalaciones, facilitando el desarrollo de este trabajo.

Finalmente agradecer al proyecto FIBN (2017) “Contribución a la rehabilitación del Bosque y Matorral Esclerófilo de la Región del Maule” y dirigida por el académico de la universidad Católica del Maule Dr Sergio Espinoza Meza, por facilitar el uso de sus plantaciones y proporcionar los datos para realizar este estudio.

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes bosque esclerófilo	2
1.2 Cambio climático y mega sequía	2
1.3 Estrés hídrico	3
1.4 El suelo, sus propiedades y su influencia en la vegetación	3
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivos específicos	5
2. MATERIAL Y MÉTODO	6
2.1 Material	6
2.1.1 Área de estudio	6
2.1.2 Clima	6
2.1.3 Geomorfología	7
2.1.4 Suelos	7
2.1.5 Uso de Suelos	7
2.1.6 Hidrografía	8
2.1.7 Vegetación	8
2.2 Método	9
2.2.1 Plantación de especies nativas del bosque esclerófilo	9
2.2.2 Descripción de variables y levantamiento de datos	10
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
3.1 Resultados	15
3.1.1 Supervivencia por condición hídrica	15
3.1.2 Supervivencia por especie	16
3.1.3 Crecimiento en DAC y altura por tratamiento	16
3.1.4 Crecimiento en DAC y altura por especie	16
3.1.5 Conductividad hidráulica	18
3.1.6 Resistencia a la penetración	19
3.1.7 Densidad aparente y contenido de agua gravimétrico del suelo	21
3.1.8 Propiedades fisicoquímicas del suelo medidas en laboratorio	23
3.1.9 Efecto de las propiedades fisicoquímicas del suelo sobre las plantas	25
3.2 Discusión	27

3.2.1 Supervivencia	27
3.2.2 Crecimiento en DAC y altura	28
3.1.3 Propiedades físicas del suelo	30
3.2.5 Propiedades químicas del suelo	34
5. CONCLUSIONES	37
BIBLIOGRAFÍA	38
APÉNDICES	47

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores del parámetro A para distintas clases texturales de suelo con radio de disco de 2,25 cm y valores de succión de -1, -2 y -4.	14
Cuadro 2. Porcentaje de individuos vivos por bloque..	16
Cuadro 3. Valores de conductividad hidráulica por bloque, obtenidos con minidisco infiltrómetro.	18
Cuadro 4. Valores de densidad aparente (g cm-3) y contenido de agua gravimétrico (%) por bloque.	22
Cuadro 5. Porcentaje de Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y humedad aprovechable por tratamiento y bloque..	23
Cuadro 6. Textura, Porosidad total (%), macroporosidad (%), microporosidad (%) y densidad real (Mg m-3) por tratamiento y bloque..	24
Cuadro 7. Propiedades químicas promedio del suelo según tratamiento..	25
Cuadro 8. Efecto del contenido de agua gravimétrico y densidad aparente sobre el crecimiento y sobrevivencia de las plantas.	25
Cuadro 9. Efecto de las propiedades físicas del suelo sobre el crecimiento y sobrevivencia de las plantas.	26
Cuadro 10. Efecto de las propiedades químicas del suelo sobre el crecimiento y sobrevivencia de las plantas.	26
Cuadro 11. Efecto de algunos macro y micronutrientes del suelo sobre el crecimiento de las plantas.	27
Cuadro 12. Relación entre densidad aparente del suelo y restricción del crecimiento radicular, en base a la textura del suelo y la densidad aparente..	31
Cuadro 13. Efecto de las propiedades químicas del suelo sobre la sobrevivencia y el crecimiento en DAC y altura.	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Predio Las Brisas, Región del Maule, Chile.	6
Figura 2. Ejemplo de distribución de bloques por sector.	10
Figura 3. Ejemplo de distribución espacial de individuos según especie por tratamiento.	10
Figura 4. Minidisco infiltrómetro para condiciones no saturadas..	13
Figura 5. Supervivencia por especie según tratamiento.	15
Figura 6. DAC promedio (mm) por especie según tratamiento.	17
Figura 7. Altura promedio (cm) por especie según tratamiento.	18
Figura 8. Resistencia a la penetración hasta los 45 cm de profundidad en los tratamientos	19
Figura 9. Resistencia a la penetración a profundidad de 45 cm por bloque en el sector con riego de salvamento.	20
Figura 10. Resistencia a la penetración a profundidad de 45 cm por bloque en el sector en condición de secano.	21
Figura 11. Contenido de agua gravimétrico (g g-1) y densidad aparente (g cm-3) por sector.	22
Figura 12. Disponibilidad de elementos relacionados al pH del suelo.	35

RESUMEN

La degradación de los ecosistemas de la zona central del país es resultado del uso intensivo del territorio por las principales actividades económicas y disturbios como incendios, con efectos que comprometen al medio edáfico. Los procesos erosivos tienen efectos directos sobre el medio físico y químico del suelo, principalmente a través de la pérdida del espacio poroso, consecuencia de la compactación, la cual posee efectos directos sobre la disponibilidad del recurso hídrico, lo que sumado a la actual mega sequía que atraviesa la zona central de Chile, afectaría a la vegetación a través de fenómenos como el estrés hídrico. El objetivo es evaluar el efecto de la compactación del suelo en una plantación de especies nativas con y sin restricción hídrica en la Región del Maule, como una condicionante de éxito de la restauración de ecosistemas en ambientes con distinto grado de compactación. Este ensayo se estableció en el año 2017 y constó de 2 sectores, el primero con riego de salvamento, mientras que el segundo sector se mantuvo en condición de seco. En el interior de cada sector se plantaron 300 individuos, distribuidos en 5 bloques con 60 plantas cada uno, con una distribución aleatoria en un marco de plantación de 1m x 1m. Las especies utilizadas fueron: *Acacia caven*, *Quillaja saponaria*, *Lithrea caustica*, *Peumus boldus*, *Colliguaja odorífera* y *Escallonia pulverulenta*. Se realizó un monitoreo que evaluó el diámetro a la altura del cuello (DAC), altura, sobrevivencia y distintas propiedades fisicoquímicas del suelo. El monitoreo realizado en septiembre del año 2021 arrojó que la aplicación de riego aumentó en un 32,5% el crecimiento en DAC y un 9,8% el crecimiento en altura. No se observaron notables diferencias entre los componentes fisicoquímicos del suelo, sin embargo, propiedades como la microporosidad, infiltración, macronutrientes, resistencia a la penetración, entre otros, tuvieron un efecto en el crecimiento en DAC y altura de los individuos; el riego y las condiciones fisicoquímicas del suelo no afectaron la sobrevivencia de los individuos. Para mejorar las limitaciones del recurso hídrico y del suelo, se recomienda el riego de salvamento y la evaluación del uso de prácticas de conservación de suelos y agua (OCAS).

Palabras clave: Compactación de suelo, mega sequía, estrés hídrico, riego, microporosidad.

ABSTRACT

The degradation of different ecosystems in the Central Zone of Chile is the consequence of an intensive use of the territory by economic activities as well as other disturbances such as fires, affecting not only the vegetation, but also the soil. Erosive processes have direct effects on the physical and chemical environment of the soil, mainly through the loss of pore space, a consequence of compaction. The degradation of the physical properties of the soil has direct effects on the availability of water resources, this added to the current mega drought in the Central Zone of Chile would affect the vegetation through phenomena such as water stress. The aim of this study is to evaluate the effect of soil compaction in a plantation of native species with and without water restriction in the Maule Region of Chile. This trial was established in 2017 in two sectors, the first sector was applied treatment corresponding to a dry season rescuee irrigation, while the second sector was maintained in rainfed condition. Within each sector, 300 individuals were planted, distributed in 5 blocks with 60 plants each. The plants were established randomly in a planting frame of 1m x 1m. The species planted were: *Acacia caven*, *Quillaja saponaria*, *Lithrea caustica*, *Peumus boldus*, *Colliguaja odorifera* and *Escallonia pulverulenta*. Monitoring was carried out to evaluate diameter at collar height (DAC), height, survival and different physicochemical properties of the soil. Results obtained in September 2021 showed that the application of irrigation increased growth in DAC by 32.5% and height growth by 9.8%. No important differences were observed between the physicochemical components of the soil, however, properties such as microporosity, infiltration, macronutrients, penetration resistance, among others, influenced the growth in DAC and height of the individuals. Irrigation and soil physicochemical conditions did not affect the survival of the individuals. Nevertheless, irrigation and the application of soil and water conservation practices (OCAS) are recommended to improve the growth in DAC and height of individuals on the Las Brisas property in the Maule Region.

Key words: Soil compaction, mega drought, water stress, irrigation, micro pores.

1. INTRODUCCIÓN

El estado actual de los ecosistemas y de la vegetación de la zona central del país son resultado del constante impacto causado por diversos agentes antropogénicos que han modificado el paisaje. Estas perturbaciones han tenido como resultado la fragmentación y deterioro del bosque esclerófilo, manteniéndose en la actualidad como parches de vegetación emplazados en sitios con baja capacidad de carga. En los lugares con mayor degradación dominan especies del bosque esclerófilo tales como *Lithrea caustica*, *Acacia caven*, *Quillaja saponaria* y *Colliguaja odorifera*, especies caracterizadas por sus bajos requerimientos hídricos y edáficos, lo que les ha permitido mantener sus poblaciones estables frente a la herbivoría, sequías e incendios (Fernández *et al.*, 2010; Van de Wouw *et al.*, 2011). Las especies *A. caven* y *C. odorifera* son recomendadas y ampliamente estudiadas para su utilización en la recuperación de zonas degradadas, ya que son especies que inclusive aumentan en número de individuos en zonas altamente erosionadas; por otro lado, las especies *Q. saponaria* y *L. caustica* también son utilizadas para la recuperación de zonas degradadas, si bien no aumentan en cantidad de individuos en estas áreas, son especies que persisten y están presentes en sectores con altos niveles de degradación del paisaje (Cornejo, 2016).

La degradación de los ecosistemas esclerófilos causados por actividades económicas como la agricultura, uso indebido de pesticidas, monocultivos, extracción de leña y carbón y uso ganadero no sostenible, han contribuido a un lento pero continuo proceso de erosión de suelos (Cattan, 1995; Gálvez, 2002; Cherni, 2003). Adicionalmente, las actividades mencionadas generan una presión mayor a la capacidad de soporte del suelo, lo que provoca cambios en su estructura, caracterizado por la pérdida de volumen y la consiguiente disminución en el tamaño de los poros (Martínez *et al.*, 2008). Este proceso se denomina compactación del suelo y tiene consecuencias a nivel de ecosistema, siendo los más importantes la disminución del crecimiento radicular, disminución de la disponibilidad de agua, mayor escurrimiento superficial y aumento en el riesgo de erosión (Gayoso y Alarcón, 1999).

La compactación y degradación de algunas propiedades del suelo tiene consecuencias directas en la disponibilidad del recurso hídrico para las plantas, sumado a la actual mega sequía que ha afectado a Chile central en la última década, causante del aumento de las temperaturas, olas de calor más frecuente y una disminución de las precipitaciones (Marquet *et al.*, 2019), factores que aumentan la susceptibilidad de las especies a sufrir consecuencias negativas relacionadas con el estrés hídrico. La aparición del estrés hídrico en las plantas implica la aparición de efectos químicos, hidráulicos, fisiológicos y metabólicos, los que tienen directa consecuencia en el crecimiento y desarrollo de las plantas, pudiendo provocar la caída y abscisión de hojas y frutos (Azcón-Bieto y Talón, 2000; Peña-Rojas *et al.*, 2018a).

La compactación del suelo y el estrés hídrico afectan negativamente en el desarrollo radicular y en el crecimiento de las plantas. Estos efectos pueden ser aminorados mediante la disminución de los niveles de compactación y la aplicación de riego, como en medidas de restauración ecológica basadas en la plantación de especies de mayor tolerancia como *L.*

caustica, *A. caven*, *Q. saponaria* y *C. odorifera*. Estas especies, al emplazarse en ecosistemas degradados, permiten mejorar las condiciones ambientales y con ello habilitar la zona para el establecimiento futuro de especies de menor tolerancia (Soto *et al.*, 2005). El suelo es entonces uno de los factores relevantes a tomar en cuenta para llevar a cabo un proyecto de restauración ecológica (Altamirano, 2008), entendiendo que cualquier afectación negativa al medio edáfico genera una merma en su capacidad productiva y en su valor como soporte para la vegetación (Mongil y Martínez, 2008).

1.1 Antecedentes bosque esclerófilo

El Bosque Esclerófilo agrupa una serie de asociaciones vegetales propias de la zona mesomórfica o mediterránea de Chile, presentándose desde la Región de Coquimbo hasta la Región del Biobío (Donoso, 1981). Estas formaciones vegetales poseen características en común, como la presencia dominante de especies esclerófilas o de hoja dura, las cuales se pueden calificar como arbustivas o arborescentes. El Tipo Forestal Bosque Esclerófilo se desarrolla únicamente en el clima mediterráneo, pero varía en función de la latitud, longitud y topografía. Sumado a esto, se encuentran las diversas perturbaciones antrópicas y la gran diversidad de relieves presentes en Chile, lo que favorece que esta formación posea una alta diversidad y variadas formas de vida (Donoso, 1981; Barriga, 2012)

Según Donoso (1981) el Tipo Forestal Bosque Esclerófilo presenta tres subtipos forestales definidos por su estructura y dinámica, los cuales son:

-*Subtipo Espinal*: Este subtipo corresponde a vegetación del tipo sabana ubicada en sectores bajos de la Cordillera de la Costa y de la Cordillera de los Andes, en cercanías del Llano Central y en los valles centrales. La especie dominante es el espino como especie leñosa, con cobertura de 100 y 300 individuos por hectárea.

-*Subtipo Rodales mixtos de especies arbóreas esclerófilas*: este bosque – matorral se caracteriza por presentar especies como: *P. boldus*, *L. caustica*, *Cryptocarya alba*, *Q. saponaria*, con ejemplares de *Schinus latifolius*, *Maytenus boaria* y *Kageneckia oblonga*, variando en latitud y exposición; otra característica es que presenta un sotobosque denso compuesto por otras especies esclerófilas. En las zonas de mayor humedad y sombrías, la especie predominante es peumo, al contrario, en zonas secas es quillay.

-*Subtipo Bosques hidrófilos de quebradas*: Esta formación vegetal se presenta principalmente en zonas de quebradas y riberas de cursos de agua. En estas zonas se pueden observar ejemplares del tipo hidrófilo, tales como *Beilschmiedia miersii*, *Beilschmiedia berteorana*, *Citronella mucronata*, *Crinodendron patagua*, *Pitavia punctata* y *Gomortega keule*. Además, se pueden apreciar otras especies que están presentes en el sur de Chile, tales como *Drimys winteri*, *Luma apiculata*, *Myrceugenia exsuca*, *Persea lingue*, entre otras.

1.2 Cambio climático y mega sequía

El clima es el factor fundamental que determina la distribución de la vegetación, es por esto que los cambios en el clima producidos por el aumento de las emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero a la atmósfera, poseen la potencialidad de afectar significativamente a los bosques y la silvicultura (Ciesla, 1996). A nivel global, el cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando (IPCC, 2021). A nivel local, la actual mega sequía que ha afectado a Chile central en la última década ha generado un aumento de las temperaturas, olas de calor más frecuente y una disminución de las precipitaciones. Esto ha despertado la duda de los posibles efectos en los diversos ecosistemas del país, lo que ha conllevado a un estudio y monitoreo de cada uno de ellos (Marquet *et al.*, 2019).

Distintos autores han observado indicios del cambio climático en la vegetación, expresado en una disminución paulatina del follaje en individuos arbóreos del bosque esclerófilo presentes en la cuenca de Santiago, así como también en otras zonas del país (Marquet *et al.* 2019). Debido a estos cambios en el clima, se prevé que una porción del Bosque Esclerófilo se convertirá en desierto, siguiendo un ritmo similar a los observados en la vegetación mediterránea de Europa (Cavieres *et al.*, 2006).

1.3 Estrés hídrico

El Bosque Esclerófilo se distribuye en un clima mediterráneo, es decir, un clima que durante su periodo estival baja la disponibilidad hídrica del suelo, lo que, sumado a las altas temperaturas y radiación solar, propician la aparición del estrés hídrico. El estrés hídrico es uno de los factores más limitantes del crecimiento, composición y distribución de las especies vegetales, a través de la afectación de distintos procesos como el metabolismo celular, ya que influye negativamente en la fotosíntesis, afectando finalmente el crecimiento vegetativo (Peña-Rojas *et al.*, 2018a). El déficit hídrico ocurre a diario y solo genera consecuencias en los individuos una vez que se prolonga a través del tiempo (Azcón-Bieto y Talón 2000). Este déficit puede causar efectos químicos, hidráulicos, fisiológicos y metabólicos, los que tienen directa consecuencia en el crecimiento y desarrollo de las plantas, pudiendo provocar la caída y abscisión de hojas y frutos (Azcón-Bieto y Talón, 2000; Peña-Rojas *et al.*, 2018a).

En especies de árboles y arbustos siempreverdes, el estrés hídrico se encuentra directamente relacionado con el hábito de enraizamiento. A mayor profundidad que abarca la raíz, estas poseerán potenciales hídricos más altos y menos variables, a diferencia de especies con raíces superficiales, las cuales poseen potenciales hídricos mayores, más variables, y mayores niveles de estrés (Cabrera, 2002). Esto permite que especies siempreverdes con raíces profundas posean balances de carbono positivos en épocas donde el recurso hídrico es limitante (Giliberto y Estay, 1981). Los patrones de enraizamiento en plantas son consecuencia de la influencia del ambiente en el desarrollo de un plan genético básico y los factores primarios que controlan estos patrones son la humedad, los nutrientes y las propiedades físicas del suelo (Canadell y Zedler, 1995).

1.4 El suelo, sus propiedades y su influencia en la vegetación

El suelo es un sistema abierto, tridimensional y constituido de tres fases (sólida, líquida y gaseosa), compuesto de material mineral (material parental), aire, agua y materia orgánica, sirviendo de soporte natural para que las plantas desarrollen su ciclo de vida (Ramírez, 1997; Wildner, y Da Veiga, 1995). Existen una serie de factores que influyen en la formación del suelo denominados “factores formadores de suelo”, definidos como *"agentes, fuerzas o condiciones que influyen, han influido o pueden influir sobre el material del suelo con la potencialidad de cambiarlo"*. Estos factores son: organismos, clima, material parental, relieve y tiempo. La combinación resultante entre todos estos factores resultará en la formación del suelo (Jenny, 1941), con propiedades físicas, químicas y biológicas inherentes a él y distintas a las propiedades del material parental.

Las propiedades físicas poseen gran importancia en el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, un ambiente óptimo para el crecimiento y desarrollo de los individuos se genera a través del equilibrio de las propiedades físicas, químicas y biológicas (CIREN, 2010). Las características físicas pueden ser fundamentales y derivadas, las primeras son las que no se derivan de otras propiedades, mientras que las segundas son derivadas de la interacción de las propiedades fundamentales. Dentro de las propiedades fundamentales está la densidad, estructura, consistencia, textura y temperatura, entre otras (Jaramillo, 2002); por su parte, características físicas derivadas son porosidad, compactación, capacidad de campo, profundidad radicular efectiva, entre otros (Baver *et al.*, 1973).

Por otra parte, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es una propiedad química fundamental para las plantas, pues la CIC tiene directa relación con la disponibilidad y solubilidad de nutrientes, así como también en la actividad de los microorganismos. Otras implicancias de esta propiedad es su efecto sobre la concentración de iones tóxicos y otros procesos que determinan la disponibilidad de nutrientes, en cuyo caso el pH también es relevante (Havlin *et al.*, 1999).

Las características biológicas son las asociadas a la influencia de organismos vivos en la composición y modificación del suelo, dentro de ellos se encuentra la microfauna, mesofauna y macrofauna (Jaramillo, 2002), aunque como indicador de calidad y estado de salud del suelo, el contenido de materia orgánica es un indicador ampliamente utilizado (Sparling, 1997).

La alteración a partir de procesos físicos, químicos o biológicos de los suelos en uno o en el conjunto de las propiedades anteriormente descritas genera la degradación del suelo. Esta degradación tendrá consecuencias directas en la fertilidad del suelo y en su capacidad productiva (Wildner y Da Veiga, 1995). En Chile, la degradación de los suelos se explica principalmente por la erosión, la cual se define como el proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos (Wildner, y Da Veiga, 1995). Según CIREN (2010) Chile posee cerca de un 64% de la totalidad de suelos del país en algún grado de erosión, en donde los suelos con grados de erosión mayores; entre moderada y muy severa, comprenden un 49% del total. En la zona central, donde se desarrolla el bosque esclerófilo, la erosión alcanza un 50% a nivel regional, siendo esta misma zona la de mayor riesgo de erosión en el futuro (CIREN, 2010).

Una de las expresiones de degradación más relevantes es la compactación del suelo, originada principalmente por la transformación de bosques a pastizales agrícolas. El constante paso de maquinarias y animales pastando generan una presión mayor a la capacidad de soporte del suelo, provocando cambios en su estructura, caracterizados por la pérdida de volumen y la disminución en el tamaño de los poros (Martínez *et al.*, 2008). La compactación posee una diversidad de consecuencias a nivel de ecosistema, siendo uno de los más relevantes el aumento de la escorrentía superficial a causa de la disminución de la infiltración (Belmonte *et al.*, 1999). Este fenómeno tiene un efecto directo sobre la vegetación, modificando los factores que inciden en el desarrollo radicular de las plantas. El aumento de la resistencia mecánica del suelo y la disminución del tamaño y volumen de poros pueden generar malformaciones durante el crecimiento radicular de las plantas, provocando efectos como la carencia de un sistema radicular profundo (Sellés *et al.*, 2012).

Todos estos procesos erosivos pueden afectar gravemente la actividad forestal, agrícola o ganadera. En el caso forestal, se han registrado problemas en las plantaciones forestales asociados a la deficiencia de Boro (Schlatter, y Gerding, 1984). Sin embargo, en la actualidad, el cambio de uso de suelos y la cobertura de suelos son una de las problemáticas de mayor importancia nacional, debido a que generan un deterioro de los servicios ecosistémicos del suelo, de sus propiedades y, por ende, dificultades en el re-establecimiento de plantaciones nativas (Ellies, 2004; Lal, 2004; Powlson *et al.*, 2011; Soto *et al.*, 2019).

En el caso del bosque nativo, existe escasa información asociada a la erosión de suelos y disponibilidad de nutrientes, sin embargo, se han realizado estudios relacionados con la erosión y su impacto en la regeneración (Wildner, y Da Veiga, 1995). Los diferentes efectos que genera la compactación y la actual crisis hídrica sobre el re-establecimiento de plantaciones nativas y, sumado al compromiso actual de Chile con acuerdos internacionales para la reforestación y disminución de gases de efecto invernadero (INDC, CMNUCC, CNUCLD), genera la necesidad de evaluar el efecto de la compactación del suelo en plantaciones de especies leñosas nativas frente a distintas condiciones hídricas, para asegurar el éxito de futuras plantaciones nativas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la compactación del suelo en una plantación de especies leñosas nativas con y sin restricción hídrica en el predio Las Brisas, Región del Maule.

1.5.2 Objetivos específicos

Evaluar el efecto de la compactación del suelo sobre la supervivencia y crecimiento en una plantación de bosque esclerófilo en el predio Las Brisas, Región del Maule.

Evaluar el efecto de la restricción hídrica en el crecimiento y desempeño fisiológico de una plantación de bosque esclerófilo en el predio Las Brisas, Región del Maule.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Material

2.1.1 Área de estudio

La estación experimental Las Brisas, perteneciente a la Universidad de Chile, se ubica en la Región del Maule, en la ruta L-30-M Sur que une las ciudades de San Javier y Constitución, en la intersección con la localidad de Nirivilo ($35,34^{\circ}$ S, $72,6^{\circ}$ O). La superficie ocupada corresponde a 92,5 ha y presenta elevaciones desde los 170 a 260 m.s.n.m. (CFCN, 2020; Castillo, 2016). Desde que el predio pertenece a la Universidad de Chile, ha cumplido el rol de contribuir a la investigación, docencia, extensión y transferencia tecnológica del quehacer profesional de la región (CFCN, 2020).

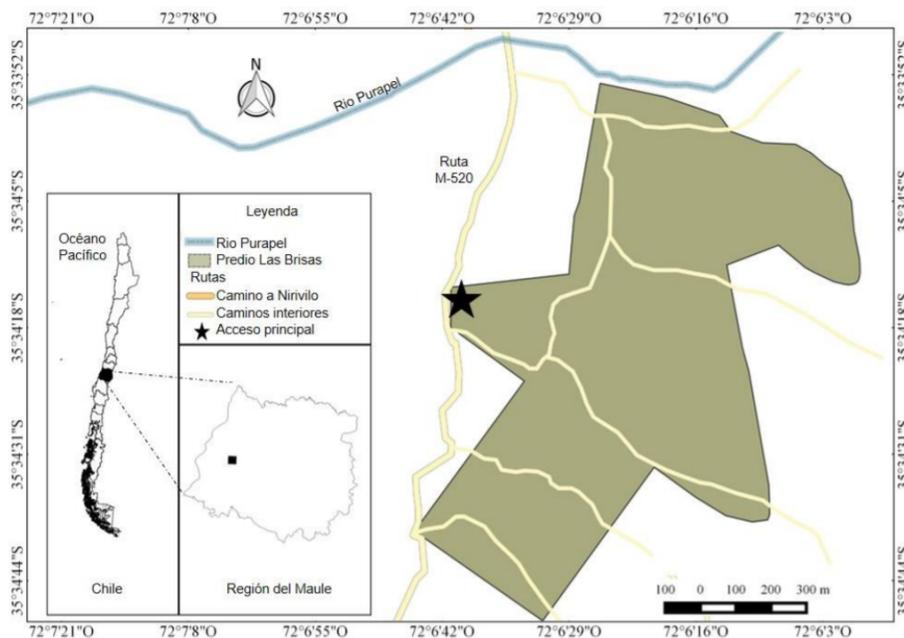


Figura 1. Predio Las Brisas, Región del Maule, Chile. Fuente: Matías Castillo, 2016.

2.1.2 Clima

Según la clasificación de Köppen modificada, la comuna de San Javier, en donde se encuentra ubicado el predio Las Brisas, posee un tipo climático Csb, es decir, un clima templado cálido con lluvias invernales; este tipo de clima corresponde al tipo templado

mesotermal (mediterráneo semiárido), caracterizado por presentar un régimen térmico con temperaturas que varían entre una máxima de 30,1°C en el mes de enero y una mínima en el mes de julio, con 4°C en promedio. La precipitación media anual es de 837 mm, presentando un periodo seco de 7 meses, mientras que la precipitación anual va desde los 802 a los 1001 milímetros, distribuyéndose de forma ascendente desde el poniente de la comuna y hacia el este de las cotas más altas (INE, 2012; PLADECO San Javier, 2018). La comuna posee una evapotranspiración anual de 1.521 mm y un déficit hídrico de 1030 mm, este último se concentra en el periodo estival, alcanzando su máximo en el mes de enero con un déficit de 198 mm (Santibañez *et al.*, 2017).

2.1.3 Geomorfología

Según Börgel (1983), la Comuna de San Javier posee dos formaciones principales, la primera corresponde al Llano central gluvio-glacio-volcánico, presente en el sector centro-oriental de mayor extensión, mientras que la segunda formación y, en donde se encuentra la estación experimental Las Brisas, corresponde a un sector restringido al Oeste de la Comuna, correspondiente a la Cordillera de la Costa oriental (PLADECO San Javier, 2018).

El predio Las Brisas posee una topografía mayoritariamente irregular, con presencia de laderas con distinto grado de pendiente, zonas relativamente planas, pendientes abruptas y áreas con cárcavas amplias y profundas (Castillo, 2016).

2.1.4 Suelos

Los suelos de la Comuna de San Javier son suelos graníticos, con una alta proporción de sílice y cuarzo, de poca profundidad, con bajo contenido de materia orgánica y baja retención de agua (INE, 2012). Los suelos de la localidad de Nirivilo son predominantemente de clase de capacidad de uso VII, abarcando un 45% de la superficie del territorio comunal (CIREN, 2020).

Dentro de la estación experimental predominan las zonas con capacidad de uso de suelo VI y VII, debido a la presencia de topografía mayoritariamente irregular, tales como pendientes pronunciadas, susceptibles a erosión o con erosión evidente, además de su baja retención de agua. El área de estudio presenta diferentes clases de erosión. Según Castillo (2016) por medio de una clasificación USDA (1993) estableció que cerca de 4 zonas poseían una clase 1, es decir, con menos de 25% de su superficie con pérdida de horizonte A, 6 zonas pertenecientes a clase 2, que poseen entre un 25 y 75% de pérdida del horizonte A, 4 zonas de clase 3, con porcentajes sobre el 75% y solo una con pérdida total del horizonte A, la que corresponde a una quebrada formada por una gran cárcava (Castillo, 2016).

2.1.5 Uso de Suelos

Según CORFO (1964) el área de estudio se encuentra dentro de la serie de suelo San Javier, que tiene como características generales un buen drenaje externo y un drenaje interno rápido, su formación viene dada por arenas aluviales de composición mixta y posee susceptibilidad a la erosión. El uso de suelo en la Comuna se encuentra dominado por Matorral, combinado con plantaciones forestales, terrenos agrícolas y menor proporción de praderas (CIREN, 2015). En las cercanías y en el interior de la estación experimental Las Brisas se pueden encontrar distintos tipos de uso de suelo, tales como habitación rural, plantación de especies exóticas, agricultura en pequeña escala y pastoreo en los amplios terrenos con matorral. La condición actual del predio viene dada por el uso histórico del suelo para fines agrícolas, forestal y ganadero, lo que, junto al efecto de las precipitaciones, incendios forestales, compactación por ganado, entre otros, han generado un deterioro del suelo y de otros componentes bióticos y abióticos del lugar (Castillo, 2016).

El fuego cobra importancia en la comuna de San Javier, debido a que es catalogada por CONAF (2016) como una localidad eminentemente forestal con un 71% de su superficie cubierta por bosque nativo, matorrales y plantaciones forestales, mientras que el 26% restante se encuentra dedicado a cultivos o praderas. El tipo y cantidad de vegetación de la zona generó que CONAF (2016) indicara que un 97% de la localidad es susceptible a quemarse. En la última década han ocurrido un total de 712 incendios en la comuna, afectando una superficie total de 23.698 ha y una superficie forestal de 23.474 ha, la distribución y afectación de estos incendios han afectado a los ecosistemas o pisos vegetacional más amenazados del país; pudiendo modificar sus ciclos biogeoquímicos y generar cambios en el suelo, fauna, procesos hidrológicos y geomorfológicos, calidad de aguas, entre otros (Prodom *et al.*, 1987; DeBano *et al.*, 1998; Shakesby y Doerr, 2006; Moody y Martin, 2009; CONAF, 2022; Pliscoff, 2015).

2.1.6 Hidrografía

Los principales cursos fluviales que se encuentran en la comuna de San Javier lo constituyen los ríos Perquilauquén, Purapel, Maule y Loncomilla, estos dos últimos son los que generan mayor aporte en el desarrollo de la actividad agrícola del sector norte y sur oriental de la comuna. El Río Purapel, de régimen pluvial, es el que mayor cercanía posee al predio y recibe aportes de cursos de agua estacionales que cruzan el área de estudio. La estación experimental posee un sector con características anegadas (vega), el cual se conecta con el Río Purapel y algunos esteros que presentan mayor caudal en la estación lluviosa (Castillo, 2016; PLADECO San Javier, 2018).

2.1.7 Vegetación

La comuna de San Javier presenta un predominio de policultivos y frutales en el que se incluyen sectores de vegetación de lomas, estepa de *A. caven* y Matorral esclerófilo y/o bosque esclerófilo secundario (Quintanilla, 1983). La vegetación presente en la comuna corresponde a matorral esclerófilo, con gran presencia de especies herbáceas y bosque nativo, siendo notablemente afectadas por las actividades antrópicas debido a la producción de leña, carbón, actividades de agricultura tradicional y silvipastoreo intensivo. El bosque nativo alcanza una ocupación del 14% del territorio comunal, el cual se encuentra

representado por especies como *Trevoa trinervis*, *A. caven*, *L. caustica*, *C. alba*, *P. boldus*, *Maytenus boaria*, *Q. saponaria*, *Baccharis linearis*, *Rubus ulmifolius*, *Rosa moschata*, entre otras (INE, 2012).

En la estación experimental Las Brisas la vegetación se ve influenciada por las características topográficas del sitio, presentándose formaciones de matorral esclerófilo en laderas y planicies o bosque esclerófilo en quebradas y zonas húmedas, con presencia de especies como *P. boldus*, *C. odorifera*, *Psoralea glandulosa*, *M. boaria*, *L. caustica*, *Escallonia pulverulenta*, *A. caven* y *Aristotelia chilensis*. Gran parte de los sectores tienen presencia de especies exóticas, expresándose como un mosaico de plantaciones de *Pinus radiata*, individuos aislados o en manchones de *Eucaliptus globulus* y zarzamora, siendo posible encontrar bosque nativo en las quebradas. La cobertura dominante del predio corresponde a la de individuos arbóreos con coberturas entre un 50-75%, mientras que el estrato leñoso bajo y herbáceo solo presentan coberturas de 5-10% y 25-50%, respectivamente (Castillo, 2016); sin embargo, la cobertura, estructura y riqueza de especies fue afectada severamente por la ocurrencia de incendios en el año 2017

2.2 Método

2.2.1 Plantación de especies nativas del bosque esclerófilo

Se evaluó una plantación realizada el año 2019 en la estación experimental Las Brisas financiada por el proyecto FIBN (2017) “Contribución a la rehabilitación del Bosque y Matorral Esclerófilo de la Región del Maule”. Esta plantación contiene 600 individuos, distribuidos en 2 sectores de 360 m² cada uno, dentro de los cuales se encuentran insertos 5 bloques de 72 m² con 60 plantas cada uno (Figura 2), de manera que cada bloque representa una repetición del tratamiento que incluye variables propias del ambiente, tales como pendiente y exposición.

La plantación se realizó con especies que se distribuyen naturalmente en la zona correspondientes a *Q. saponaria*, *A. caven*, *L. caustica*, *P. boldus*, *C. odorifera* y *E. pulverulenta*. Los individuos se establecieron en un marco de plantación de 1 m x 1 m y se plantaron en forma aleatoria al interior de cada sector y núcleo (Figura 3). El primer sector (S1, con plantas de borde) se ubicó en una ladera con exposición Sureste y pendiente variable, a este sector se le aplicó el tratamiento 1, el cual consiste en la aplicación de un mulch más un tubo protector y riego de apoyo al establecimiento. El siguiente sector (S2, sin plantas de borde) se instaló en una zona con pendiente variable y con exposición Oeste, a este sector se le aplicó el tratamiento 2, el cual consiste en la aplicación de un mulch más un tubo protector en condición de secano.

El riego de apoyo al establecimiento consistió en aplicar 2 litros de agua por planta con una frecuencia semanal durante los meses de noviembre a marzo. En ambas situaciones se utilizó el mismo mulch compuesto de corteza de *Pinus radiata* compostada a granulometría

de 5-8 mm y el mismo protector plástico con forma triangular de 60 cm de alto y con una base de 15 cm de ancho.

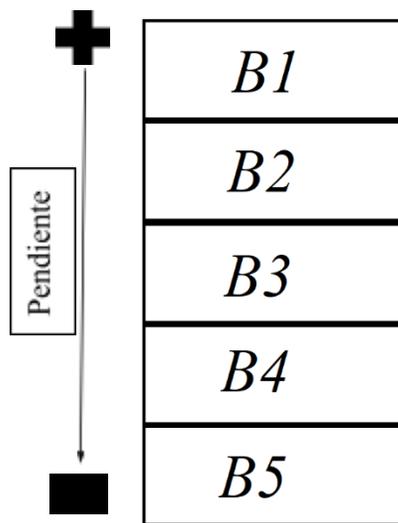


Figura 2. Ejemplo de distribución de bloques por sector. Símbolo positivo indica mayor pendiente. Símbolo negativo indica menor pendiente.

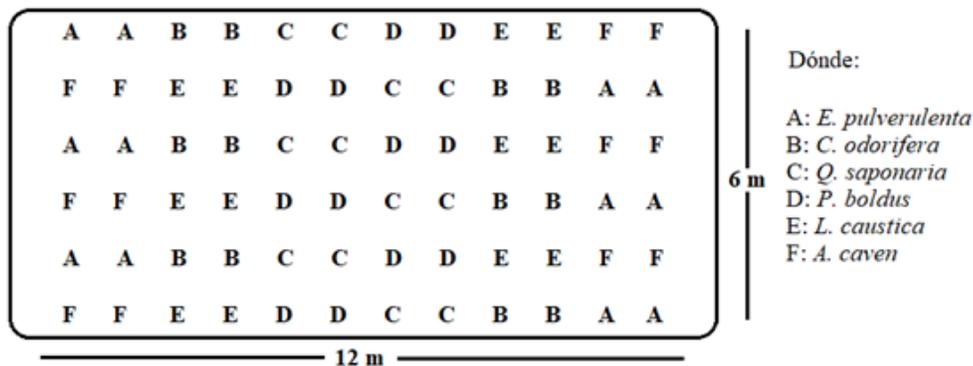


Figura 3. Ejemplo de distribución espacial de individuos según especie por tratamiento. Elaboración: propia.

2.2.2 Descripción de variables y levantamiento de datos

2.2.2.1 Descripción de variables

En primera instancia se tuvo en cuenta las variables de suelo, fisiología, supervivencia y crecimiento de las plantas obtenidas por el Proyecto Contribución a la rehabilitación del Bosque y Matorral Esclerófilo de la Región del Maule. Se utilizaron datos ya obtenidos por el proyecto en 2019 correspondientes a variables fisiológicas de intercambio gaseoso (fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática y eficiencia en el uso del agua), fluorescencia de la clorofila y potencial hídrico y, finalmente, las variables morfológicas asociadas al crecimiento y supervivencia.

En el mes de septiembre de 2021, se realizó un segundo monitoreo, en el cual se evaluaron distintas propiedades del suelo. Se tomó una muestra compuesta de suelo por bloque, es decir, 5 en el sector con riego y 5 en el sector sin riego. Las muestras fueron enviadas a un laboratorio acreditado para realizar su respectivo análisis, este contempló:

Reacción del suelo (pH), conductividad eléctrica (CE), materia Orgánica, macroelementos disponibles (N-P-K), cationes intercambiables (Ca-Mg-K-Na), capacidad de intercambio catiónico (CIC), micronutrientes disponibles (Fe-Mn-Zn-Cu-B), tamaño de partículas y clase textural, retención de agua a 0,33 y 15 bar, densidad aparente, densidad real, macroporosidad, microporosidad y Porosidad total. Adicionalmente se midió la compactación mediante el índice de cono, determinado con penetrómetro manual Eijkelkamp y la conductividad hidráulica, a través del uso de un minidisco infiltrómetro (Figura 3), realizando tres tensiones por bloque, a -1, -2 y -4 hectoPascales (hPa), obteniendo un total de 15 mediciones por parcela.

2.2.2.2 Diseño experimental y análisis de datos

El experimento en campo corresponde a un diseño en parcela dividida con 5 bloques. La parcela principal corresponde al nivel de riego (R_i) con dos niveles (sin riego y con riego), mientras que la sub-parcela corresponde a la especie (E_j) con seis niveles (seis especies). Las distintas variables de respuesta (Y_{ij}), se someterán al análisis de varianza (ANDEVA) de acuerdo con el siguiente modelo, con un nivel de confianza del 95%.

$$Y_{ij} = \mu + R_i + E_j + R * E + \varepsilon_i$$

Donde Y_{ij} es la variable fenotípica a medir, μ es la respuesta media de todas las unidades experimentales, R_i es el efecto fijo del riego, E_j corresponde al efecto fijo de la especie, $R * E$ corresponde a la interacción entre riego y especie, y ε_i corresponde al error asociado a la parcela principal.

Se probaron los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de las varianzas. Tras no cumplir los supuestos para realizar una ANDEVA, se realizaron pruebas no paramétricas (i.e. Kruskal Wallis). Para evaluar el efecto de la posición topográfica sobre la sobrevivencia de los individuos por tratamiento, se realizó un ANDEVA de una vía por sector (diseño completo al azar). En los casos que existieron diferencias significativas entre los niveles de los factores se realizaron pruebas de comparación múltiple. Se evaluaron diferentes pruebas de comparación múltiple y se seleccionaron aquella que minimicen tanto el error de tipo I, como el de tipo II.

Para verificar el efecto de la compactación y de otras variables del suelo en la respuesta de las plantas, se realizó un análisis de correlación lineal de Pearson, donde se analizó su coeficiente y probabilidad. Coeficientes cercanos a 1 o -1 indican que la relación existente entre ambas variables será más fuerte, debido a que existe una menor dispersión entre puntos; entre más cercano a 0 mayor dispersión existirá en la nube de puntos y mayor debilidad tendrá la relación. La probabilidad entre variables indica la existencia de significancia estadística entre variables, P-value < 0,05 indica significancia estadística.

2.2.2.3 Levantamiento de datos

La obtención de las muestras compuestas constó de la realización de tres puntos ubicados aleatoriamente dentro de cada bloque (posición topográfica), a una profundidad de 0 a 30 cm y se mezcló, obteniendo cinco muestras compuestas por tratamiento (1 muestra compuesta por bloque); posteriormente las muestras fueron enviadas a un laboratorio acreditado para el análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Para medir la densidad aparente se preparó el sitio removiendo toda maleza y resto de materia orgánica, sin perturbar el horizonte superficial del suelo. Luego se obtuvo una muestra de suelo a partir de un cilindro de volumen conocido, obteniendo tres muestras por bloque, conformando un total de 15 muestras por tratamiento. Posteriormente estas fueron llevadas al Centro de Semillas y Árboles Forestales (CESAF), para ser secadas en estufa a 105°C hasta alcanzar peso constante, previo registro de la masa húmeda y posterior al secado su masa seca. Finalmente, se calculó su densidad aparente con la siguiente ecuación:

$$Da = \frac{\text{Masa suelo seco}}{\text{Volumen cilindro}}$$

A partir del secado de muestras utilizado para el cálculo de densidad aparente, se procedió a estimar el contenido de agua gravimétrico con la siguiente fórmula:

$$\omega(\%) = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de suelo seco}}$$

La resistencia a la penetración se midió a capacidad de campo (CC) con penetrómetro manual Eijkelkamp para profundidades de 45 cm. Para realizar la medición con este instrumento se representó cada sector como un plano cartesiano, siendo el eje “X” el de menor longitud del sector (12 m), el eje “Y” el de mayor longitud (30 m) y el eje “Z” el dato obtenido por la medición con el aparato manual Eijkelkamp (9 mediciones en intervalos de 5 cm conformando un total de 45 cm). La primera medición se realizó cercano al primer individuo plantado (punto de origen de cada sitio) para luego realizar dos mediciones adicionales en el eje X, a los 6 y 12 metros. Las siguientes mensuras se realizaron de igual forma, midiendo en el eje vertical “Y” a los 6, 12, 18, 24 y 30 m y en el eje horizontal “X” a los 0, 6 y 12 m.

La medición de la conductividad hidráulica se realizó con un infiltrómetro sobre la superficie del suelo. Antes de instalar el equipo se preparó el sitio, este acondicionamiento constó de una limpieza del terreno, removiendo cualquier resto de materia orgánica y de maleza con especial cuidado de no alterar el horizonte superficial del suelo. Luego de esto se agregó una fina capa de arena con la finalidad de asegurar el contacto de la membrana inferior del instrumento con el medio edáfico. Una vez instalado el infiltrómetro, se dispuso el tubo de control de succión (Figura 3) en -1 hPa, registrándose el volumen de agua en

intervalos de 30 segundos hasta completar un tiempo de 10 minutos de iniciada la prueba. Una vez finalizada la medición se repitió el procedimiento para las otras tensiones en forma creciente (-2 y -4 hPa de presión). El volumen infiltrado se dividió por el área de la base del instrumento ($15,9 \text{ cm}^2$) para obtener la altura de agua infiltrada (Meter, 2021).

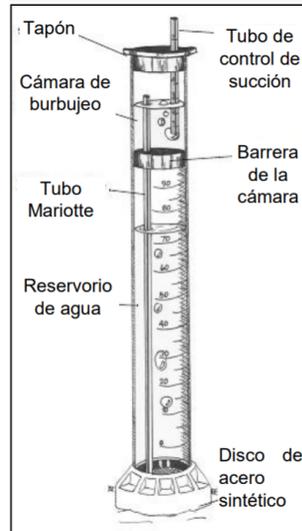


Figura 4. Minidisco infiltrómetro para condiciones no saturadas. Fuente: Meter Group (2021).

Para el análisis y medición de datos se utilizó el método propuesto por Zhang (1997; Meter, 2021) el cual se basa en la medición acumulativa de la infiltración en un tiempo y tensión determinada. Tras la obtención de los datos se aplicaron las siguientes funciones:

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t}$$

Donde I corresponde a la infiltración, C_1 y C_2 son parámetros de ajuste. El ajuste corresponde a una expresión transformada de un modelo cuadrático, en que C_1 se relaciona a la permeabilidad y corresponde a la curvatura de una parábola en el dominio de los datos empíricos, mientras que C_2 corresponde a la sortividad del suelo (pendiente estabilizada de la parábola), t corresponde al tiempo (Meter, 2021). Por consiguiente, la conductividad hidráulica (k) se calcula de la siguiente manera:

$$K = \frac{C_1}{A}$$

Donde C_1 corresponde a la curvatura de la función determinada por la infiltración acumulada a dicha tensión en función del tiempo, función del tipo polinómica descrita en la ecuación 1. El componente A es un valor que relaciona los parámetros de Van Genuchten

para un tipo de suelo a una velocidad de succión y radio de disco infiltrómetro dado (Meter, 2021). El parámetro A se calcula de la siguiente forma:

$$A = \frac{11,65(n^{0,1}-1)\exp[2,92(n-1,9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0,91}}, n \geq 1,9$$

$$A = \frac{11,65(n^{0,1}-1)\exp[7,5(n-1,9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0,91}}, n < 1,9$$

En donde n y α parámetros de ajuste de Van Genuchten, r_0 el radio de la base del minidisco y h_0 corresponde a la tensión del suministro de agua. Los valores de A serán determinados por la clase textural del suelo determinada en laboratorio, sus valores se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores del parámetro A para distintas clases texturales de suelo con radio de disco de 2,25 cm y valores de succión de -1, -2 y -4. Fuente: Meter Group, 2021.

Textura	A		
	-1	-2	-4
Franco arcillo arenoso	3,52	3,24	6,15
Arcillo arenoso	3,57	4,09	5,36
Arcilloso	4,1	4,3	4,74

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Sobrevivencia por condición hídrica

La medición realizada en junio del año 2021 arrojó que el tratamiento con riego de salvamento (S1), obtuvo una sobrevivencia de 94,7%. El tratamiento correspondiente a la situación de secano (S2) alcanzó una sobrevivencia del 92,4%. El promedio de sobrevivencia total fue de 93,6%. A partir del análisis estadístico se observaron interacciones entre el tratamiento y las especies *A. caven* y *P. boldus*. Particularmente *A. caven* presentó sobrevivencia del 78% en el sector de secano y 92% en condición con riego, al contrario, *P. boldus* alcanzó sobrevivencias de 96 y 78%, en condición de secano y riego de salvamento, respectivamente (Figura 5).

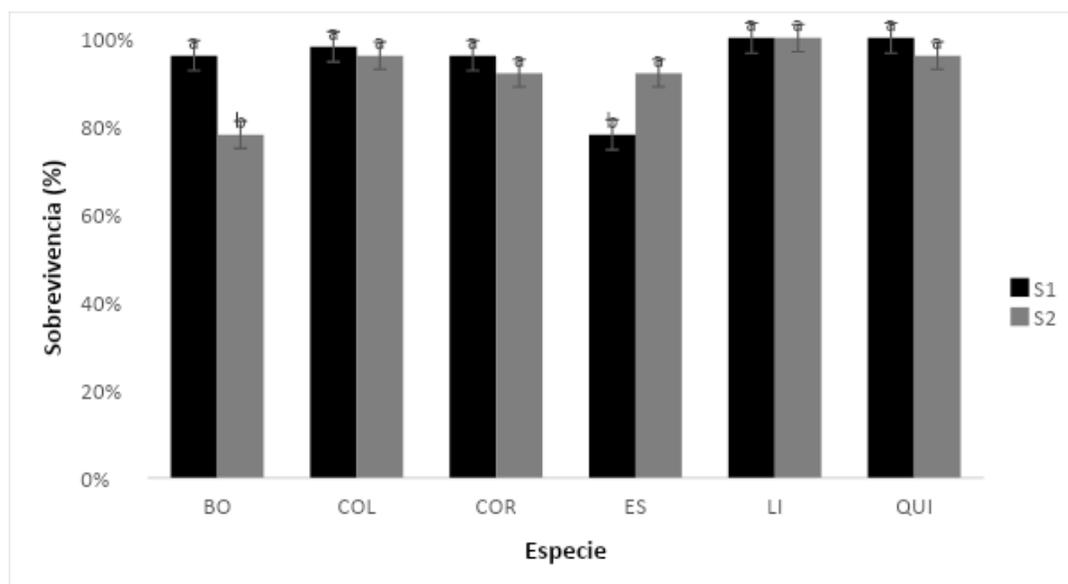


Figura 5. Sobrevivencia por especie según tratamiento. S1: Sector con riego de salvamento, S2: Sector sin riego; BO: *P. boldus*, COL: *C. odorífera*, COR: *E. pulverulenta*, ES: *A. caven*, LI: *L. caustica* y QUI: *Q. saponaria*. Letras distintas indican diferencias significativas (P-value < 0,05).

Al evaluar el efecto de la posición topográfica dentro de cada sector, se obtuvo que en el sector con riego de salvamento el bloque 2 (altos de ladera) presentó la menor cantidad de individuos vivos, con un 91,7%, mientras que el bloque 1 y 5 (alto y bajos de ladera, respectivamente) alcanzaron sobrevivencias del 96,7%. En la condición de secano, el

bloque 1 presentó la menor sobrevivencia, con un 88,3%, al contrario, los bloques 3 y 4 obtuvieron la mayor sobrevivencia, con el 95% de individuos vivos (Cuadro 2). La posición de los bloques o el efecto topográfico no generó efectos significativos en la sobrevivencia.

Cuadro 2. Porcentaje de individuos vivos por bloque. Donde S1: Sector con riego de salvamento; S2: Sector en condición de secano.

Tratamiento	Bloque	Sobrevivencia (%)
S1	1	96,7
	2	91,7
	3	93,3
	4	95,0
	5	96,7
S2	1	88,3
	2	91,7
	3	95,0
	4	95,0
	5	92,0

3.1.2 Sobrevivencia por especie

A nivel de especies, la especie con la menor cantidad de individuos en el sector 1 (riego de salvamento) corresponde a *A. caven*, con una mortalidad de 78%. Las demás especies presentan sobrevivencias sobre el 96%, resaltando las especies *L. caustica* y *Q. saponaria* con el 100% de individuos vivos. En el sector 2 (condición de secano) la especie que presentó menor cantidad de individuos vivos fue *P. boldus*, con un 78% de sobrevivencia. La mayor mortalidad de esta especie se presentó en el bloque 5 en donde se alcanzó una sobrevivencia del 60%. Las especies restantes presentan un porcentaje de individuos vivos sobre el 92% y nuevamente resalta la especie *L. caustica*, con el 100% de individuos vivos. A nivel general la especie *L. caustica* es la que mayor cantidad de individuos presentó con un 100% de sobrevivencia, mientras que *A. caven* fue la especie con menor sobrevivencia con un 85% de sus individuos vivos (Figura 5).

3.1.3 Crecimiento en DAC y altura por tratamiento

Al medir el diámetro a la altura del cuello (DAC) en campo, se observó que en el tratamiento con riego de salvamento (sector 1) obtuvo valores de crecimiento promedios de 6,67 mm en DAC, al contrario, el sector en condición de secano, la vegetación creció en promedio 4,5 mm en DAC, es decir, se observó una diferencia en crecimiento en DAC de un 32,5% con la condición de secano, presentando diferencias significativas según el tipo de tratamiento. En términos de altura, las especies crecieron en promedio 30,27 cm en el tratamiento con riego de salvamento y 27,33 cm en la condición de secano, nuevamente el tratamiento con riego de salvamento posee mayor crecimiento que la condición de secano, creciendo un 9,7% por sobre la condición sin riego, sin embargo, no se presentaron diferencias significativas según tratamiento.

3.1.4 Crecimiento en DAC y altura por especie

La medición del DAC arrojó que las especies que presentaron menor crecimiento fueron *P. boldus* y *A. caven*, con crecimientos promedio de 4,4 y 3,6 mm, respectivamente, las demás especies presentaron crecimientos similares, resaltando *L. caustica*, con crecimiento promedio en DAC de 9,5 mm en el sector con riego de salvamento (Figura 6). En la condición de secano, nuevamente las especies *P. boldus* y *A. caven* fueron las que menor crecimiento promedio obtuvieron, con 2,4 y 3,3 mm, respectivamente, las demás especies mostraron crecimientos similares, siendo *Q. saponaria* y *L. caustica* las especies en las que se observó mayor crecimiento, con DAC respectivos de 5,9 y 5,7 mm.

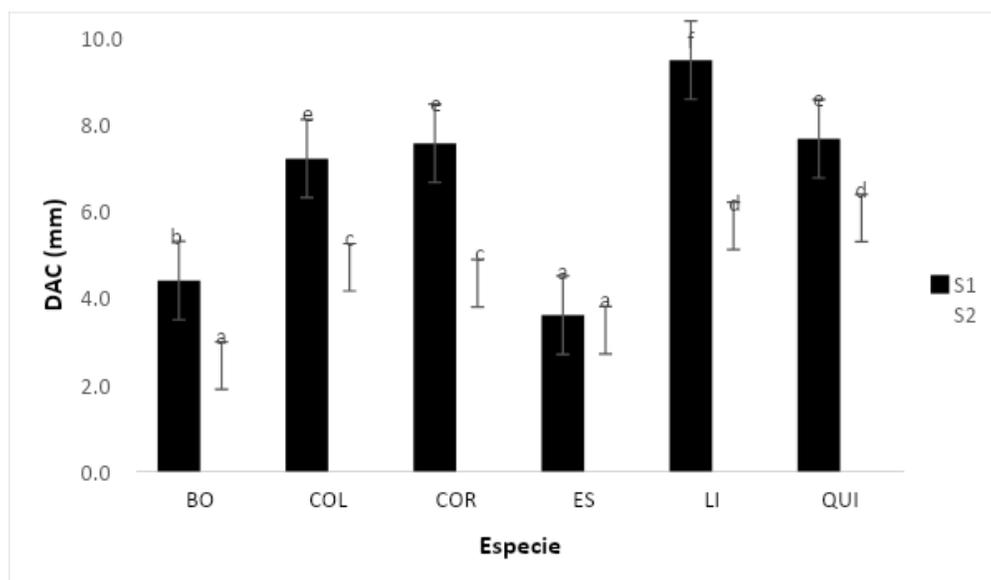


Figura 6. DAC promedio (mm) por especie según tratamiento. S1: Sector con riego de salvamento, S2: Sector sin riego; BO: *P. boldus*, COL: *C. odorífera*, COR: *E. pulverulenta*, ES: *A. caven*, LI: *L. caustica* y QUI: *Q. saponaria*. Letras distintas indican diferencias significativas (P-value < 0,05).

En términos de altura por especie (Figura 7) se presentan valores similares a los medidos en DAC, donde las especies *P. boldus* y *A. caven* muestran los valores más bajos en crecimiento, con alturas promedio de 21,8 y 20,7 cm, respectivamente, a su vez la especie que mayor crecimiento obtuvo fue *E. pulverulenta*, con crecimientos promedio de 39,0 cm. La condición de secano presenta altura menores, donde nuevamente *P. boldus* es la que presenta menor crecimiento promedio, con 18,2 cm de altura, mientras que *L. caustica* fue la especie que mayor crecimiento presentó, con 31,3 cm.

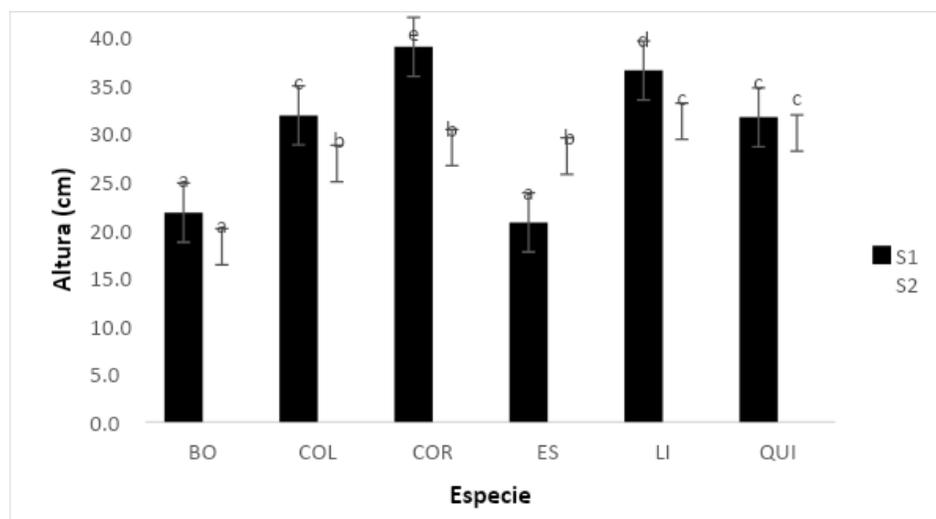


Figura 7. Altura promedio (cm) por especie según tratamiento. S1: Sector con riego de salvamento, S2: Sector sin riego; BO: P. boldus, COL: C. odorífera, COR: E. pulverulenta, ES: A. caven, LI: L. caustica y QUI: Q. saponaria. Letras distintas indican diferencias significativas (P-value < 0,05).

3.1.5 Conductividad hidráulica

Los valores de conductividad hidráulica saturada (Ks) obtenidos por el minidisco infiltrómetro se encuentra en ambos sectores por debajo de 1 cm h^{-1} , los valores más altos de Ks se obtuvieron en el sector 1 (tratamiento con riego), con valores que fluctúan entre los $0,24$ y $0,69 \text{ cm hr}^{-1}$ (Cuadro 3), con promedio total de $0,4 \text{ cm hr}^{-1}$. Para la condición de secano, los valores de Ks fluctúan entre los $0,12$ y $0,41 \text{ cm hr}^{-1}$, con promedio total de $0,197 \text{ cm hr}^{-1}$.

Cuadro 3. Valores de conductividad hidráulica por bloque, obtenidos con minidisco infiltrómetro. S1: Sector con riego de salvamento, S2: Sector sin riego, Ks: Conductividad hidráulica saturada.

Tratamiento	Bloque	Ks (cm/hora)
S1	1	0,45
	2	0,31
	3	0,33
	4	0,24
	5	0,69
S2	1	0,41
	2	0,16
	3	0,20
	4	0,10
	5	0,12

3.1.6 Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) promedio presentó diferencias entre tratamientos en los primeros 15 cm de profundidad (Figura 8). El tratamiento sin riego es el sector en el que se aprecian mayores valores de compactación, alcanzando los $37,9 \text{ kg cm}^{-2}$ en los primeros 5 cm de profundidad, valor que disminuye a mayor profundidad. Al contrario, la condición con riego de salvamento presenta valores similares en profundidad, sin embargo, a los 5 y 10 cm de profundidad se observa una RP menor, con 28,1 y $21,1 \text{ kg cm}^{-2}$.

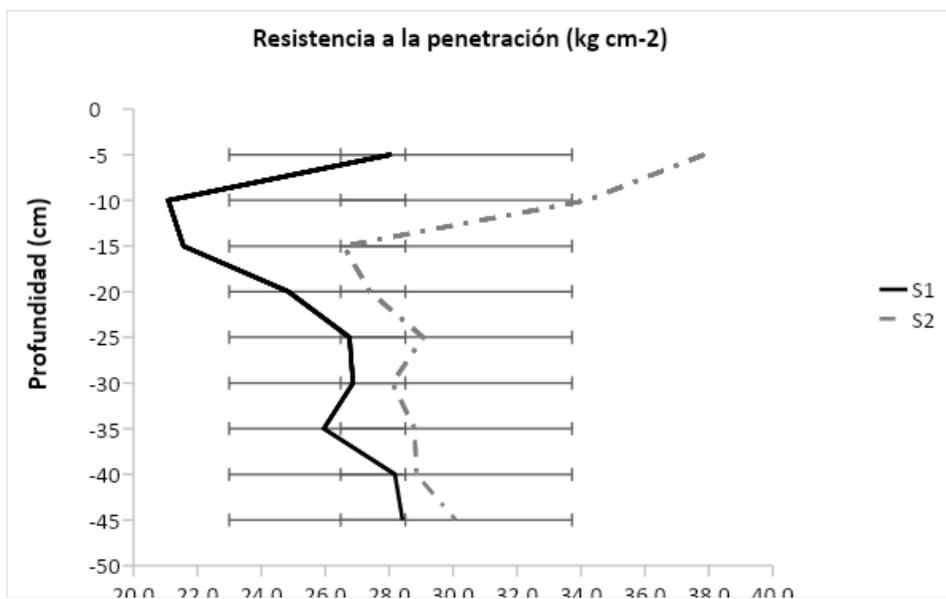


Figura 8. Resistencia a la penetración hasta los 45 cm de profundidad en los tratamientos S1: Sector con riego de salvamento y S2: Sector sin riego.

La medición realizada con penetrómetro en el sector con riego de salvamento arrojó que los 5 bloques poseen valores similares de resistencia a la penetración en los primeros 10 cm de profundidad (Figura 9), sin embargo, a medida que aumenta la profundidad, los bloques 4 y 5 (sección de baja ladera) aumentan su resistencia a la penetración, alcanzando valores de $39,4$ y $32,0 \text{ kg cm}^{-2}$, respectivamente, a profundidad de 40 cm. El bloque 3 (sección media ladera), es el que presenta menor compactación, alcanzando un valor mínimo de $17,4 \text{ kg cm}^{-2}$ a 15 cm de profundidad. La mayor resistencia a la penetración promedio se obtuvo en los primeros 5 cm y entre los 40 y 45 cm de profundidad, alcanzando valores fluctuantes entre los $28,1$ y $28,4 \text{ kg cm}^{-2}$. Al contrario, la menor resistencia a la penetración se obtuvo entre los 10 y 15 cm de profundidad, con valores de $21,1$ y $21,6 \text{ kg cm}^{-2}$ respectivamente.

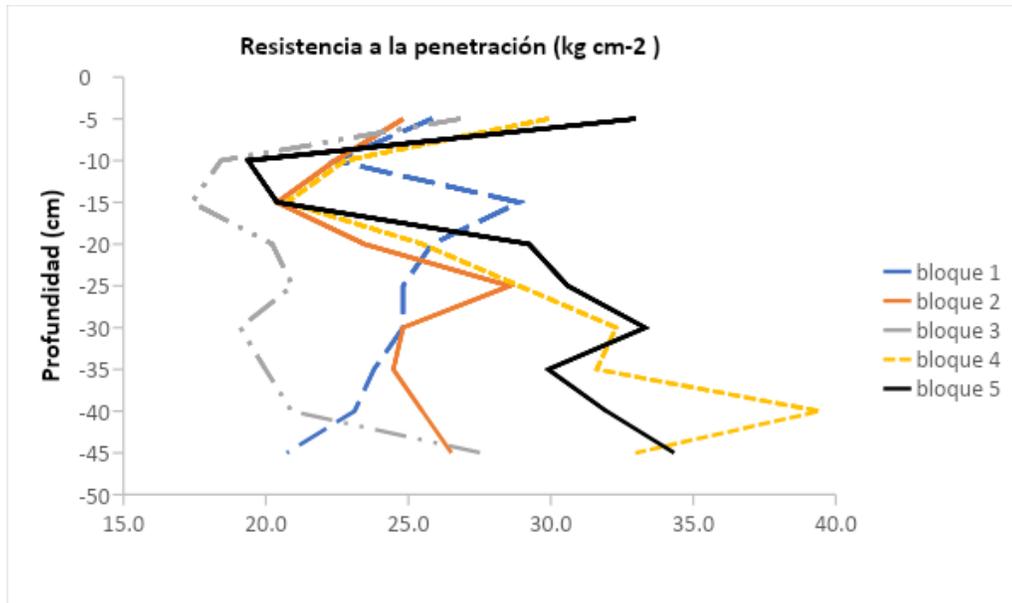


Figura 9. Resistencia a la penetración a profundidad de 45 cm por bloque en el sector con riego de salvamento.

La condición de secano es la que presenta mayores valores de resistencia a la penetración en cada bloque (Figura 10), esto se visualizó principalmente en el bloque 1 (sección alto de ladera), donde el horizonte superficial entre 5 y 10 cm de profundidad presentó valores entre 60,8 y 57,4 kg cm⁻², resistencia que disminuye a mayores profundidades. El bloque 5 presentó la menor resistencia a la penetración, alcanzando un valor mínimo de 16,0 kg cm⁻². La mayor resistencia a la penetración promedio del sector en condición de secano se obtuvo a los 5 cm de profundidad, con un valor de 37,9 kg cm⁻², mientras que la menor resistencia a la penetración se midió a los 15 cm de profundidad, con un valor de 26,6 kg cm⁻².

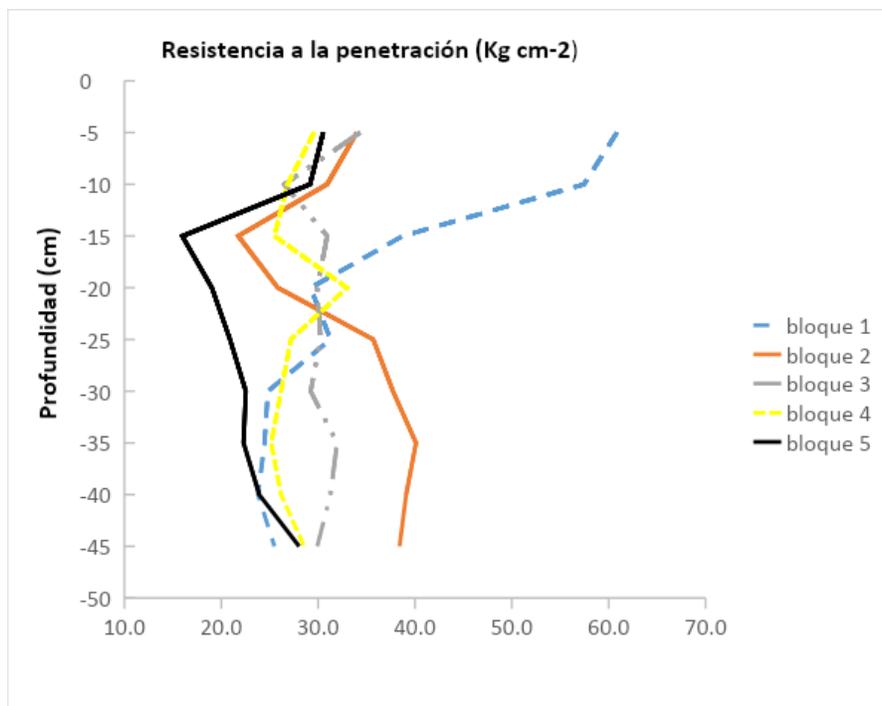


Figura 10. Resistencia a la penetración a profundidad de 45 cm por bloque en el sector en condición de secano.

3.1.7 Densidad aparente y contenido de agua gravimétrico del suelo

El análisis de las muestras en laboratorio del Centro de Semillas y Arboles Forestales (CESAF) arrojó que el sector con riego de salvamento promedió una Da de $1,39 \text{ g cm}^{-3}$ y un contenido de agua gravimétrico promedio de $13,4 \text{ g g}^{-1}$. La condición de secano alcanzó una densidad aparente promedio de $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ y un contenido de agua gravimétrico promedio de $11,61 \text{ g g}^{-1}$ (Figura 11). En el caso de la densidad aparente, se obtuvo un valor mayor que en el sector con riego, mientras que el contenido de agua gravimétrico alcanzó valores menores.

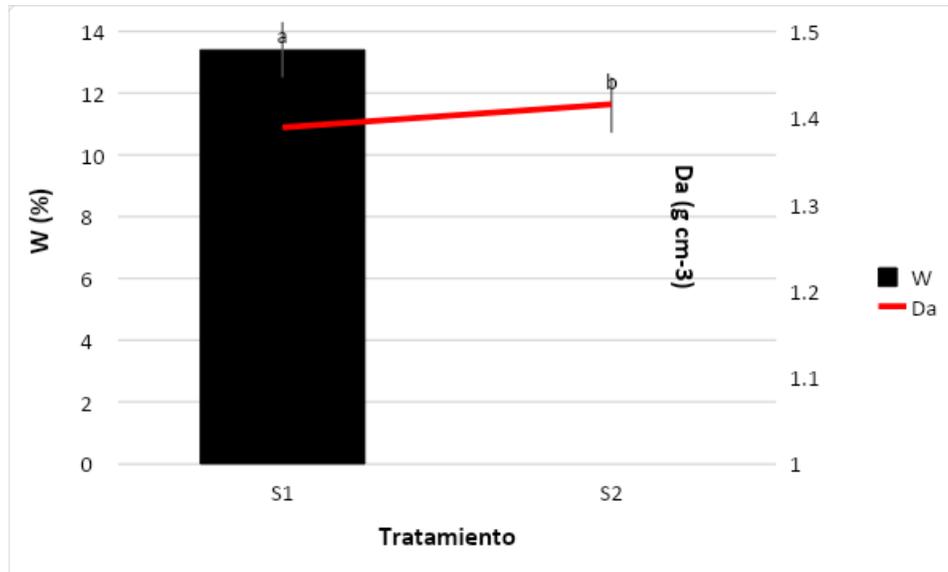


Figura 11. Contenido de agua gravimétrico (g g⁻¹) y densidad aparente (g cm⁻³) por sector. S1: Sector con riego de salvamento, S2: Sector sin riego.

Dentro del tratamiento con riego de salvamento, los bloques 1, 3 y 5 son los que presentan mayores valores de densidad aparente (Cuadro 4), estos valores se encuentran por sobre los 1,39 g cm⁻³, valor promedio del tratamiento. En cuanto al contenido de agua gravimétrico, el bloque 2 presentó los mayores valores, con 14,9%, mientras que el bloque 3 presentó el menor valor, con 11,9%. El valor máximo de densidad aparente obtenido en la condición de secano fue de 1,59 g cm⁻³ presente en el bloque 3, mientras que el valor mínimo de contenido de agua gravimétrico se presentó en el bloque 1 con un valor de 8,99%, siendo el valor más bajo obtenido en ambos tratamientos.

Cuadro 4. Valores de densidad aparente (g cm⁻³) y contenido de agua gravimétrico (%) por bloque. S1: Sector con riego de salvamento, S2: Sector sin riego, CW: contenido de agua gravimétrico (%); Da: Densidad aparente (g/cm³).

Tratamiento	Bloque	DA (g cm ⁻³)	CW %
S1	1	1,48	13,7
	2	1,27	14,9
	3	1,43	11,9
	4	1,30	12,8
	5	1,46	13,6
S2	1	1,42	8,9
	2	1,45	12,3
	3	1,59	11,1
	4	1,19	13,8
	5	1,43	11,9

3.1.8 Propiedades fisicoquímicas del suelo medidas en laboratorio

El análisis de las muestras en el Laboratorio de química de suelos y aguas de la Facultad de Ciencias Agronómicas arrojó que la parcela con tratamiento con riego posee valores de capacidad de campo (CC) entre 15,03 y 17,7%, con promedio de 16,15%, mientras que la condición de secano posee valores fluctuantes entre 13,18 y 14,21%, promediando una CC de 13,57% (Cuadro 5). El punto de marchitez permanente (PMP) posee en promedio de 12,13% en la parcela de riego y un 10,21% en la condición de secano. Finalmente, la humedad aprovechable posee promedios de 4% en tratamiento con riego y de 3,36% en condición de secano.

Cuadro 5. Porcentaje de Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y humedad aprovechable por tratamiento y bloque. Parcela 1: Sector con riego de salvamento, Parcela 2: Sector sin riego.

Parcela	Bloque	CC	PMP	Humedad aprovechable (%)
1	1	15,81	12,03	3,77
	2	16,47	12,16	4,31
	3	15,76	11,87	3,90
	4	17,70	13,62	4,08
	5	15,03	10,99	4,04
2	1	13,36	10,37	2,98
	2	13,90	10,45	3,45
	3	13,18	10,08	3,10
	4	13,22	10,03	3,19
	5	13,21	10,12	4,09

El mismo análisis en laboratorio arrojó la textura por bloque, su porosidad, densidad real y densidad aparente, esta última no incluida en el Cuadro 6, debido a que presenta los mismos valores obtenidos en el laboratorio de CESAF (Cuadro 4). Los resultados indican que la clase textural predominante en ambos tratamientos es la franco arcillo arenosa. La porosidad total tampoco tuvo grandes fluctuaciones, obteniéndose valores promedio de 47,10% en tratamiento con riego y de 46,29% en condición de secano, sin embargo, se observó que el sector en condición de secano posee los valores de mayor fluctuación, ya que presenta porosidad del 39,78% en el bloque 3 y de 54,67% en el bloque 4 (Cuadro 6). Los porcentajes de macro y microporosidad tampoco poseen diferencias entre tratamientos, observándose macroporosidad promedio de 31% - 32,7% y microporosidad promedio de 12,13% - 10,21%, en tratamiento con riego y condición de secano, respectivamente.

Cuadro 6. Textura, Porosidad total (%), macroporosidad (%), microporosidad (%) y densidad real (Mg m⁻³) por tratamiento y bloque. Sector 1: Sector con riego de salvamento, Sector 2: Sector sin riego.

Sector	Bloque	Textura	Porosidad (%)	Macroporosidad (%)	Microporosidad (%)	DA real (Mg/m ³)
1	1	Franco arcillo arenosa	43,12	27,31	12,03	2,61
	2	Arcillo arenosa	51,51	35,04	12,16	2,63
	3	Franco arcillo arenosa	45,02	29,26	11,87	2,61
	4	Arcillosa	51,21	33,51	13,62	2,66
	5	Franco arcillo arenosa	44,65	29,62	10,99	2,63
2	1	Franco arcillo arenosa	45,86	32,5	10,37	2,63
	2	Arcillo arenosa	44,62	30,71	10,45	2,61
	3	Arcillo arenosa	39,78	26,59	10,08	2,65
	4	Franco arcillo arenosa	54,67	41,45	10,03	2,62
	5	Franco arcillo arenosa	46,51	32,3	10,12	2,67

Las propiedades químicas obtenidas en laboratorio se presentan en el Cuadro 7. Propiedades como el pH, conductividad eléctrica (CE), Materia orgánica (MO), no presentan diferencias notorias entre tratamientos, mientras que se observa que en condición de secado existe una menor Capacidad de intercambio catiónico (CIC). El único macronutriente que presenta una diferencia en cantidad entre tratamientos es el fósforo (P), mientras que los micronutrientes como el Cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn) se encuentran en mayor concentración en la condición de secado.

Cuadro 7. Propiedades químicas promedio del suelo según tratamiento. S1: Sector con riego de salvamento, S2: Sector sin riego.

T	pH	CE	MO	N	P	K	Ca	Mg	Na	CIC	Cu	Fe	Mn	Zn
		dS/m	%	mg/kg			cmol+/kg			cmol+/kg	mg/kg			
S1	5,5 ±0,07	0,3 ±0,01	3,8 ±0,4	2,9 ±0,16	8,6 ±1,97	0,04 ±0,07	2,8 ±0,04	0,4 ±0,04	0,9 ±0,04	9,4 ±1,75	1,9 ±0,5	28,5 ±5,18	95,4 ±6,9	0,2 ±0,04
S2	5,6 ±0,07	0,3 ±0,01	3,0 ±0,4	3,2 ±0,16	12,5 ±1,97	0,2 ±0,07	2,9 ±0,04	0,3 ±0,04	0,8 ±0,04	6,0 ±1,75	2,9 ±0,5	38,8 ±5,18	109,2 ±6,9	0,3 ±0,04

3.1.9 Efecto de las propiedades fisicoquímicas del suelo sobre las plantas

Tras la obtención de los valores de densidad aparente y contenido de agua gravimétrico, se realizó un análisis de correlación de Pearson con la finalidad de evaluar el efecto de estas propiedades del suelo con el crecimiento en DAC, altura de la vegetación y sobrevivencia (Cuadro 8). La compactación (DA y RP) y el contenido de agua gravimétrico del suelo no presentaron diferencias significativas sobre el crecimiento de las plantas, sin embargo, se observan coeficientes positivos, aunque no significativos, del contenido de agua gravimétrico sobre el crecimiento en DAC y la altura; al contrario, la densidad aparente presenta correlaciones negativas con ambas variables. El contenido de agua gravimétrico tiene mayor influencia sobre la sobrevivencia, presentando un coeficiente positivo y significativo sobre esta variable. La densidad aparente no presenta mayor influencia sobre la sobrevivencia de los individuos.

Cuadro 8. Efecto del contenido de agua gravimétrico y densidad aparente sobre el crecimiento y sobrevivencia de las plantas.

Coef. P./prob.	W	DA	DAC	H	S	RP
W	---	0,17	0,21	0,11	0,08	0,13
DA	-0,47	---	0,62	0,97	0,82	0,68
DAC	0,44	-0,18	---	0,17	0,19	0,19
H	0,54	-0,01	0,78	---	0,02*	0,59
S	0,58	0,08	0,45	0,70	---	0,35
RP	-0,52	0,15	-0,45	-0,20	-0,33	---

Coef. P: Coeficiente de correlación de Pearson, W: Contenido de agua gravimétrico (g g^{-1}), DA: Densidad Aparente (g cm^{-3}); DAC: Diámetro a la Altura del Cuello (mm); H: Altura (cm), S: sobrevivencia, RP: resistencia a la penetración. P-value <0,05 indica diferencias significativas.

La microporosidad es la única propiedad física del suelo que afecta el crecimiento de las plantas, con incidencia en el crecimiento en la altura y DAC de las plantas, teniendo una relación fuerte con esta última (Cuadro 9). La humedad aprovechable (HA) también se ve afectada por la microporosidad, teniendo ambos una relación medianamente fuerte. Las demás propiedades no poseen efectos significativos sobre el crecimiento de los individuos.

Cuadro 9. Efecto de las propiedades físicas del suelo sobre el crecimiento y sobrevivencia de las plantas.

Coef. P./prob.	DAC	H	Ha	Po	Ma	Mi	S
DAC	---	0,01*	0,08	0,68	0,66	2,8E-0,4*	0,19
H	0,78	---	0,5	0,93	0,48	0,03*	0,02*
Ha	0,58	0,24	---	0,52	0,9	0,05*	0,51
Po	0,15	-0,03	0,23	---	5,8E-05*	0,46	0,80
Ma	-0,16	-0,25	-0,04	0,94	---	0,84	0,59
Mi	0,91	0,68	0,63	0,26	-0,07	---	0,46
S	0,45	0,70	0,24	-0,09	-0,19	0,27	---

Coef. P: Coeficiente de correlación de Pearson; DAC: Diámetro a la Altura del Cuello; H: Altura (cm); Ha: Humedad aprovechable; Po: Porosidad; Ma: Macroporosidad; Mi: Microporosidad; S: sobrevivencia. (*): P-value <0,05 indica diferencias significativas.

La materia orgánica (MO) y la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) son las propiedades químicas del suelo que presentan el mayor impacto sobre el crecimiento de las plantas, con efectos positivos sobre el crecimiento del DAC (Cuadro 10). En cambio, propiedades como el pH y conductividad eléctrica no presentaron diferencias significativas sobre el crecimiento de los individuos. Las propiedades químicas del suelo no poseen efectos significativos sobre la sobrevivencia de las plantas.

Cuadro 10. Efecto de las propiedades químicas del suelo sobre el crecimiento y sobrevivencia de las plantas.

Coef. P./prob	DAC	H	pH	CE	MO	CIC	S
DAC	---	0,01*	0,27	0,30	0,03*	0,03*	0,19
H	0,78	---	0,93	0,25	0,28	0,08	0,02*
pH	-0,39	0,03	---	0,30	0,39	0,14	0,23
CE	-0,36	-0,40	0,37	---	0,66	0,21	0,49
MO	0,68	0,38	-0,30	0,16	---	0,18	0,96
CIC	0,69	0,58	-0,50	-0,44	0,46	---	0,54
S	0,45	0,70	0,41	-0,25	-0,02	0,22	---

Coef. P: Coeficiente de correlación de Pearson; DAC: Diámetro a la Altura del Cuello; H: Altura (cm); Ce: conductividad eléctrica; Mo: Materia orgánica; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; S: Sobrevivencia. (*): P-value <0,05 indica diferencias significativas.

Los macronutrientes que poseen efectos sobre el crecimiento en altura y DAC son el fósforo (P) y el sodio (Na); el fósforo posee efectos estadísticamente significativos sobre el crecimiento en altura de las plantas, teniendo una relación negativa, es decir, a mayor cantidad de fósforo, menor crecimiento en altura, en cambio, el sodio tiene impactos positivos sobre el crecimiento en altura (Cuadro 11). Los demás macronutrientes no fueron incluidos debido a que no poseen efectos significativos sobre el crecimiento de las plantas (Cuadro 15 en Apéndices).

En cuanto a los micronutrientes (Cuadro 11), el hierro, manganeso y zinc tienen efectos sobre el crecimiento de las plantas. El hierro y manganeso se relacionan con el crecimiento en altura y la sobrevivencia de los individuos, mientras que el zinc posee efectos significativos en ambas variables de crecimiento. Los tres micronutrientes observados poseen relación negativa con el crecimiento y sobrevivencia de las plantas, teniendo un efecto inverso sobre ellas.

Cuadro 11. Efecto de algunos macro y micronutrientes del suelo sobre el crecimiento de las plantas.

Coef. P./prob.	DAC	H	P	Na	Fe	Mn	Zn	S
DAC	---	0,01*	0,11	0,28	0,06	0,18	1,9E-0,3*	0,19
H	0,78	---	0,02*	0,02*	3,9E-03*	0,02*	9E-0,4*	0,02
P	-0,54	-0,70	---	0,27	0,11	0,27	0,01*	0,37
Na	0,38	0,74	-0,39	---	0,07	0,18	0,05*	0,07
Fe	-0,62	-0,82	0,53	-0,60	---	4,2E-0,4*	0,08	3,5E-0,4*
Mn	-0,46	-0,71	0,39	-0,46	0,90	---	0,25	1,5E-0,3*
Zn	-0,85	-0,88	0,74	-0,63	0,58	0,40	---	0,22
S	0,45	0,70	-0,32	0,59	-0,90	-0,86	-0,43	---

Coef. P: Coeficiente de correlación de Pearson; DAC: Diámetro a la Altura del Cuello; H: Altura (cm); P: fosforo; Na: Sodio; Fe: Hierro; Mn: Manganeso; Zn: Zinc; S: sobrevivencia. (*): P-value <0,05 indica diferencias significativas.

3.2 Discusión

3.2.1 Sobrevivencia

La sobrevivencia y/o tolerancia a la sequía de las especies depende generalmente de una combinación de factores intrínsecos de cada especie, tales como disminución del área foliar y del tamaño celular, crecimiento y funcionalidad del sistema radical en profundidad, entre otros cambios morfo-fisiológicos que se presentan en condiciones de restricción hídrica; para evitar la aparición de esta combinación de caracteres se propone la utilización de riego (Chimenti, 2004). Varios estudios indican que en zonas mediterráneas el riego mejora la supervivencia y crecimiento de la vegetación, sin embargo, en dichos estudios no siempre se observaron diferencias en la sobrevivencia de las especies, lo que se puede deber a que las especies utilizadas en el marco de plantación poseen bajos requerimientos hídricos y se desarrollan naturalmente en los ambientes más xéricos del país (Armesto y Pickett, 1985; Becerra *et al* 2013).

No se observó un efecto de la posición del bloque en la ladera (topográfico) sobre la sobrevivencia de los individuos. La topografía aumenta los procesos de erosión de suelos a través de la pendiente, generando gradientes texturales que influyen en la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas; además, influye en los diversos procesos fisiológicos, morfogenéticos y reproductivos de la vegetación, debido a la restricción de la cantidad de radiación recibida por efectos de la exposición (Valladares *et al.*, 2004; Hillel, 1982). Si

bien, existen diferencias en pendiente (alto, medio y bajos de ladera) y exposición entre sectores y bloques, estos no generan efectos sobre la sobrevivencia.

Estudios realizados por Peña *et al* (2018b); Becerra *et al* (2018); Becerra *et al* (2013); INFOR (2011) y Navarrete (2002), quienes evaluaron la sobrevivencia de diferentes especies del bosque esclerófilo frente a condición de secano y a riego de salvamento, indican que para especies como *A. caven*, *L. caustica* y *Q. saponaria* se presentan sobrevivencias de 60%, 70%, 75% en condición de secano, respectivamente, y para el caso de tratamientos con riego de salvamento, *Q. saponaria* y *L. caustica* presentan sobrevivencias entre 96-100% y 91,7-100%, respectivamente, mientras que *C. odorífera* muestra sobrevivencias entre 65-76%. La sobrevivencia obtenida en este estudio fue superior a las observadas por otros autores, sin embargo, la sobrevivencia de *Q. saponaria* y *L. caustica* en tratamientos con riego se condice con lo expuesto en este ensayo (Armesto y Pickett, 1985; Navarrete, 2002; Peña *et al* 2018b; INFOR, 2011; Becerra *et al* 2018; Becerra *et al* 2013). Los resultados sugieren que, luego de 5 años, el riego de salvamento no influiría en un mayor éxito en la sobrevivencia de las especies analizadas en este estudio.

3.2.2 Crecimiento en DAC y altura

El diámetro a la altura del cuello (DAC) es comúnmente utilizado en la producción de plantas en viveros como un indicador de la capacidad de transporte de agua, de resistencia mecánica de la planta y de la capacidad de tolerar de forma relativa las altas temperaturas del ambiente (Quiroz *et al* 2009). El crecimiento en DAC observado en este estudio arrojó diferencias significativas entre tratamientos, donde la aplicación de riego aumentó en un 32,5% el tamaño del DAC en comparación con la condición de secano, respuesta que se condice con lo registrado en varias especies mediterráneas, en que existe una disminución significativa del DAC cuando las plantas son sometidas a restricción hídrica (Ogaya *et al.*, 2003; Peña-Rojas *et al.*, 2004). Pozo *et al.* (2015) indican que la respuesta observada se debe a que la mayor disponibilidad del recurso hídrico permite un incremento de las tasas de crecimiento, afectando indirectamente el uso de la luz y nitrógeno, debido a un aumento del índice de área foliar y de eficiencia de absorción de nitrógeno.

A. caven obtuvo el menor crecimiento en ambas condiciones. Si bien Peña-Rojas *et al.* (2018b) obtuvo diferencias de crecimiento en condiciones de riego y restricción hídrica, en este estudio no se observó diferencias entre tratamientos, por lo que la restricción en crecimiento podría estar dado por otras variables ambientales. *P. boldus* fue la siguiente especie que presentó menor crecimiento en DAC en ambos tratamientos, sin embargo, en el sector con riego el DAC incrementó en un 44,6% por sobre la condición de secano. La respuesta de *P. boldus* se condice con lo expuesto por Ilabaca, 2008; Peña-Rojas *et al.*, (2018a) y Donoso *et al.*, (2011), quienes indican una disminución del crecimiento en DAC cuando la especie es sometida a restricción hídrica, existiendo diferencias en crecimiento entre tratamientos de hasta un 78%. Peña-Rojas *et al* (2018a) indica que la diferencia en crecimiento de *P. boldus* se debe a que la especie realiza un ajuste elástico durante el periodo de restricción hídrica, lo que le permite sobrellevar la disminución del potencial hídrico y del CHRa (contenido hídrico relativo al alba), permitiendo mantener el turgor

celular adecuado para el funcionamiento de los tejidos, dándole prioridad al crecimiento radical por sobre la parte aérea.

En tratamiento con riego de salvamento, las especies *C. odorifera*, *E. pulverulenta*, *Q. saponaria* y *L. caustica* tuvieron un incremento en DAC del 34,7%, 42,7%, 23,8%, y 40,3% por sobre la condición de secano, respectivamente. Estudios realizados en estas especies muestran resultados similares, Becerra (2013) indica que la restricción hídrica afecta el crecimiento en DAC de *C. odorifera*, similar comportamiento se observa para *E. pulverulenta*, conducta ampliamente observada para especies mediterráneas (Ogaya *et al.*, 2003; Peña-Rojas *et al.*, 2004). Barriá (2011) observó que para *Q. saponaria* existen diferencias del 58 y 56% en crecimiento del DAC entre el tratamiento control y los sometidos a diversos grados de restricción hídrica (moderado y severo), resultados similares presentaron Luna (2006) e Ilabaca (2008) para la misma especie. Guajardo (2010) sometió a *L. caustica* a dos tratamientos de restricción hídrica comparándolos con un tratamiento control, obteniendo una reducción del crecimiento en DAC de un 40% en restricción hídrica moderada y en un 72% en restricciones hídricas severas en comparación con el tratamiento control. Los resultados obtenidos en este estudio son semejantes a los observados por Guajardo (2010) en restricciones hídricas moderadas.

La diferencia observada del crecimiento en DAC entre tratamientos, indicaría que a los individuos que se les aplicó riego poseerán DAC de mayor tamaño, permitiéndoles desarrollar sistemas radicales mayores, mejorando su soporte y su resistencia contra temperaturas extremas (Cleary *et al.*, 1978).

Los resultados obtenidos para la variable altura no arrojan diferencias en crecimiento entre tratamientos, presentándose crecimientos similares entre ambos sectores lo que indicaría que no existe diferencia en capacidad fotosintética, por lo que el riego no generaría ventajas competitivas con especies colindantes (INFOR, 2011).

Al comparar diferencias en crecimiento entre especies, se observó que *Q. saponaria* y *P. boldus* no presentaron diferencias en el crecimiento en altura entre tratamientos, mientras que las demás especies estudiadas sí lo poseen. Autores como Peña *et al.*, (2018a), Peña *et al.*, (2018b) y Becerra *et al.*, (2018) han analizado el crecimiento en altura de especies como *P. boldus*, *L. caustica*, *C. odorifera* y *E. pulverulenta* bajo tratamientos de riego y restricción hídrica, indicando que el riego no influyó en el incremento en altura de estas especies. Los resultados observados por estos investigadores son contrapuestos a lo establecido en este estudio, ya que la altura de los individuos disminuiría en condición de secano, sin embargo, lo observado en *P. boldus* coincidiría con lo expuesto en diversas investigaciones, demostrando un comportamiento indiferente frente a los tratamientos de riego (Ilabaca, 2008; Peña-Rojas *et al.*, 2018a; Peña-Rojas *et al.*, 2018b; Becerra *et al.*, 2018). Para la especie *Q. saponaria* y *A. caven* se señala que existirían diferencias entre tratamiento con riego y condición de secano, obteniendo un menor crecimiento en altura de los individuos en condiciones de restricción hídrica, sin embargo, el comportamiento observado en *Q. saponaria* indicaría que la especie no presenta diferencias en crecimiento frente a ambos tratamientos, mientras que *A. caven* tendría mayor crecimiento en condición de secano (Donoso *et al.*, 2015; Barriá, 2011; Aguirre, 2008; Luna, 2006). Los resultados sugieren que el riego de salvamento fue insuficiente para expresar diferencias en el

crecimiento en altura de las especies *Q. saponaria*, *A. caven* y *P. boldus*, mientras que para las demás especies el riego de salvamento permitiría aumentar su crecimiento en altura.

3.1.3 Propiedades físicas del suelo

3.2.3.1 Densidad real

La densidad real (D_r) del suelo corresponde al peso de las partículas que lo componen, relacionado al volumen que ocupan (Jaramillo, 2002). El promedio de la D_r de la parcela con riego es de $2,63 \text{ Mg m}^{-3}$, mientras que en la parcela en condición de secano es de $2,67 \text{ Mg m}^{-3}$, valores que indican que el suelo en ambos tratamientos corresponden a un horizonte mineral, ya que los valores promedios se acercan sustancialmente al rango de los $2,66$ y $2,75 \text{ Mg m}^{-3}$, que Porta *et al.* (2003) indica como característicos para suelos minerales. Jaramillo (2002) considera un valor medio para considerar un suelo mineral de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$. En este tipo de suelos es característico la presencia dominante de arcilla, lo que se corrobora con las texturas obtenidas en este informe.

Las densidades $2,63$ y $2,67 \text{ Mg m}^{-3}$ se encuentran sobre las densidades más altas de horizontes orgánicos propuestas por Buckman y Brady (1966), quienes indican densidades de $2,4 \text{ Mg m}^{-3}$ para suelos superficiales donde la presencia de materia orgánica (MO) es nula o muy baja. La presencia de MO disminuiría los valores de densidad real obtenidos, debido a que su estructura pesa mucho menos que un volumen igual de sólidos minerales (Fernández, 2015). La baja cantidad de materia orgánica observada podría estar dada por la ocurrencia del incendio del año 2017 en la región, que afectó severamente la vegetación del predio; al respecto, Minervini *et al.* (2018) indican que el fuego acelera los procesos de descomposición de la materia orgánica, afectando de forma perjudicial las comunidades biológicas del suelo.

3.2.3.2 Densidad aparente

La densidad aparente (D_a) es una propiedad dinámica del suelo que varía con la condición estructural de este (USDA, 1999). Esta condición del suelo puede ser modificada por pisoteo de animales, incendios, clima, maquinaria agrícola, cultivos, entre otros (Martínez *et al.*, 2008). La densidad aparente es un indicador de la compactación del suelo, altos valores de esta propiedad indican restricción del crecimiento de raíces e inhibición del movimiento del aire y agua a través del suelo (USDA, 1999).

Se observó que el sector con riego de salvamento posee densidad aparente promedio menor a la condición de secano, con densidades de $1,39$ y $1,42 \text{ Mg cm}^{-3}$, respectivamente. Las densidades promedio obtenidas para ambos sectores no presentarían efectos negativos sobre las especies, sin embargo, en la condición de secano el bloque 3 presentó D_a que restringiría el crecimiento radicular de los individuos; así mismo, el bloque 2 presenta D_a que podrían afectar el crecimiento radicular, superando el umbral de $1,58$ y $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente (USDA, 1999). Los demás bloques presentes en la condición de secano poseen D_a dentro de parámetros ideales (Cuadro 12). La densidad aparente posee valores esperables para la clase textural medida en ambos tratamientos, por lo que no generaría

efectos significativos sobre el crecimiento radicular de los individuos ni en su desarrollo fisiológico.

Cuando existe una alta D_a y alta resistencia a la penetración (RP), podría limitarse el crecimiento radicular de los individuos. Esta relación es posible observarla en ambos sectores estudiados, ya que en todos los estratos medidos se obtuvieron valores de RP superiores a 2 MPa, valor que es considerado crítico por autores como Lal (1994) y Tormena *et al.* (1999), quienes indican que para cultivos agrícolas a valores superiores a 2MPa poseen un impacto limitante para el desarrollo de raíces absorbentes; sin embargo, la RP debe estar asociada a una alta densidad aparente. En este sentido, Hossne (2004) refiere que, a valores superiores de 2,34 MPa, el crecimiento radicular disminuye con gran rapidez, mientras que Pérez *et al.* (2016) observaron que con valores de RP sobre los 2,5 MPa se detiene el crecimiento de la raíz. La condición de secano presentó en promedio una RP de 2,95 MPa, mientras que el sector con riego presentó un promedio de 2,53 MPa, es decir, en ambas situaciones podría existir una disminución y/o detención del crecimiento radicular (Cuadro 12). El mayor impacto se concentraría en el sector sin riego, debido a que en su interior existen bloques que además de poseer alta RP, poseen valores de D_a que pueden afectar y restringir el crecimiento radicular. La interacción entre ambas variables perjudica la absorción de agua y nutrientes por la planta, lo que conlleva a un menor crecimiento en longitud y de los órganos subterráneos (Agbede, 2006).

Cuadro 12. Relación entre densidad aparente del suelo y restricción del crecimiento radicular, en base a la textura del suelo y la densidad aparente. Fuente: USDA (1999).

Parcela	Bloque	Textura de suelo observada	D_a observada (Mg m ⁻³)	D_a ideales (Mg m ⁻³)	D_a que pueden afectar el crecimiento de radicular (Mg m ⁻³)	D_a que restringen el crecimiento radicular (Mg m ⁻³)
1	1	Franco arcillo arenosa	1,48	<1,4	1,60	1,75
	2	Arcillo arenosa	1,27	<1,1	1,39	1,58
	3	Franco arcillo arenosa	1,43	<1,4	1,60	1,75
	4	Arcillosa	1,30	<1,1	1,39	1,47
	5	Franco arcillo arenosa	1,46	<1,4	1,60	1,75
2	1	Franco arcillo arenosa	1,42	<1,4	1,60	1,75
	2	Arcillo arenosa	1,45*	<1,1	1,39	1,58
	3	Arcillo arenosa	1,59**	<1,1	1,39	1,58
	4	Franco arcillo arenosa	1,19	<1,4	1,60	1,75
	5	Franco arcillo arenosa	1,43	<1,4	1,60	1,75

(*) Indica D_a que pueden afectar el crecimiento radicular (M gm⁻³). (**) Indica D_a que restringen el crecimiento radicular (M gm⁻³).

3.2.3.3 Porosidad del suelo

La porosidad total del suelo es el volumen de este que no se encuentra ocupado por sólidos, constituyendo el volumen disponible en el suelo para los líquidos y gases. La porosidad total obtenida en ambos tratamientos fue de 47,1% para el tratamiento con riego y de 46,3% para la condición de secano (Cuadro 6). Cisneros (2003) indica que, para suelos francos, los valores de porosidad total óptimos fluctúan alrededor del 50% valor muy cercano al obtenido en ambas parcelas, sin embargo, Kaurichev (1984) indica que valores entre el 40 y 50% son considerados bajos, mientras que valores entre 50 y 60% son considerados satisfactorios. A nivel de bloque, se pudo observar que el bloque 3 de la condición de secano posee un valor muy por debajo de lo propuesto por Cisneros (2003) y Kaurichev (1984), teniendo una clasificación “muy baja”.

Ahora bien, Cisneros (2003) indica que, para tener un crecimiento adecuado de las plantas, es más importante el tamaño de los poros que el espacio poroso total. Los valores obtenidos de macro y microporosidad para la condición de secano se encuentran entre el 32,71 y 10,21%, respectivamente, mientras que para el tratamiento con riego se obtuvieron valores de macroporosidad del 30,95% y de microporosidad de 12,13%. Baver *et al.* (1973) considera que una distribución de poros ideal ocurre cuando micro y macroporos se encuentran en igual proporción, situación que no ocurre en ninguna de las dos parcelas monitoreadas.

La microporosidad es la única variable de las propiedades físicas del suelo que tuvo efectos significativos sobre el crecimiento de las plantas (P-value <0,05). Estos efectos se presentan principalmente en el crecimiento en DAC, sin embargo, también afecta en menor medida el crecimiento en altura (Cuadro 9). La mayor proporción de macroporos sobre microporos observada en ambos tratamientos indicaría la presencia de un drenaje y aireación excesivos, acompañado de una baja capacidad de almacenamiento de agua, lo que afectaría propiedades como la Capacidad de campo (CC) y, en consecuencia, la humedad aprovechable (Jaramillo, 2002). Como se observó anteriormente, el tratamiento con riego presentó crecimientos en DAC y altura de un 32,5 y 9,7% mayores que en la condición de secano, respectivamente. La baja cantidad de microporos tendría relación con lo observado en el crecimiento en DAC y altura en ambos tratamientos, debido a que estos contienen el agua aprovechable para las plantas. El tratamiento con riego de salvamento habría permitido aumentar la disponibilidad de agua en los periodos de menor precipitación, por lo que explicaría la diferencia en DAC y altura observados.

Ambas parcelas poseen una disminución del espacio microporoso encargado de la retención de agua, lo que pudo estar dado por el uso agrícola-forestal intensivo al cual fue sometida el área de estudio. Estas actividades afectan la capacidad de retención y almacenamiento de agua del suelo, debido al continuo pisoteo del ganado y paso de maquinaria que, generando compactación, fenómeno que disminuye el espacio poroso a expensas de la reducción de macroporosidad, teniendo efectos sobre la capacidad de retención de agua, permeabilidad, estructura, microporosidad y consistencia del suelo (Pinzón, 1993). Otro factor importante fue la ocurrencia de incendios el año 2017, disturbio que impactó severamente la vegetación y el suelo del lugar, ya que según Beyers *et al* (2008) los incendios alteran las propiedades físicas del suelo, destruyendo la estructura del suelo y afectando los macroporos de este.

3.2.3.4 Conductividad hidráulica

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo; la velocidad a la cual el agua ingresa en el suelo corresponde a la velocidad de infiltración, la cual depende de la estructura o grado de agregación del suelo y de su contenido de agua (Lowery *et al.*, 1996). Según Hillel (1982), los valores observados para el tratamiento con riego ($0,40 \text{ cm h}^{-1}$) y condición de secano ($0,197 \text{ cm h}^{-1}$), se clasificarían como velocidad estables para texturas de suelo arcillosos ($0,1-0,51 \text{ cm h}^{-1}$), sin embargo, la textura predominante en ambos tratamientos es la textura franca-fina, para la cual la velocidad estable de infiltración correspondería a $0,51-1,02 \text{ cm h}^{-1}$, es decir, la velocidad de infiltración en ambas condiciones es menor a la que debiesen presentar y serían clasificadas por USDA (1999) como infiltración “muy lenta”. Esta reducción observada de la infiltración ocurre cuando el tamaño o la cantidad del espacio poroso son aminorados por la destrucción de la estructura del suelo, taponamiento de poros por partículas, entre otros (Donahue *et al.*, 1997). Si bien se observó una mayor macroporosidad, las propiedades hidráulicas del suelo dependen de la geometría de las redes del espacio poroso del suelo, es decir, de su continuidad y tortuosidad, propiedades que se encuentran interrumpidas por la acción del fuego y manejo anterior del predio, lo que limitaría la conductividad hidráulica del suelo (Sampaio, 2009).

Los bajos valores de infiltración obtenidos para ambas parcelas permite que el agua que escurra actúe como agente erosivo. El agua afecta el suelo a través de la energía generada por la caída de la gota de lluvia y por su posterior flujo horizontal sobre la superficie del suelo; la pérdida de suelo aumentaría en condiciones con pendiente, situación presente en ambos tratamientos. La pérdida de fertilidad química y física del suelo asociadas a este proceso es importante en zonas de secano húmedo de lomajes, donde existe una precipitación por sobre los 300 mm anuales, situación presente desde la quinta región del país hacia el sur. La infiltración presente en ambos sectores afecta el potencial productivo del suelo, a través de la pérdida de materia orgánica y arcilla, afectando la retención de agua aprovechable del suelo, disminuyendo su poder de suministro de nitrógeno y azufre (INIA, 1999).

La construcción de obras de conservación de suelos y agua (OCAS) permitiría aumentar la capacidad y productividad del suelo para sostener y mantener vegetación, a través de la recuperación de suelos y agua (CORFO, 2011).

3.2.4.4 Punto de marchitez permanente, capacidad de campo y agua aprovechable del suelo

Punto de marchitez permanente (PMP) es el contenido de humedad del suelo al cual la planta se marchita irreversiblemente, en este punto el agua del suelo se encuentra retenida a -15 atm respectivamente. La Capacidad de campo (CC) es el contenido de agua con que queda el suelo, cuando sus mesoporos se han drenado completamente, esta condición de humedad ocurre cuando se drena el suelo saturado entre 48 y 72 horas. En este punto el agua del suelo se encuentra retenida entre los $-0,1$ y $-0,3 \text{ atm}$ (Jaramillo, 2002). Finalmente, el agua aprovechable (Ha) es la humedad que presenta el suelo retenida entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo.

Los resultados obtenidos indican que en promedio la parcela en condición de secano presentó puntos de marchitez permanente (PMP) promedio de 10,2% y en la parcela con riego alcanzó un 12,1% (Cuadro 5). Cisneros (2003) indica que, según la textura de los suelos, los valores observados se encuentran dentro de valores normales para el tratamiento con riego y levemente bajos para la condición de secano; de igual forma, según Israelsen y Hansen (1979) los resultados obtenidos del PMP para ambas parcelas y bloques se encontrarían en rangos normales. La capacidad de campo (CC) promedio observada en terreno fue de 13,57 y 16,15%, para la condición de secano y riego, respectivamente, que según los valores indicativos para Cisneros (2003) en la condición de riego se encontraría en un 45% por debajo de los parámetros normales, mientras que en la condición de secano se encontraría disminuida en un 52,5%. Para Sawchik (1995) la CC observada en la condición de riego se encontraría en un 26,5% por debajo de los umbrales normales de CC, mientras que la condición de secano se encontraría en un 36,8% por debajo de estas condiciones.

El valor promedio de Ha obtenido en la parcela con tratamiento con riego es de 4%, mientras que para la condición de secano es de 3,36%. Sawchik (1995) indica que valores normales de humedad aprovechable según las texturas obtenidas deberían encontrarse entre los rangos de 7,9% para suelos arcillosos (bloque 4 parcela 1) y de 11,3% para suelos francos. Ningún tratamiento alcanzó los valores propuestos por este autor, encontrándose muy por debajo de estas cifras. Por otro lado, Cisneros (2003) proponen rangos normales de Ha entre 16 y 20% para suelos arcillosos, 14 y 18% para suelos arcillo arenosos y 10 y 14% para suelos francos, estos rangos se encuentran aún más lejanos de los observados en ambas parcelas (Cuadro 5). Los bajos valores de Ha observados tendrían directa relación con la baja proporción de microporos obtenidos en ambos tratamientos, ya que, a menor cantidad de microporos, menor sería de la cantidad de agua retenida en capacidad de campo. La relación existente entre la humedad aprovechable (Ha) con el PMP y la CC, significaría que una reducción de la capacidad de campo disminuiría la humedad aprovechable del suelo.

3.2.5 Propiedades químicas del suelo

3.2.5.1 pH y nutrientes del suelo

El pH promedio observado en ambas parcelas fue de 5,5 y 5,6 en la condición de riego y secano, respectivamente. Según USDA (1999) se encuentra entre los rangos fuertemente ácido y moderadamente ácido, los que regularmente se observan en suelos forestales húmedos y suelos de pradera subhúmedas. INFOR (2015) menciona que los valores de pH observados corresponderían al tipo forestal Roble-Raulí-Coihue y Coihue de Magallanes, mientras que el pH para bosque esclerófilo sería de 6, sin embargo, Pimstein (1974) menciona que el bosque esclerófilo presente en suelos francos de la cordillera de la costa, con material de origen volcánico o granítico, poseen pH entre 5,1 y 5,6 clasificados como ácidos o ligeramente ácidos.

El pH no presentó efectos significativos sobre el crecimiento de la vegetación, sin embargo, es un factor que limita la disponibilidad de nutrientes del suelo, necesarios para el crecimiento de las plantas. El pH obtenido para ambos tratamientos indicaría una disminución en la disponibilidad de los macronutrientes del suelo, mientras que a nivel de

micronutrientes el hierro, manganeso, cobre y zinc aumentarían su disponibilidad (Figura 12).

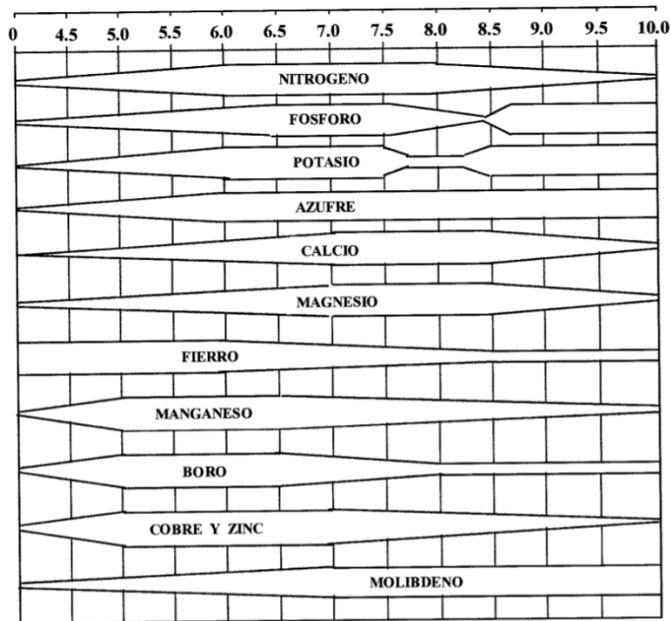


Figura 12. Disponibilidad de elementos relacionados al pH del suelo. Fuente: INIA, 1999.

El Instituto de Desarrollo Agropecuario (INIA, 2018) indica que los niveles de fósforo observados en la parcela con tratamiento con riego sería inadecuado, mientras que en la condición de secano tendría disponibilidad media. Los niveles observados de este nutriente afectarían negativamente el crecimiento en altura de los individuos ($P\text{-value } 0,05 >$), lo que se condice con lo referido por Barbazán (1998), quien indica que la deficiencia de este nutriente disminuye la expansión foliar y retrasa el crecimiento de la planta. Otros macronutrientes como K, Ca y Mg se encuentran en niveles inadecuados para las plantas en ambas parcelas, sin embargo, al evaluar su efecto sobre el crecimiento de los individuos, no se observaron diferencias en ninguna de las variables evaluadas. El sodio (Na) fue el único macronutriente en niveles adecuados; al evaluar su relación con el crecimiento de las plantas, se observó que su presencia aumentaría el crecimiento en la altura de los individuos. Este comportamiento se debe a que el sodio es un elemento considerado como beneficioso para la vegetación, siendo esencial para algunas especies, ya que reemplaza funciones del potasio en las plantas y tiene un efecto positivo sobre el crecimiento vegetal (Rodríguez y Flórez, 2004).

Según INIA (2018) Los niveles de disponibilidad de los micronutrientes Cu y Fe, poseerían valores adecuados, al contrario, la disponibilidad de zinc (Zn) en ambos tratamientos sería inadecuada. Tras evaluar el efecto de los micronutrientes sobre el crecimiento de las plantas, se obtuvo que la disponibilidad de hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn) afectarían negativamente la altura de los individuos de ambas parcelas. La disponibilidad de zinc también afectó el crecimiento en DAC de los individuos.

INIA (2018) indica que el valor adecuado de Fe en el suelo es de $>4,5 \text{ mg kg}^{-1}$, en tanto la cantidad de hierro observada en ambas condiciones supera ampliamente este valor, con $28,5 \text{ mg kg}^{-1}$ en el sector con riego y de $38,8 \text{ mg kg}^{-1}$ en el sector sin riego. Esta alta concentración, sumado al pH presente en la zona, permitiría la presencia de concentraciones tóxicas de Fe, lo que afectaría el crecimiento y disponibilidad de otros nutrientes esenciales para las plantas (Dobermann y Fairhurst, 2000; Hereen, 2021).

El efecto de Mn y Zn sobre el crecimiento en DAC y altura de las plantas, se asocia a los altos contenidos de Mn y a los bajos niveles de Zn observados. Salinas (1979) menciona que altas concentraciones de Mn afectan el crecimiento de la parte aérea de las plantas. En este sentido Amezcua y Lara (2017) refieren que deficiencias de Zn limitan el crecimiento y desarrollo de todas las especies vegetales.

3.2.5.2 Conductividad eléctrica del suelo (CE)

La conductividad eléctrica (CE) observada en ambas parcelas es de $0,3 \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$. USDA (1999) menciona que valores de CE entre 0 y $0,8 \text{ dS m}^{-1}$ son aceptables para el crecimiento de los individuos, debido a que tienen efectos despreciables sobre las plantas y organismos microbianos. Por lo tanto, en ambas parcelas la conductividad eléctrica observada se encuentra bajo rangos normales.

3.2.5.3 Materia orgánica y Capacidad de intercambio catiónico

La materia orgánica se refiere a la cantidad de restos orgánicos que se encuentran alterados y que pueden aumentar el contenido de nutrientes del suelo, lo que podría aportar en un incremento de la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Además, favorece la microestructura del suelo, elemento aportante contra la erosión del suelo (Garrido, 1993). Este mismo autor indica como referencia el contenido de materia orgánica en cultivo seco de la zona centro, norte y sur, presentando porcentajes >1 y 2% , considerados como bajos, es decir, los valores de materia orgánica obtenidos en ambos tratamientos se encontrarían muy cercanos a estos niveles.

La capacidad de intercambio catiónico es uno de los procesos más importantes que ocurren en el suelo, ya que indica la disponibilidad y cantidad de nutrientes de las plantas. La CIC mide la cantidad de cargas negativas presentes en la superficie mineral y componentes orgánicos del suelo, representando la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Jaramillo, 2002). Los valores obtenidos en este ensayo fueron de $9,6 \text{ cmol kg}^{-1}$ en el sitio con riego y de 6 cmol kg^{-1} en la condición de seco. Ramírez (1997) indica que a mayor CIC existe una alta disponibilidad de los diferentes elementos de suelo, además menciona que los valores de CIC menores a 10 cmol kg^{-1} son considerados bajos. En ambas parcelas existiría una limitada disponibilidad de los diferentes elementos del suelo, por lo que requerirían mayores aportes de materia orgánica para poder elevar la CIC (Garrido, 1993).

La materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico presentaron efectos significativos sobre el crecimiento en DAC de las plantas. Si bien ambas propiedades aumentan el crecimiento en DAC de las especies, se observó la presencia de una proporción de MO y CIC levemente mayor en la parcela con riego, por lo que ambas propiedades

podieron aportar en la diferencia observadas en el crecimiento en diámetro de los individuos entre tratamientos. El efecto observado se debe a la estrecha relación que existe entre ambas propiedades, pudiendo restringir o aumentar la disponibilidad y cantidad de nutrientes disponibles para las plantas (Garrido, 1993).

5. CONCLUSIONES

La densidad aparente promedio observada en ambos tratamientos se encuentra bajo parámetros ideales, por lo que no generan efectos significativos en la sobrevivencia y crecimiento de las especies evaluadas, sin embargo, se apreciaron valores de densidad aparente y resistencia a la penetración en dos de los cinco bloques en condición de secano que podrían sugerir posibles limitaciones del crecimiento radicular de los individuos. A modo general, la compactación observada no posee efectos significativos en el crecimiento y sobrevivencia de las especies estudiadas.

La condición hídrica no posee efectos sobre la sobrevivencia de las especies utilizadas en el marco de plantación, sin embargo, es una variable que restringe el crecimiento en altura y diámetro a la altura del cuello. Las especies que mejor desempeño obtuvieron en sobrevivencia y crecimiento para ambas condiciones estudiadas fueron *Lithraea caustica* y *Quillaja saponaria*. La principal limitante de la disponibilidad de agua es la baja cantidad de microporos y la baja tasa de infiltración del suelo, condición que presumiblemente sería consecuencia del uso intensivo del territorio y por la ocurrencia de incendios forestales. El riego y las obras de conservación de suelos y agua (OCAS) serían herramientas esenciales para suplir limitaciones de este recurso.

Las propiedades químicas del suelo no poseen efectos sobre la sobrevivencia de los individuos, no obstante, afectan el crecimiento en DAC y altura de las plantas. Ambos tratamientos presentaron bajos niveles de macronutrientes, bajos niveles de materia orgánica y pH, por lo que la disponibilidad de estos es aún más restringida. Los micronutrientes analizados presentaron valores adecuados de disponibilidad, sin embargo, la baja capacidad de intercambio catiónico disminuiría su almacenamiento para las plantas.

BIBLIOGRAFÍA

AGBEDE, T. 2006. Effect of tillage on soil properties and yam yield on an alfisol in southwestern Nigeria. *Soil & Tillage Research* 86 (1). 8p.

AGUIRRE, A. 2008. Identificación de mecanismos fisiológicos desarrollados por *Cryptocarya alba* (Mol.) Looser (Peumo) ante condiciones de sequía. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. 33 p.

ARMESTO, J. Y PICKET, S. 1985. A mechanistic approach to the study of sucession in the Chilean matorral. *Reviste Chilena de Historia Natural*. 8p.

AMEZCUA, J. y LARA, M. 2017. El Zinc en las plantas. *Revista ciencia* 68 (3). 8p.

ALTAMIRANO, T. 2008. Restauración de los sistemas naturales mediterráneos de Chile central. Memoria de ingeniero forestal. Santiago, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. 107p.

AZCÓN-BIETO, J. y TALÓN, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw-Hill-Interamericana. Madrid, España. 522 p.

BARBAZÁN, M. 1998. Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 27p.

BARRÍA, X. 2011. Respuestas fisiológicas y de crecimiento en plantas de *Quillaja saponaria* Mol. (Quillay), sometidas a distintos niveles de restricción hídrica. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 37 p.

BARRIGA, C. 2012. Acumulación y secuestro de carbono en bosques esclerófilos en la Reserva Nacional Roblería del cobre de Loncha: Implicancias para su conservación. Memoria de Magíster en Áreas silvestres y Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Santiago, Chile. 38p.

BAVER, L., GARDNER, W. Y GARDNER, R. 1973. Física de suelos. 529p.

BECERRA, P., SMITH-RAMÍREZ, C. Y ARELLANO, E. 2018. Evaluación de técnicas pasivas y activas para la recuperación del bosque esclerófilo de Chile Central. Santiago, Chile. 92p.

BECERRA, P., CRUZ, G., RIOS, S. Y CASTELLI, G. 2013. Importance of irrigation and plant size in the establishment success of different native species in a degraded ecosystem of central Chile. *Revista Bosque* 34(1). 10p.

BELMONTE, F., ROMERO, A. y LÓPEZ, F. 1999. Efectos sobre la cubierta vegetal, la escorrentía y la erosión del suelo, de la alternancia cultivo-abandono en parcelas experimentales. *Investigaciones Geográficas*. 107p.

BEYERS, J., BROWN, J., BUSSE, M., DEBANO, L., ELLIOT, W., FOLLIOTT, P. *et al.* 2008. *Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soils and water*. 262p.

BÖRGEL, R. 1983. Geomorfología. *Geografía de Chile*. IGM. 182 p.

BUCKMAN, H. y BRANDY, N. 1966. *The Nature and Properties of Soils*. 590 p.

CABRERA, H. 2002. Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de alta montaña. *Revista Chilena de Historia Natural*. Vol 75(3): 12 p.

CANADELL, J. y ZEDLER, P. 1995. Underground structures of woody plants in mediterranean ecosystems of Australia, California, and Chile. 210 p.

CASTILLO, M. 2016. Propuesta de restauración ecológica para el predio Las Brisas, Región del Maule, Chile. Memoria de título de Ingeniería Forestal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Santiago, Chile. 88p.

CATTAN, P. 1995. Ganadería y conservación. *TecnoVet* 1(1).

CAVIERES, L. BADANO, E. SIERRA-ALMEIDA, S. GÓMEZ, S. MOLINA, M. 2006. Positive interactions between alpine plant species and the nurse cushion plant *Laretia acaulis* do not increase with elevation in the Andes of central Chile. *New Phytologist*. 10p.

CFCN, 2020. Estaciones experimentales. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza.

[en línea]
<<http://www.forestal.uchile.cl/facultad/estaciones-esperimentales/74083/predio-las-brisas-vii-region>> [Consulta: 17 de mayo de 2021].

CHERNI, J. 2003. Perspectiva conceptual y práctica de la modernización ecológica y la globalización. [En línea] Recuperado en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12400703>>. Consultado el: 17 de junio de 2021

CHIMENTI, C. 2004. Déficit Hídrico. [en línea] <<http://www.agro.uba.ar/agro/carreras/jardineria/materias/fisio/deficit.pdf>> [Consulta: 27 junio 2010]

CIESLA, W. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. FAO. 146 p.

CIREN, 2010. Suelos para uso silvoagropecuario. Degradación de suelos en Chile. Santiago de Chile. 392 p.

CIREN. 2015. Región del Maule, Provincia de Linares, Comuna de San Javier, Recursos naturales y proyectos. Gobierno de Chile. 17p.

CISNEROS, R. 2003. Apuntes de la materia de riego y drenaje. Ciudad de México, México. Universidad autónoma de San Luis de Potosí. Facultad de Ingeniería. 164p.

CLEARY, B., GREAVES R., y HERMANN, R. 1978. A Guide for Regeneration Forest. 242 p.

CONAF. 2016. Informe de riesgo de ocurrencia de incendios forestales en comuna de San Javier. Gobierno de Chile. 14p.

CONAF. 2022. Estadística- Ocurrencia y daño por comuna 1985-2021. [En línea] <<https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>> [Consulta: 8 mayo 2022]

CORFO, 1964. Suelos. Gobierno de Chile. 389p.

CORFO. 2011. Compendio de prácticas convencionales del uso sostenible del recurso agua y suelo en zonas áridas y semiáridas, con énfasis en la III y IV Región de Chile. 34.

CORNEJO, J. 2016. Propuesta de restauración ecológica en matorral y bosque esclerófilo degradado en la Reserva Nacional Rio Clarillo, Región Metropolitana, Chile. Memoria de título de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 56p.

DEBANO, L., NEARY, D., y FFOLLIOTT, P. 1998. Fire's effects on ecosystems. 333 p.

DOBERMANN, A. y FAIRHURST, T. 2000. Toxicidad de hierro en arroz. 4p.

DONAHUE, R., MILLER, R. y SHICKLUNA, J. 1997. Soils: an introduction to soil and plant growth. 667p.

DONOSO, C. 1981. Reseña ecológica de los bosques mediterráneos de Chile. Revista Bosque. Vol 4. 30 p.

DONOSO, S., PEÑA-ROJAS, K., PACHECO, C., LUNA, G. y AGUIRRE, A. 2011. Respuesta fisiológica y de crecimiento de plantas de *Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica. Revista Bosque 32(2): 8p.

DONOSO, S., PEÑA-ROJAS, K., PACHECO, C., DURÁN, S., SANTELICES, R. y MASCARÓ, C. 2015. The physiological and growth response of *Acacia caven* under water stress and the application of different levels of biosolids. Ciencia e Investigación Agraria 42(2): 10p.

ELLIES, A. 2004. Efecto de la materia orgánica sobre la estructura del suelo. 12p

FERNÁNDEZ, C. 2015. Caracterización física del suelo de la granja experimental de la Universidad del Valle. Tesis de grado para optar al título de ingeniero agrícola. Facultad de ingeniería, Universidad del Valle. 92p.

FERNÁNDEZ, I., MORALES, N., OLIVARES, L., SALVATIERRA, J., GÓMEZ, M. y MONTENEGRO, G. 2010. Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales por 1ª ed. Santiago, Gráfica Lom, 2010. 149p.

GÁLVEZ, J. 2002. La restauración ecológica: conceptos y aplicaciones. [En línea]. Recuperado en: Consultado el: 17 de junio de 2020.

GARRIDO, S. 1993. Interpretación de análisis de suelo. 40p.

GAYOSO, J., ALARCÓN, D. 1999. Guía de conservación de suelos. Instituto Forestal. Gobierno de Chile. 96p.

GILIBERTO, J. y ESTAY, H. 1978. Seasonal water stress in some Chilean matorral shrubs. Botanical Gazzete. 24 p.

GUAJARDO, A. 2010. Respuestas ecofisiológicas de plantas de *Litrhaea caustica* (Mol.) Hook et Arn. Sometidas a restricción hídrica controlada. sometidas a distintos niveles de restricción hídrica. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 38 p.

HAVLIN, J. TISDALE, S. NELSON, W. y BEATON, J. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. 503 p.

HEREEN, O. 2021. Efecto directo e indirecto del exceso de hierro (Fe) disponible en el suelo sobre el desempeño del cultivo *Lepidium meyenii* Walp. (Maca). Memoria de

Ciencias con mención en Biología. Lima, Perú. Facultad de ciencias y filosofía. Universidad Peruana Cayetano Heredia. 28p.

HILLEL, D. 1982. Introduction to soil physics. 359p.

HOSSNE, A. 2004. Evaluación terramecánica del crecimiento radical en un suelo ultisol de sabana del Estado Monagas, Venezuela. Revista Científica UDO Agrícola 4(1). 10p.

ILABACA, D. 2008. Respuestas ecofisiológicas desarrolladas por *Peumus boldus* Mol. frente a condiciones de restricción hídrica. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 32 p.

INE. 2012. Censo Agropecuario. Informe regional, Maule. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile.

INFOR. 2011. Boldo: Rescate de un Patrimonio Forestal Chileno - Manejo Sustentable y Valorización de sus Productos. Santiago. 235 p.

INFOR. 2015. El bosque nativo de Chile: Resultados del inventario forestal nacional periodo 2001-2015. 64p.

INIA. 1999. Curso para capacitación de operadores del programa de recuperación de suelos degradados. 269p.

INIA. 2018. Curso de capacitación para operadores y futuros operadores del Sistema de incentivos para la sustentabilidad agroambiental (SIRSD-S) de la Región de Los Ríos. Osorno, Chile. 110p.

IPCC, 2021. El cambio climático es generalizado, rápido y se está acelerando. [En línea] <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf> [Consulta: 20 agosto 2021]

ISRAELSEN, O. y HANSEN, V. 1985. Principios y aplicaciones del riego. 396p.

JARAMILLO, D. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. 619p.

JENNY, H. 1941. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. 281 p.

KAURICHEV, I. 1984. Prácticas de edafología. 280p.

LAL, R. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. 78 p.

LAL, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. 22p.

LOWERY, B. ARSHAD, M., LAL, R. Y HICKEY, W. 1996. Soil water parameters and soil quality. 14p.

LUNA, G. 2006. Evaluación de parámetros fisiológicos y de crecimiento en plantas de Quillaja saponaria Mol. bajo condiciones de déficit hídrico. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 35 p.

MARQUET, P.; ARROYO, M.; FERNÁNDEZ, S.; GELCICH, K.; HABIT, A.; LARA, A.; MAASS, A.; PAUCHARD, P.; PLISCOFF, P.; SAMANIEGO, H.; SMITH-RAMÍREZ, C. 2019. Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de Biodiversidad. Santiago: Comité científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, Gobierno de Chile. 318 p.

MARTÍNEZ, E., FUENTES, J. y ACEVEDO, H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de las ciencias del suelo y nutrición vegetal 8(1): 28p.

METER GROUP. 2021. Mini disk infiltrometer. 21p.

MINERVINI, M., MORRÁS, H. Y TABOADA, M. 2018. Efectos del fuego en la matriz del suelo. Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas. Ecología Austral. 16p.

MONGIL, J., MARTÍNEZ, A. 2008. Restauración de los suelos y de la vegetación en la lucha contra la desertificación. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 25: 4p.

MOODY, J. y MARTIN, D. 2009. Forest fire effects on geomorphic processes. Revista Science. 38p.

NAVARRETE, M. 2002. Comportamiento de la regeneración de cuatro especies del bosque esclerófilo en un área quemada. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal, Universidad de Talca. 60p.

OGAYA, R; PEÑUELAS, J; MARTÍNEZ-VILALTA, J. y MANGIRON, M. 2003. Effect of drought on diameter increment of *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*, and *Arbutus unedo* in a hola oak forest of NE Spain. Forest Ecology and Management. 9p.

PEÑA-ROJAS, K., ARANDA, X. y FLECK, I. 2004. Stomatal limitation to CO₂ assimilation and down-regulation of photosynthesis in *Quercus ilex* L. resprouts under slowly-imposed drought. Tree Physiology. 9p.

PEÑA-ROJAS, K., DONOSO, S., GANGAS, R., DURÁN, S. y ILABACA, D. 2018a. Efectos de la sequía en las relaciones hídricas, crecimiento y distribución de biomasa en plantas de *Peumus boldus* Molina (Monimiaceae) cultivadas en vivero. Interciencia 41 (1). 6 p.

PEÑA-ROJAS, K., DONOSO, S., PACHECO, C., RIQUELME, A., GANGAS, R., GUAJARDO, A. Y DURÁN, S. 2018b. Respuesta morfo-fisiológicas de plantas de *Lithraea caustica* (Anacardiaceae) sometidas a restricción hídrica controlada. Revista Bosque 39(1): 9p.

PÉREZ, M., GARCÍA, A., PAREDES, A., LUNA, J. Y MADRIZ, P. 2016. Resistencia mecánica del suelo a la penetración de raíces y forma de la raíz reservante de la batata a partir del descriptor de Huamán. Agronomía Costarricense 40 (2). 14p.

PIMSTEIN, R. 1974. Contribución al estudio de ecosistemas en comunidades de *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser “Roble maulino”. Tesis para optar al título de ingeniero forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 56p.

PINZÓN, A. 1993. Propiedades físicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Colombia. Revista Suelos Ecuatoriales. 8p.

PLADECO. 2018. Plan regulador comunal San Javier. 84p.

PLISCOFF, P. 2015. Aplicación de los criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) para la evaluación de riesgo de ecosistemas terrestres de Chile. 63 p.

PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M., Y ROQUERO, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid, España. 929 p.

POWLSON, D., WHITEMORE, A. y GOULDING, K. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. European Journal of Soil Science. 13p.

POZO, M., LÓPEZ-RÁEZ, J., AZCÓN-AGUILAR, C. y GARCÍA-GARRIDO, J. 2015. Phytohormones as integrators of environmental signals in the regulation of mycorrhizal symbioses. New Phytologist 205(4): 4p.

PRODON, R., FONS, R. y ATHIAS-BINCHE, F. 1987. The impact of fire on animal communities in the Mediterranean área. 37p.

QUINTANILLA, V. 1983. Biogeografía de Chile. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.

QUIROZ, I., GARCÍA, E., GONZÁLEZ, M., CHUNG, P. Y SOTO, H. 2009. Vivero forestal: Producción de plantas nativas a raíz cubierta. INFOR, Gobierno de Chile. 128p.

RAMIREZ, R. 1997. Propiedades físicas químicas y biológicas de los suelos. CORPOICA. Bogotá. 24 p.

- RODRIGUEZ, M. Y FLÓREZ, V. 2004. Nociones básicas del ferti-riego: Elementos esenciales y beneficiosos. 12p.
- SALINAS, G. 1979. Adaptación de plantas a toxicidades de aluminio y manganeso en suelos ácidos. 34p.
- SAMPAIO, E. 2009. Estudio de las Prácticas Culturales, Porosidad del Suelo y Gestión Hídrica en el Combate contra la Desertificación. 11p.
- SANTIBAÑEZ, F., SANTIBAÑEZ, P., CAROCA, C. y GONZÁLEZ, P. 2017. Atlas agroclimático de Chile. 212p.
- SAWCHIK, J. 1995. Algunos conceptos básicos para el manejo del riego. 5p.
- SCHLATTER, J. y GERDING, V. 1984. Deficiencia de boro en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile. Revista Bosque. 8 p.
- SELLES VAN, G., FERREYRA, R., RUIZ, R., FERREYRA, RODRIGO. y AHUMADA, 2012. Compactación de suelos y su control: estudio de casos en el Valle de Aconcagua. 234p.
- SHAKESBY, R. y DOERR, S. 2006. Wildfire as hydrological and geomorphological agent. Earth-Science. 38p.
- SOTO, L., LEIVA, E., MONTOYA, F., SEGUEL O., DELPIANO, C., BECERRA, P., VÁSQUEZ, I., MIRANDA, A. y SMITH-RAMÍREZ, C. 2015. Efecto del espino (*Acacia caven*) sobre las propiedades físicas del suelo en exclusiones de pastoreo. Chilean Journal of Agricultural Research 31(3): 11p.
- SOTO, L., GALLEGUILLOS, M., SAGAL, O. y SOTOMAYOR, B. 2019. Assessment of soil physical properties' statuses under different land covers within a landscape dominated by exotic industrial tree plantations in south-central Chile. Journal of Soil and Water Conservation. 74 (1): 11p.
- SPARLING, G. 1997. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling, as indicators of soil health. 97p.
- TORMENA, C., DA SILVA., A. and LIBARDI, P. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. Soil & Tillage Research. 9p.
- U.S. DEPARTAMENT OF AGRICULTURE AND SOIL SURVEY DIVISION STAFF. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Washington DC, Estados Unidos de Norteamérica. 88p.

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE AND SOIL SURVEY DIVISION STAFF. 1993. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service & USDA. Handbook 18. 315 pp.

VALLADARES, F., VILAGROSA, A. PENUELAS, F. y OGAYA, R. 2004. Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. 26p.

VAN DE WOUW, P., ECHEVERRÍA, C., REY-BENAYAS, J. y HOLMGREN M. 2011. Persistent Acacia savannas replace Mediterranean sclerophyllous forests in South America. Forest Ecology and Management 262 (6): 8p.

WILDNER, L. y DA VEIGA, M. 1995. Relación y pérdida de fertilidad del suelo. FAO. 60 p.

ZHANG, R. 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. Soil Science Society of America Journal. 6p.

APÉNDICES

Cuadro 13. Efecto de las propiedades químicas del suelo sobre la sobrevivencia y el crecimiento en DAC y altura. Coef. P: Coeficiente de correlación de Pearson; DAC: Diámetro a la Altura del Cuello; H: Altura (cm); Cu: cobre; Ca: S: sobrevivencia. (*): P-value <0,05 indica diferencias significativas.

Coeficiente de correlación/probabilidad	DAC	H	Cu	Ca	S
DAC	1,00	0,01	0,08	0,86	0,19
H	0,78	1,00	0,42	0,71	0,02
Cu	-0,57	-0,29	1,00	0,21	0,62
Ca	0,06	0,14	0,44	1,00	0,92
S	0,45	0,7	-0,18	0,04	1,00