



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Revisión bibliográfica de los impactos físicos acumulados en el suelo en función del tráfico de la maquinaria de maderero

Patrocinante: Sr. Marco Contreras S.

Trabajo de Tesina presentado como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniera Forestal

MACARENA ELISABETH GONZÁLEZ HUENCHUGUALA

VALDIVIA

2021

	Índice de materias	Página
i	Calificación del Comité de Titulación	i
ii	Resumen	ii
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Sistemas de cosecha	3
2.2	Impactos de sistemas terrestres en el suelo	5
2.3	Prácticas preventivas o mitigatorias	10
2.4	Normativa vigente	11
3	DISCUSIÓN	12
3.1	Propuesta metodológica	14
3.1.1	Selección del sitio de estudio	14
3.1.2	Trazado de la vía de saca	15
3.1.3	Diseño experimental	16
3.2.4	Mediciones en campo	16
3.2.5	Obtención de muestras y mediciones en laboratorio	17
3.2.6	Calibraciones de laboratorio y análisis estadístico	18
4	CONCLUSIONES	19
5	REFERENCIAS	20
Anexos	1 Diseño experimental de circuito controlado de 300 m para análisis de tránsito de maquinaria de cosecha	
	2 Método de medición de las variables del suelo en cada punto de muestreo, derivado del tránsito de maquinaria forestal en un sitio determinado	

Calificación del Comité de Titulación

Nota

Patrocinante:	Sr. Marco Contreras Salgado	_6,7__
Informante:	Sr. Oscar Thiers Espinoza	_6,9__
Informante:	Sra. Dorota Dec	_6,7__

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.



Sr. Marco Contreras S.

RESUMEN

El uso de maquinarias de madereo terrestre utilizadas en las operaciones forestales impacta la estructura del suelo e incrementa la erodabilidad. Es de gran importancia estudiar los efectos que tienen las cosechas forestales sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo, con el fin de prevenir futuros daños irreversibles producto de su uso. El objetivo general de esta revisión bibliográfica fue generar una propuesta metodológica para medir los impactos físicos y mecánicos en el suelo durante la cosecha forestal por el tráfico de maquinaria de madereo terrestre. Las maquinarias empleadas para el madereo varían en función de la topografía, los volúmenes de producción y el método de extracción, donde los sistemas de madereo terrestre causan más impactos en el suelo, por el tránsito y peso de las maquinarias, el arrastre de la carga y la baja planificación del diseño de cosecha. Los principales impactos sobre el suelo son la compactación, erosión, remoción y mezcla del estrato orgánico, y ahuellamiento, los cuales no se pueden eliminar, solo reducir a través de medidas preventivas y mitigatorias. Se propuso un marco de referencia para diseñar estudios asociados a evaluar los impactos del suelo tras el tráfico de maquinaria de madereo, estudios que desarrollados a nivel nacional servirían para evaluar los impactos medioambientales causados por la actividad productiva forestal en Chile, potenciando un área de investigación que aún se encuentra en una etapa primaria en Chile.

Palabras clave: madereo terrestre, impactos al suelo, ahuellamiento, compactación, erosión.

1. INTRODUCCIÓN

En Chile hay una superficie de plantaciones de alrededor de 3,1 millones de hectáreas, distribuidos principalmente desde la región del Libertador Bernardo O'Higgins hasta la región de Los Lagos, que abastece a la industria forestal con aproximadamente 45,8 millones de m³ssc de madera al año (INFOR 2018). Considerando un volumen promedio a la edad de cosecha de 500 m³ ha⁻¹, la superficie de plantaciones cosechada anualmente corresponde a alrededor de 91.600 hectáreas.

Los árboles o trozas extraídas desde el bosque son transportados hasta los puntos de carguío, actividad conocida como madereo. Tradicionalmente, los sistemas de cosecha se clasifican en función de la maquinaria de madereo, la cual se asigna de acuerdo con la pendiente promedio del terreno. Cuando la pendiente es menor al 35% se emplean sistemas terrestres, mientras que los sistemas con cables se utilizan para pendientes mayores. En general, durante el madereo con sistemas terrestres tanto la carga como la maquinaria de madereo transitan desde el bosque hasta el punto de carguío. Sin embargo, cuando se emplean sistemas con cable solo la carga se traslada a través del bosque consecuentemente causando impactos relativamente menores al suelo.

Las maquinarias de madereo terrestre más utilizadas en Chile son los tractores forestales de arrastre (skidders) equipados con garra o huinche y los tractores autocargadores de carga suspendida (forwarders). La principal diferencia, en términos de impactos al suelo, es que al usar skidders tanto el tránsito de la maquina como el arrastre de la carga causan impactos, en cambio, al usar forwarders solo el tránsito de la máquina causa impactos ya que no se arrastra la carga, aunque la presión de los neumáticos sobre el suelo es mayor al usar forwarders.

Las vías de saca son los senderos usados por la maquinaria de madereo para transportar la madera desde el bosque hasta los puntos de carguío. La ubicación de las vías de saca incide directamente en los tiempos de viaje, por ende, la productividad del madereo, y como consecuencia, en los costos de las operaciones forestales. Tradicionalmente, empresas contratistas realizan las operaciones forestales, planifican y trazan las vías de saca en terreno, considerando topografía, volumen cosechable, ubicación de las canchas de madereo y zonas de protección, definidas por las empresas forestales.

Las vías de saca con alto tráfico concentran diversos impactos al suelo a causa del elevado peso de la maquinaria y cargas transportadas. Estos impactos incluyen compactación, desplazamiento lateral del suelo y ahuellamiento, que con el tiempo aumentan la escorrentía superficial y generan erosión (Rab 1996, Kolka y Smidt 2004), conduciendo a una merma en la productividad del suelo y en casos extremos a la pérdida del sitio con fines forestales (Zenner *et al.* 2007, Zenner y Berger 2008). Respecto de la densidad aparente del suelo, se reportan sus incrementos entre 10 y 80% dependiendo de las

características del tipo de suelo, incluyendo la capacidad de soporte, contenido de humedad y materia orgánica (Reisinger *et al.* 1988) y, además según las características de las maquinarias de madereo como capacidad de carga, vibración y presión de los neumáticos.

Los resultados de impactos al suelo de estudios internacionales son variados y dependientes del tipo de maquinaria, suelo y bosque, lo que hace difícil su extrapolación a las operaciones forestales en el país. En Chile existen varias evaluaciones de las propiedades físicas de suelos bajo bosque que mayoritariamente comparan el cambio del uso de suelo desde un bosque nativo a un uso más intensivo como una plantación forestal o un cultivo agrícola (Ellies *et al.* 1993, Ellies 1995, Nissen *et al.* 2005 y 2006, Cuevas 2006, Reyes *et al.* 2014ab). Existen también algunas evaluaciones asociadas a caminos forestales, canchas de madereo y vías de saca, tendentes solo a cuantificar los porcentajes de alteración de las superficies (impacto visual) plantadas y cosechadas (Gayoso e Iroumé 1991, Gayoso 2003).

Actualmente, las empresas consideran aspectos ambientales generales que limitan el tráfico como evitar el cruce de zonas de protección, cauces de agua temporales o permanentes, y suelos húmedos o frágiles. Además, se utilizan medidas de rehabilitación del suelo posterior a la cosecha como los subsolados, faenas de limpieza de cauces y manejo de desechos distribuyéndolos en las zonas cosechadas, especialmente en vías de saca, o formando pilas en curvas de nivel (CONAF 2013, FSC 2015). Para una correcta planificación de las vías de saca y prevenir potenciales daños irreversibles al suelo es importante identificar y cuantificar los impactos del uso de maquinaria de madereo terrestre sobre el suelo y determinar su relación con el nivel de tráfico.

El objetivo general de la presente revisión bibliográfica es generar una propuesta metodológica para medir los impactos físicos y mecánicos en el suelo durante la cosecha forestal por el tráfico de maquinaria de madereo terrestre.

Los objetivos específicos son:

- Describir los distintos sistemas de cosecha, con énfasis a los sistemas terrestres.
- Identificar impactos y propiedades del suelo más afectas por el tráfico de maquinaria de madereo terrestre.
- Describir las prácticas preventivas o mitigatorias en la planificación de operaciones forestales presentes en la normativa forestal vigente.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de cosecha

En las operaciones de cosecha es posible identificar las siguientes fases o etapas principales; i) volteo de árboles, ii) procesado de los árboles (desrame, trozado, despunte), iii) madereo o transporte de las trozas al lugar de carguío (orilla de camino o cancha de madereo), y iv) selección y carguío sobre camiones (Neuenschwander 2001).

Aunque se refieren a conceptos diferentes, existe confusión en el uso de los términos método y sistema de cosecha debido a que están estrechamente ligados. Un sistema de cosecha es definido como el conjunto de herramientas, equipos y maquinarias utilizadas en las operaciones o procesos de cosecha en un área determinada. El método de cosecha define la manera en la que la madera es transportada al lugar de carguío, la cual depende de los procesos que se realizan a los árboles desde que son volteados. Se identifican principalmente los tres siguientes métodos de cosecha: i) el método de árbol completo, donde los árboles son volteados y transportados enteros con su follaje hasta el lugar de carguío para procesados, ii) el método de fuste entero, en el que los árboles después de ser volteados se desraman y despuntan junto al tocón para ser luego transportados como un rollizo hasta el lugar de carguío, y iii) el método de madera corta, donde los árboles son volteados y procesados en trozas de distintas dimensiones junto al tocón, para luego las trozas ser transportadas al lugar de carguío (Neuenschwander 2001).

Los sistemas de cosecha se clasifican de acuerdo con el tipo de maquinaria usada para el madereo, principalmente porque es la actividad de mayor costo de la cosecha y la que genera mayor impacto en el suelo. Tradicionalmente, en terrenos con pendientes menores a 35%, se utilizan sistemas terrestres como animales, tractores agrícolas y tractores forestales (skidders y forwarders). Sin embargo, los sistemas de madereo con animales y tractores acondicionados son muy poco comunes, y la mayoría de las empresas de servicios utilizan tractores forestales. Por razones de productividad, seguridad de las maquinarias y operadores, y de reducción de impactos al suelo, en terrenos con pendientes mayores a 35% se utilizan sistemas de cables como torres de madereo con líneas activas (alpine) y estáticas (skylines). Por último, en terrenos con pendientes extremas (ej., 100%) y con difícil acceso, se suelen utilizar sistemas de madereo aéreos, como helicópteros, pero su uso es limitado debido a los altos costos de adquisición y operación (Wang *et al.* 2005).

Una categorización más detallada de la asignación de las maquinarias de madereo, en función de la pendiente, empleadas por las empresas forestales que prestan servicios de cosecha forestal en el sur de Chile, corresponde al uso de: i) skidders con garra o forwarders (junto con una máquina cortadora-

procesadora, apiladora que realiza el volteo y procesado) para pendientes entre los 0 y 15%, ii) skidders con cable (junto con motosierras para el volteo tradicional) para pendientes entre 15 y 35%, y iii) torres de madereo (con volteo tradicional o mecanizado) para pendientes entre 35 y 100%. Terrenos con pendientes superiores son típicamente considerados como zonas de protección (Carey *et al.* 2007).

El aumento de la magnitud de los impactos producidos en el suelo varía en función del sistema y la maquinaria utilizada, aunque independientemente del sistema utilizado, todos causan impactos al suelo producto del arrastre de la carga (ahuellamiento y desplazamiento de suelo) y el tráfico de la maquinaria (compactación y ahuellamiento). En los sistemas terrestres tanto la maquinaria como la carga, ya sea arrastrada o suspendida, se desplazan sobre el suelo causando alteraciones e impactos. Para los sistemas con cable, la máquina empleada se encuentra en un lugar fijo y solo la carga se arrastra parcial o completamente levantada a través del bosque, por lo que el peso y el impacto sobre el suelo, es menor. Mientras que en los sistemas aéreos la carga es completamente levantada y no existen impactos al suelo por el madereo (Orozco *et al.* 2006).

Los sistemas de madereo terrestre se pueden clasificar en manuales, animales y mecanizados. El uso de madereo manual y con animales, posee bajos costos y genera menores daños ambientales comparados con el madereo mecanizado. En el madereo con animales, el más común es la yunta de bueyes en operaciones de pequeña escala y de madera delgada, pudiendo arrastrar de 300 a 500 kg, generalmente árboles trozados en terrenos con pendientes hasta 40% a favor y hasta 10% en contra. Este sistema se utiliza en lugares poco accesibles o en unidades de corta pequeñas (Carey *et al.* 2018). También se pueden encontrar en la Cordillera de la Costa de la región del Maule faenas que operan con madereo con caballos que pueden trasladar una carga de tres a cinco trozas en pendientes de hasta 10% en contra y hasta 30-35% a favor, aunque esta práctica es cada vez más reducida (Gayoso y Gayoso 2009).

El madereo terrestre mecanizado posee mayores costos que el madereo manual y con animal, pero a la vez mayor productividad, aunque los impactos ambientales generados también se ven aumentados (Weaver *et al.* 2014). Por lo que en general, en la medida que los impactos al suelo son menores, los costos del sistema empleado aumentan.

Los tractores agrícolas no son muy frecuentes ya que poseen una capacidad de carga limitada, con poca maniobrabilidad e inestables en terrenos con pendientes, donde su límite se encuentra al 25% de pendiente ladera abajo en viaje cargado, aunque son una buena opción para pequeños y medianos productores dada su relativa baja inversión (Gayoso y Gayoso 2009). Los tractores de la construcción no están diseñados para arrastrar trozas, pero ocasionalmente son utilizados con este fin, al poseer rodado de orugas pueden trabajar en pendientes mayores que los tractores agrícolas pudiendo usarse en pendientes de hasta 70%, aunque no es aconsejable su uso en pendientes superiores a 36%, además son

muy lentos, lo que se traduce en largos tiempos de viaje, baja productividad y altos costos de madereo (Pinard *et al.* 1995).

Los tractores forestales están específicamente diseñados para el trabajo en el bosque y poseen accesorios que facilitan la cosecha como, por ejemplo, garra, huinche, arco, catargo (sulky), carro y el chasis articulado (Gayoso y Gayoso 2009). El chasis puede estar montado sobre ruedas u orugas, donde la diferencia en términos de impactos al suelo, es que aquellos que poseen un tren de rodado de oruga ejercen una menor presión en el suelo, reduciendo la formación de huellas profundas, pero tienen un costo más elevado (Neuenschwander 2001). Los tipos de tractores son los de arrastre (skidder winche o garra), arrastrador articulado con soporte y grúa (clambunk skidder) y tractor autocargable con carro o transportador con grúa (forwarder). Los tipos de brazos son de arco simple (movimiento arriba y abajo), arco doble (movimiento arriba, abajo, adelante y atrás) y brazo oscilante (Neuenschwander 2001).

2.2 Impactos de sistemas terrestres en el suelo

Durante el madereo terrestre tanto la maquinaria de madereo como el arrastre de la carga impactan al suelo. Los impactos tienen relación con las fuerzas ejercidas por las maquinarias sobre el suelo: la flotación (fuerza vertical) y la tracción (fuerza horizontal). Ambas fuerzas están ligadas a diferentes impactos, la flotación está directamente relacionada con el aumento de la compactación, lo que produce un aumento en la capacidad de soporte, y ahuellamiento. Por otro lado, la tracción está relacionada con el desplazamiento lateral del suelo y el ahuellamiento (Neuenschwander 2001).

Los impactos al suelo aumentan con la presión y con el número de pasadas, por lo que se concentran en lugares de alto tráfico, como vías de saca principales y canchas de madereo (Weaver *et al.* 2014). Además, la magnitud de los impactos depende de múltiples factores, entre los que se encuentran; i) el método de cosecha, ii) peso de la maquinaria, iii) tipo de rodado, iv) resistencia mecánica del suelo, v) temporada o época del año en que se realiza la operación, y vi) tiempo de rotación (Gayoso y Gayoso 2009).

En el método de cosecha, la forma en que se traslada la carga incide en el nivel de impactos al suelo y la compactación es mayor por el aumento de la carga y del peso de la maquinaria utilizada. Con respecto al tipo de rodado, las orugas poseen una mayor superficie de contacto con el suelo que los neumáticos, lo que aumenta la flotación y tracción, disminuyendo los impactos sobre el suelo. La resistencia mecánica del suelo tiene relación con la capacidad de soporte frente a la carga a la cual sea sometido, donde la resistencia mecánica corresponde a la cohesión interna de los agregados del suelo, y la capacidad de

soporte a la máxima carga que puede soportar un suelo sin que presente una deformación plástica, y depende de la textura, estructura, contenido de agua, presencia de materia orgánica e historial de manejo del suelo (Payahuala y Dörner 2009). La temporada de la operación se relaciona con el contenido de humedad y el grado de unión de las partículas del suelo, donde una mala práctica es realizar las cosechas en estaciones húmedas, cuando las partículas del suelo se encuentran más disgregadas. Y la edad de rotación, ya que rotaciones cortas impiden que el suelo se recupere de los impactos de la cosecha dentro de la rotación y por ende se acumulan los impactos por sucesivas cosechas (Gayoso y Gayoso 2009).

El suelo se ve alterado por las presiones o cargas a las cuales haya sido sometido, por lo que cuando aumenta la intensidad de la carga histórica de un suelo, mayor es el daño acumulado, reduciéndose su volumen y afectando a distintas profundidades (Ellies *et al.* 1993). Las primeras pasadas de las maquinarias es lo que genera el mayor impacto en el suelo y aumentan la densidad aparente, sobre todo en el estrato superficial producto de la compactación y la reducción de humedad del suelo (Williamson y Nielsen 2000, Gayoso 2003). La compactación producto del tráfico de maquinarias disminuye a mayores profundidades. McNabb *et al.* (2001) constatan en suelos Haplocryalfs y Dystrocryepts en un bosque boreal en Canadá, que tras 12 ciclos de carga y descarga de la maquinaria la densidad aparente aumentó en un 10%, 7% y 4% a 4, 10 y 20 cm de profundidad del suelo, respectivamente. Han *et al.* (2009) midieron en un bosque compuesto por *Pseudotsuga menziesii*, *Abies grandis*, *Pinus contorta* y *Larix occidentalis* con suelo Andisol en Estados Unidos, que tras una tala rasa con harvester a profundidades de 7,5, 15 y 22,5 cm, con un método de árbol completo la densidad aparente aumentó en un 54%, 24% y 12%, respectivamente y con un método de madera corta aumentó en 34%, 24% y 15% a las mismas profundidades. El suelo se compacta cuando la presión ejercida por la maquinaria excede su capacidad de soporte, lo cual puede suceder cuando una maquinaria pesada transita varias veces sobre la misma vía (Ellies *et al.* 1993), es decir, cada pasada causa una deformación adicional del suelo. El tipo de deformación (elástica o plástica) va a depender del peso de la máquina y la carga, la acumulación de pasadas sucesivas y el tipo de suelo, ya que esto último determina que tan resistente es el suelo.

La compactación del suelo también se ve influenciada por la pendiente del terreno, puesto que la compactación aumenta con la pendiente (Agherkakli *et al.* 2010). Agherkakli *et al.* (2010) constataron en un bosque caducifolio templado dominado por *Carpinus betulus* y *Fagus orientalis* con suelo franco a franco limoso, en el norte de Irán, que tras la tala con un skidder de orugas de acero TLT-100A de 11,2 toneladas, la densidad aparente del suelo aumentó un 21% tras la primera pasada en zonas de pendiente superior al 20%, mientras que en zonas de pendientes inferiores al 20% la compactación tras la primera pasada fue de 17,6%. En el sector forestal, suelos con densidad aparente superior a $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ muestran una menor productividad, al mismo tiempo, la porosidad se ve fuertemente afectada, principalmente los

macroporos (aire). Los suelos volcánicos suelen tener una densidad aparente aún menor, incluso inferior a 1 Mg m^{-3} , haciéndolos muy susceptibles a la compactación (Parker 2007). Cuando el suelo ya se encuentra compactado, adquiere cierta resistencia a seguir compactándose dada la disminución de macroporos.

La reducción del sistema de poros se puede ver mermado hasta en un 50-60%, a expensas de los macroporos, mientras que los microporos se ven menos afectados o incluso pueden llegar a aumentar (Ampoorter *et al.* 2007). Dickerson (1976) constató que en una llanura con suelo de textura arena franca a franco arcillosa limosa en Oxford, Estados Unidos, tras el paso de un skidder articulado con neumáticos hubo una reducción de los macroporos del 68% y de 38% tras el arrastre de una carga de tres trozas de pino maduro, pero en ambos casos los microporos aumentaron alrededor de 7%.

La cosecha forestal provoca cambios en la abundancia y composición de la materia orgánica del suelo, con efectos negativos en la estructura del suelo al volverlo más susceptible a la compactación. La mayor parte de los daños se da en el estrato superficial y alcanza mayores profundidades frente a un mayor contenido de humedad (Gayoso y Gayoso 2009), ya que cuando el suelo está seco hay un alto grado de unión de las partículas. Un mayor contenido de humedad implica una reducción en la capacidad de carga del suelo, pero aumenta el número de poros con agua que no se pueden comprimir, por lo que al superarse los contenidos críticos de humedad del suelo puede resultar en una menor susceptibilidad. Aun así, cuando el contenido de humedad supera niveles críticos, se promueve, además, el ahuellamiento (Williamson y Nielsen 2000).

Otro impacto asociado al uso de maquinaria de madereo terrestre es la erosión del suelo, la cual se ve determinada por la pendiente del terreno, la complejidad de las laderas, el tipo de madereo terrestre, y la ubicación de las vías de saca (Gayoso e Iroumé 1995). El tráfico de la maquinaria, el patinaje de los neumáticos y el arrastre de trozas aumentan el desplazamiento lateral del suelo, y por ende después de lluvias modifican el escurrimiento superficial, aumentan la generación de sedimentos y pérdida de nutrientes (Gayoso y Gayoso 2009). Además, la erosión del suelo superficial varía según la cobertura vegetal, la pluviometría del sitio y la pendiente del terreno. Iroumé *et al.* (1989) constataron en un suelo de cenizas volcánicas las pérdidas de suelo por erosión en cuatro meses (agosto a noviembre, 715 mm de precipitación), un año después de la tala rasa y la quema de los desechos, en una ladera de 30% de pendiente con vegetación espontánea la pérdida de suelo fue de 133 kg ha^{-1} y bajo la plantación de *Pinus radiata* fue de $70\text{-}75 \text{ kg ha}^{-1}$. Por otra parte, Murphy *et al.* (2004) analizaron en una plantación de *Pinus radiata* en un suelo franco arcilloso, de Nueva Zelanda, el efecto de la eliminación del mantillo y la leve compactación del suelo con dos pasadas de excavadoras pequeñas con oruga de acero (5,7 toneladas) tras una tala rasa. En la rotación siguiente de *Pinus radiata*, el volumen extraído disminuyó un 8% en

comparación con la rotación anterior. Pero tras la remoción del suelo superficial y la compactación tras 10 pasadas de la maquinaria, el volumen cosechado disminuyó un 42%. Esto ocurre porque las rotaciones sucesivas generan un efecto acumulativo de los daños.

La remoción del estrato orgánico debido al desplazamiento o la mezcla de suelo aumentan con el tráfico de maquinarias y la pendiente. Esta mezcla de los horizontes del suelo reduce el volumen de poros total, aumenta la densidad aparente y la tensión del suelo, que corresponde a la resistencia a la rotura del suelo al ser sometido a cargas como el peso propio y las sobrecargas (Laureda *et al.* 2016). La integración del estrato orgánico con el suelo mineral es beneficiosa, pero la remoción o pérdida, es decir, la alteración del mantillo derivado de la cosecha es negativa, esto porque i) existe una alteración a una reserva de nutrientes, ii) se altera la función de protección y resguardo del mantillo al suelo mineral, y iii) derivado de lo anterior, el suelo superficial queda expuesto, y por ello influenciado, a las consecuencias de un uso inapropiado. Najafi *et al.* (2009) cuantificaron la remoción en un suelo arcilloso de un bosque montañoso templado dominado por *Fagus orientalis* y *Carpinus betulus* del norte de Irán, en distintas pendientes; donde tras tres y siete pasadas de maquinaria, en terrenos con pendientes menores a 10% la remoción fue 29% y 78%, en pendientes entre 10-20% la remoción fue 52% y 83%, mientras que en pendientes superiores al 20% los porcentajes de remoción alcanzaron a 76% y 91%, respectivamente. La remoción o pérdida del horizonte orgánico (al interior del área cosechada) aumenta la temperatura media en el suelo mineral durante la temporada de crecimiento y reduce el contenido medio de agua del suelo mineral. Además, puede disminuir la biomasa microbiana, al disminuir el carbono disponible para el metabolismo microbiano, aunque cuando se produce una mezcla del estrato orgánico con horizontes posteriores del suelo y no una remoción, puede ocurrir lo contrario, aumentando la biomasa microbiana dado el aumento en el carbono disponible (incorporación en el estrato superficial) (Tan *et al.* 2005).

El ahuellamiento es la consecuencia de que las maquinarias exceden la capacidad de soporte del suelo, por lo que su profundidad y extensión está ligada al peso de la maquinaria, la pendiente, el dispositivo de contacto con el suelo (presión y ancho de neumáticos u orugas), la humedad y las propiedades físicas del suelo, como la porosidad y la densidad (Bygdén *et al.* 2004). El peso de la maquinaria empleada influye en el ahuellamiento o surcos, donde en Suecia, Jansson y Wästerlund (1999) lo corroboran, puesto que en bosques de *Picea abies* cosechados con máquinas ligeras de 5 a 9 toneladas, se registraron surcos con una profundidad de 1 a 2 cm. Mientras que en el estudio de Agherkakli *et al.* (2010) en un bosque caducifolio templado en suelo franco a franco limoso al norte de Irán se alcanzó una profundidad de 9 a 12 cm con una maquinaria de 11 toneladas. Además, la profundidad del ahuellamiento aumenta con la frecuencia del tráfico y la pendiente, puesto que a mayores pendientes la componente vertical de la fuerza de la carga se distribuye en una menor superficie (Bygdén

et al. 2004, Najafi *et al.* 2009, Agherkakli *et al.* 2010). Agherkakli *et al.* (2010) constató que, tras nueve pasadas de un skidder de 11 toneladas en un suelo franco a franco limoso, se formaron surcos de 9 cm de profundidad en pendientes menores al 20% y de 12 cm en pendientes con 20%. Najafi *et al.* (2009) llegaron a la misma conclusión, donde tras 14 pasadas de un skidder se obtuvo que una profundidad del surco de 18 cm con una pendiente menor al 10%, aumentando a 27,5 cm con una pendiente entre 10 y 20%, y alcanzando a 34,5 cm con pendiente superior al 20%.

Los altos contenidos de humedad también favorecen el ahuellamiento, provocando un mayor impacto con menor tráfico (Williamson y Nielsen 2000, Naghdi *et al.* 2009). Naghdi *et al.* (2009) señalan que en un bosque de asociación *Fagus-Carpinetum* sobre un suelo franco al norte de Irán, bajo las mismas condiciones, pero con un contenido de humedad de 21%, la profundidad del surco es de 22 cm, mientras que con un contenido de humedad del 40%, el ahuellamiento alcanza una profundidad de 37 cm.

El conjunto de estos impactos al suelo causados por la maquinaria de maderero provocan una disminución en la productividad, lo cual se ve reflejado en la reducción del crecimiento de los árboles. Monroy (1981) en una plantación de *Pinus radiata* de cuatro años establecida en suelo rojo arcilloso compactado en Valdivia, cuantificó que la altura de los árboles disminuyó un 30% respecto al crecimiento en áreas no alteradas. Igualmente, Gayoso e Iroumé (1995) señalan tras un resumen bibliográfico que en plantaciones de *Pinus radiata* se han medido disminuciones en el crecimiento de la altura de los árboles entre 20% y 50%. Cárcamo (2006) estimó la pérdida de volumen en una plantación de *Pinus radiata* en Valdivia establecida en un suelo rojo arcilloso, con una compactación de 60 cm de profundidad con una mayor intensidad entre los 15 y 45 cm de profundidad, y la disminución del volumen cosechable (aprovechable) entre 35 y 42%, en comparación con la rotación anterior.

Existen modificaciones a las maquinarias para disminuir los impactos al suelo, los cuales aumentan la flotación o tracción. Una de estas modificaciones es el inflado de neumáticos centralizado, el cual permite al conductor de la maquinaria cambiar automáticamente y en movimiento la presión de inflado de los neumáticos (Neuenschwander 2001). Esta tecnología permite adecuar la maquinaria para aumentar la superficie de contacto y reducir la presión de los neumáticos sobre el suelo, lo que se traduce en una disminución en la profundidad de la huella, mayor flotación y tracción (Neuenschwander 2001). Por ejemplo, Neri *et al.* (2007) midieron en un suelo podzol en un bosque de Irlanda la profundidad de los surcos tras el paso de cuatro forwarders, disminuyendo la presión de inflado de los neumáticos de 700 mm de ancho; con la presión de inflado de 350 kPa se presentaron surcos de 16 cm y con la presión de inflado de 100 kPa los surcos disminuyeron a 2 cm de profundidad.

Los neumáticos más anchos, los ejes de rodado doble y bogies¹, mejoran la flotación y la movilidad de la maquinaria. El uso de neumáticos más anchos -de alta flotación- y ejes de rodado doble o neumáticos duales, distribuyen uniformemente la presión sobre el suelo, lo cual mejora la absorción de los obstáculos del terreno y reduce la formación de huellas profundas, pero incrementa el ancho de las huellas, es por esto que es recomendable su uso en suelos blandos (Neuenschwander 2001). Respecto a esto, Myhrman (1990) comprobó que con una maquinaria de neumático ancho de 600 a 800 mm de ocho ruedas y un peso de 22 toneladas se consigue reducir a la mitad la profundidad de los surcos.

El bogie es un sistema de eje con dos ruedas en tándem, generalmente de menor diámetro que el resto de las ruedas del tren de rodado, con ejes independientes, montados sobre un marco y eje en balancín, esto permite aumentar la superficie de contacto y disminuye la presión estática del peso². Además, el balancín otorga una mayor adaptabilidad a las irregularidades del terreno, reduciendo el levantamiento vertical de la maquinaria, lo que incrementa la tracción. Para mejorar la tracción se agregan bandas metálicas o cadenas, lo que incrementa la tracción hasta en un 40% y protege el neumático (Neuenschwander 2001, Bygdén *et al.* 2004).

En las máquinas con tren de rodado en orugas, el peso de la máquina y su carga se distribuyen en las orugas metálicas, obteniéndose una menor presión por unidad de superficie, mayor flotación y tracción. El ancho de las orugas varía entre 46 y 91 cm y el largo va de 2,4 a 4,3 metros en cada lado. Las orugas más angostas transmiten mayor presión sobre el suelo, por lo que las anchas la reducen, pero son menos maniobrables (Neuenschwander 2001). En Suecia, Jansson y Johansson (1998) compararon la compactación de un suelo franco limoso tras el tráfico de una maquinaria con ruedas (20,1 toneladas) y otra con orugas (19,9 toneladas), obtuvieron que la maquinaria con ruedas presentó una compactación de 15 cm de profundidad tras seis pasadas, mientras que la maquinaria con orugas presentó un menor impacto sobre el suelo, una compactación de 10 cm incluso después de ocho pasadas.

2.3 Prácticas preventivas o mitigatorias

La cosecha forestal genera impactos permanentes en el suelo que pueden causar una merma de la productividad del sitio, y la consecuente reducción del crecimiento de las plantas con implicancias biológicas, económicas y sociales. Las alteraciones producidas por la maquinaria de madereo terrestre

¹ Conjunto de dos o tres pares de ruedas articuladas para facilitar su adaptación a las curvas.

² Presión que indica un dispositivo de medida moviéndose con el fluido o un dispositivo de medida que no introduce cambios de velocidad en el fluido.

no se pueden eliminar, solo se pueden reducir a través de medidas preventivas y mitigatorias (Gayoso 2003). Como medida preventiva se recomienda planificar la ubicación de las vías de saca, con el fin de reducir y concentrar el tráfico a lo largo de vías principales, evitando transitar a través de suelos frágiles y zonas de protección, y, siempre que sea posible, usar las vías de saca ya existentes, a menos que usarlas provoque problemas más graves que realizar un nuevo trazado (Upfold y Ackerman 2014; Weaver *et al.* 2014).

Algunas de las medidas preventivas son: adecuar la temporada de cosecha priorizando la temporada estival, seleccionar maquinaria adecuada en función de la pendiente del terreno y las condiciones de humedad del suelo, preferir neumáticos y zapatas³ de mayor ancho, mayor flotabilidad y menor presión de inflado del neumático para transitar sobre suelos húmedos, transitar con las maquinarias sobre los desechos de cosecha y capacitar a los operadores, para evitar que transiten irrestrictamente y generen menores ahuellamientos (Williamson y Nielsen 2000, Neuenschwander 2001, Gayoso y Gayoso 2009, Agherkakli *et al.* 2010, Weaver *et al.* 2014). Por otra parte, algunas medidas mitigatorias y de post cosecha orientadas a restaurar las áreas compactadas consideran medidas mecánicas y biológicas: construcción de quiebres de drenajes, labranzas o subsolados con el fin de restaurar el sistema de poros para facilitar el crecimiento radicular, arrumar desechos sobre las vías de saca para reducir el peligro de erosión, favorecer la infiltración y la actividad de microorganismos, fertilizar, sembrar pasto e incorporar mantillo para favorecer la presencia de materia orgánica en el suelo mineral (Powers *et al.* 2005, Upfold y Ackerman 2014, Weaver *et al.* 2014, FSC 2015).

2.4 Normativa vigente

El documento “Normativa forestal aplicable a la evaluación y fiscalización forestal” (CONAF 2016) de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) contiene los decretos supremos y leyes que regulan la actividad forestal para todo tipo de propietario en Chile. Este documento incluye recomendaciones preventivas de trazado de vías de saca mencionadas anteriormente, como evitar el cruce de zonas de protección de cauces, cuerpos de agua, corredores biológicos, suelos frágiles y evitar trazados perpendiculares a las curvas de nivel. Medidas mitigatorias como subsolados, capas de desechos y construcción de desvíos de agua se encuentran además en el “Estándar para la certificación FSC de plantaciones forestales” (FSC 2011) y el “Manual de operaciones de aprovechamiento en plantaciones

³ Pieza del freno que actúa por fricción sobre el eje o contra las ruedas de la máquina para moderar o impedir su movimiento.

forestales” (FSC 2015) del Forest Stewardship Council (FSC), las cuales deben ser adoptadas por empresas forestales chilenas para obtener la certificación FSC del manejo forestal de las plantaciones. Esto último son solo recomendaciones para certificación y realizar un manejo sustentable, en ningún caso el estado chileno obliga su cumplimiento.

La normativa internacional y nacional hace recomendaciones, las que actualmente se toman en consideración al momento de planificar y trazar las vías de saca en terreno por personal de empresas contratistas. Existen “Manuales de Mejores Prácticas” (Best Management Practices BMP) en distintos países, utilizados para describir las prácticas aceptables que se pueden implementar para proteger la calidad del agua y promover la conservación del suelo durante las actividades forestales. Entre algunos se encuentran las “Mejores prácticas de manejo forestal para la extracción de madera y la preparación de sitios en el este de los Estados Unidos” (Aust y Blinn 2004), las “Directrices para las prácticas de ingeniería forestal en Sudáfrica” (Upfold y Ackerman 2014) y el “Manual de las mejores prácticas forestales” en Chile (Muñoz *et al.* 2008). Si bien la ley no obliga el uso de BMP en sitios forestales, el surgimiento de programas de certificación forestal impulsados por la demanda del mercado ha elevado la conciencia e implementación de BMP’s forestales.

3. DISCUSIÓN

Como el producto del tránsito de maquinaria de maderero terrestre y el arrastre de la carga, se identifican cinco impactos sobre el suelo, los cuales resultan en una merma en la productividad. Los estudios que identifican los impactos más importantes, sus causas y efectos se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Resumen de impactos en el suelo por el tráfico de maquinaria de maderero terrestre.

Impacto	Causas	Efectos	Referencias
Compactación	Peso y velocidad de la maquinaria y la carga, tipo de neumático, número de pasadas y pendientes altas, humedad del suelo, experiencia del operador.	Aumenta la densidad aparente, cantidad de microporos y resistencia mecánica. Disminuye la cantidad de macroporos y volumen de poros total. Perjudica el crecimiento y desarrollo radicular.	Dickerson 1976, Ellies <i>et al.</i> 1993, Williamson y Nielsen 2000, McNabb <i>et al.</i> 2001, Gayoso 2003, Ampoorter <i>et al.</i> 2007, Parker 2007, Gayoso y Gayoso 2009, Han <i>et al.</i>

			2009, Agherkakli <i>et al.</i> 2010.
Erosión	Alto contenido de humedad, pendiente, complejidad de la ladera, ausencia de cobertura vegetal, tipo de madereo, patinaje de los neumáticos y arrastre de trozas.	Modifica el escurrimiento superficial y arrastra sedimentos (nutrientes). Disminuye la capacidad de infiltración. Pérdida de suelo orgánico y mineral.	Iroumé <i>et al.</i> 1989, Gayoso e Iroumé 1995, Murphy <i>et al.</i> 2004, Gayoso y Gayoso 2009.
Remoción y mezcla del estrato orgánico	Número de pasadas, altas pendientes y humedad.	Homogenización de horizontes superficiales o pérdida del horizonte O. Aumento de la densidad aparente, temperatura media y tensión del suelo. Variación de la biomasa microbiana. Disminuye el volumen de poros total.	Tan <i>et al.</i> 2005, Najafi <i>et al.</i> 2009, Laureda <i>et al.</i> 2016.
Ahuellamiento	Peso de la maquinaria y número de pasadas, pendientes altas, tipo de neumático, humedad y propiedades del suelo, experiencia del operador.	Mezcla de horizontes, pérdida de volumen de suelo.	Jansson y Wästerlund 1999, Bygdén <i>et al.</i> 2004, Naghdi <i>et al.</i> 2009, Najaki <i>et al.</i> 2009, Agherkakli <i>et al.</i> 2010.

El 76% de los estudios abordados referentes a este tema son desarrollados a nivel internacional, sin embargo, no son directamente aplicables a Chile, principalmente porque los resultados evidencian que los impactos dependen de las características del sitio, vegetación y tipo de máquina. Los estudios nacionales son en su mayoría revisiones bibliográficas o muestreos poco actualizados, por lo que es un área con potencial para el desarrollo y la investigación forestal nacional.

Una de las potenciales áreas de investigación es el estudio de las propiedades físicas del suelo, las cuales guardan relación con la capacidad que tiene el suelo de brindar distintos usos que son de provecho para el ser humano. Para hacer buen uso, conservación, manejo y recuperación de este recurso es necesario conocer los fundamentos primordiales de las características físicas del suelo (Flores y Alcalá 2010), las cuales, junto a las características química-nutritivas, determinan el nivel de productividad del

sitio, por lo que conocer cuáles son los impactos sufridos en el suelo asociados a un sistema silvícola (Nyland 2002), es útil para tomar medidas preventivas o mitigatorias, a fin de evitar una pérdida en la productividad.

También se requiere actualizar enfoques más integrales de valorización de servicios ambientales para ecosistemas forestales chilenos y que aporten a los modelos de servicios ecosistémicos, donde se incluye la función productiva (Quijas *et al.* 2018).

Consecuentemente, se propone una metodología para medir los impactos al suelo causados por la maquinaria de maderero comúnmente usada en el país. Esta propuesta está pensada en un estudio en condiciones simuladas de maderero con el propósito de controlar las variables que pueden afectar los impactos al suelo como el terreno (ej., pendiente), tamaño de carga, tipo de máquina, y el tráfico (número de pasadas), y así establecer relaciones entre estas variables y la magnitud de los impactos derivados de la gestión de cosecha. Realizar mediciones de impactos al suelo en operaciones activas de cosecha es relativamente complejo, la principal dificultad es la interferencia que las mediciones causan a la normal operación de las máquinas, lo cual lleva a una pérdida de productividad de la operación, y la detallada coordinación necesaria entre operadores de maquinaria y el personal realizando mediciones (Bossi 2007). Esta complejidad es la principal razón por la que existe una falta de estudios de mediciones de impactos al suelo.

3.1 Propuesta metodológica

La propuesta metodológica contempla seis etapas: i) selección del sitio de estudio, ii) trazado de la vía de saca, iii) diseño experimental, iv) mediciones en campo, v) obtención de muestras y mediciones en laboratorio, y vi) calibraciones de laboratorio y análisis estadístico.

3.1.1 Selección del sitio de estudio

Al seleccionar el sitio de estudio se debe evitar áreas con impactos previos y presencia de alteraciones evidentes en la superficie, con una micro topografía muy irregular o con elementos extraños (trozos de madera, corteza, piedras y desechos varios) presentes en el suelo, y si los tiene, será necesario realizar mediciones antes de la operación simulada para establecer una línea base de impactos y así hacer las futuras comparaciones. Los detalles que se deben considerar al seleccionar el sitio son: serie de suelos,

signos de erosión (cárcavas, surcos, desarrollo de pedestales, áreas expuestas de subsuelo, daño a plantas por materiales transportados por el viento, etc.), historial de manejo (descripción del manejo pasado y presente), pendiente y aspectos topográficos del predio (incluyendo micro topografía), localización del lote y de las áreas de muestreo, información climática (precipitaciones y temperaturas promedio altas y bajas para cada mes en un periodo de 10 años) y ubicación de áreas ecológicamente sensibles (lagunas, cauces, zonas húmedas y otros sitios ecológicamente frágiles) (USDA 1999).

Además, se deben seleccionar las variables que causen o expliquen los impactos; i) constantes: el operador, tipo de maquinaria y tipo de suelo, y ii) variables controladas: número de pasadas, pendiente del terreno y estación del año. La propuesta metodológica tiene como componente variable el número de pasadas de la máquina de cosecha, midiendo los impactos acumulados en función del tráfico. En el caso de medir los impactos en varios rangos de pendientes, se repite el diseño en distintos lugares con pendientes distintas, de la misma forma, si se quiere variar la estación del año, se repite el diseño en distintos meses (Jansson y Johansson 1998, Murphy *et al.* 2004, Najafi *et al.* 2009).

3.1.2 Trazado de la vía de saca

La maquinaria de madereo transita a lo largo de las vías de saca durante cada ciclo de madereo. En general, un ciclo de madereo se compone de las siguientes etapas: i) *viaje vacío* desde el punto de carguío (cancha de madereo u orilla de camino) hasta el bosque para recoger la carga (pila de árboles o trozas), ii) *carga* mediante garras o estrobado, iii) *viaje cargado* desde el bosque hasta el punto de carguío, y iv) *descarga*. Iterativamente, las máquinas de madereo transportan todas las pilas de árboles o rollizos desde el bosque al punto de carguío para su procesado y posterior selección y carguío en camiones.

Para evitar la necesidad de contar con múltiples pilas de árboles, se propone trazar una vía de saca en forma de circuito. Existen varios beneficios de este trazado que incluyen: el mismo punto a lo largo del circuito sirve de origen (bosque) y destino (cancha) para los ciclos de madereo, se puede usar la misma carga durante todos los ciclos, se tiene un mayor control de los puntos de carga y descarga, se puede asegurar la misma trayectoria de la máquina de madereo durante los ciclos, y facilita la medición del nivel de tráfico a lo largo de la vía de saca. Consecuentemente, la carga se mantiene en el mismo punto de inicio/destino en el circuito y luego: i) se elige una dirección a lo largo del circuito que simula el viaje vacío (ej., en el mismo sentido de las manecillas del reloj), ii) una vez llegado al punto de inicio/destino, la máquina se da vuelta y toma la carga, iii) luego viaja en la dirección contraria (ej.,

opuesto a las manecillas del reloj) a lo largo del circuito para simular el viaje cargado, y iv) una vez llegado al punto de inicio/destino se descarga y se da vuelta para iniciar el siguiente ciclo.

3.1.3 Diseño experimental

Las mediciones se harán en distintos lugares a lo largo de la vía de saca trazada para obtener repeticiones y medir la variabilidad de impactos en toda el área, con el fin de obtener una muestra bien representativa y que las conclusiones basadas en el estudio sean confiables. La propuesta metodológica contempla que a lo largo de la vía de saca se distribuyan nueve puntos de muestreo, procurando distribuirlos de la forma más homogénea posible (anexo 1). Se propone que la distancia mínima entre puntos de medición sea de 30 m, y al ubicar nueve puntos de muestreo más el punto de inicio/destino, se obtiene un circuito con una longitud de 300 m. Esto basado en que el rango de distancia promedio de madereo de la maquinaria terrestre es de 300 m (Neuenschwander 2001, Rojas 2004).

Las mediciones se realizan en cada punto de muestreo en ciclos de madereo específicos, focalizando las mediciones en las primeras pasadas, porque es cuando más impactos se producen sobre el suelo, y hasta llegar a los 30 ciclos, puesto que posterior a ello los impactos adicionales son mucho menores (Williamson y Nielsen 2000, Gayoso 2003). Se sugiere realizar las mediciones en los ciclos: 0 (control), 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 y 30. Para medir el impacto acumulado en función del tráfico, se deben hacer las mediciones en los mismos lugares después de terminados los ciclos de madereo, que representan distintos números de pasadas cargadas (la pasada descargada se ignora).

3.1.4 Mediciones en campo

En terreno se mide el ahuellamiento, resistencia a la penetración y humedad, en torno a la huella, en cada punto de muestreo y por cada número de pasada seleccionada para la medición (anexo 2).

Ahuellamiento. Se mide el desplazamiento del suelo y el ahuellamiento con una huincha métrica u otro instrumento graduado a lo largo de la sección transversal de la vía de saca cada 25 cm. Se realizan 15 mediciones con una separación de 25 cm en cada punto de muestreo y en cada pasada medida, con un total de 1.620 mediciones (Gayoso y Gayoso, 2010).

Resistencia a la penetración. Se mide con un penetrómetro sobre la huella, para esto, se debe despejar el suelo del material orgánico y hacer la medición cuando el material inorgánico esté a la vista,

luego, se coloca la punta del penetrómetro a menos de un centímetro de la superficie del suelo. Se empuja el instrumento al interior del suelo a una velocidad uniforme y presión constante hasta una profundidad de 20 cm, puesto que corresponde a la capa superficial del suelo que se ve afectada durante el manejo.

Este procedimiento se realiza tres veces con una separación de 10 cm en cada punto de muestreo y en cada pasada medida, con un total de 324 mediciones. Si hay una piedra, tocón u otro elemento en el lugar que corresponde hacer la medición se debe medir en el punto más cercano que se encuentre despejado siguiendo la línea de la huella.

Humedad volumétrica. La humedad superficial se mide con una sonda TDR (Time Domain Reflectometry), para ello se deben enterrar suavemente las barras de la sonda en el suelo. Esta medición se realiza después de medir la resistencia a la penetración y lo más cerca del lugar de medición con penetrómetro, para poder relacionar ambas propiedades. Se realizan tres mediciones con una separación de 10 cm en cada punto de muestreo y en cada pasada medida, con un total de 324 mediciones.

3.1.5 Obtención de muestra y mediciones en laboratorio

Junto con las mediciones en terreno, en cada punto de muestreo se deben obtener tres muestras de suelo sobre la huella cada 10 m (tres muestras de suelo en los nueve puntos de muestro, por cada número de pasadas, lo que resulta en 324 muestras de suelo). Las muestras de suelo se extraen con cilindros de 100 cm³ de tapa hermética a una profundidad de entre 0-10 y 0-15 cm, puesto que esa es la profundidad más afecta para evidenciar cambios por intensidad de uso (anexo 2).

Para extraer los cilindros con las muestras de suelo se debe cavar alrededor del cilindro con una pala alrededor y levantar la muestra con cuidado, evitando pérdidas de suelo. La base de la muestra deber ser plana, siguiendo el nivel de los bordes del cilindro, por lo que se debe remover el exceso de suelo de la muestra con un cuchillo y tapanlo. Si en el procedimiento hubo pérdida de suelo, se debe descartar y tomar otra muestra.

Si las mediciones en laboratorio no se pueden realizar poco después del muestreo o si las muestras van a ser almacenadas por largos períodos con su contenido de humedad de campo, es recomendable inhibir la actividad biológica de las muestras, agregando unas gotas de óxido de propileno, el cual no cambia la viscosidad del agua, tensión superficial del agua, y humectabilidad del suelo, y preservando las muestras en refrigeración a 5° C. Esto porque la actividad biológica puede influir en la conductividad hidráulica, densidad aparente, curva de retención de humedad, incremento en la macroestructura del suelo o decremento en la porosidad del suelo, principalmente (Flores y Alcalá 2010).

Las muestras que se extraen del suelo se pesan con una balanza granataria en laboratorio para obtener el peso húmedo. Luego, se llevan a una estufa industrial para su secado a 105-110 °C, durante 24 a 48 horas o hasta obtener un peso constante, el cual equivale al peso seco de la muestra (Flores y Alcalá 2010, Ferreyra y Sellés 2013, Gómez 2013). Con esta información se estima la humedad gravimétrica, la densidad aparente y la porosidad total (Flores y Alcalá 2010, Ferreyra y Sellés 2013, Gómez 2013).

Humedad gravimétrica. La ecuación para obtener el contenido de humedad gravimétrica es la siguiente (Flores y Alcalá 2010):

$$w = \frac{M_{sh} - M_{ss}}{M_{ss}} \times 100 \quad [1]$$

Donde w es el contenido de humedad gravimétrica, M_{sh} es la masa del suelo húmedo, M_{ss} es la masa del suelo secado en la estufa.

Densidad aparente y real. Se expresa en g cm^{-3} . La densidad aparente (ρ_b) es la relación entre la masa del suelo seco y el volumen total, incluyendo partículas sólidas y poros, representada en la ecuación 2. La densidad real (ρ_r) es la relación entre la masa del suelo seco y el volumen de las partículas sólidas, sin incluir los poros, representado en la ecuación 3 (Flores y Alcalá 2010, Ferreyra y Sellés 2013):

$$\rho_b = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad [2]$$

$$\rho_r = \frac{M_{ss}}{V_s} \quad [3]$$

Donde M_{ss} es la masa de la muestra de suelo seco, V_t es el volumen de la muestra de suelo (100 cm^3), V_s es el volumen de las partículas sólidas.

Porosidad total. La porosidad total (P) corresponde al volumen del suelo que está ocupada por aire o agua y se puede estimar a partir de la densidad aparente y de la densidad real del suelo, ecuación 4 (Ferreyra y Sellés 2013, Gómez 2013).

$$P = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r} \right) \times 100 \quad [4]$$

Donde ρ_b es la densidad aparente del suelo, ρ_r es la densidad real del suelo.

3.1.6 Calibraciones de laboratorio y análisis estadístico

Es necesario realizar mediciones en terreno y en laboratorio, puesto que hay que calibrar las mediciones en terreno, las cuales están sujetas a errores cometidos por el operador dada la imperfección

de sus sentidos y su habilidad, factores ambientales, fallas de los instrumentos o de otro tipo, y desarrollar modelos de regresión para determinar la relación entre distintas variables.

Para analizar la humedad volumétrica obtenida en campo con la humedad gravimétrica obtenida en laboratorio se utilizará la ecuación 5 (Flores y Alcalá 2010) y se estimará un valor de humedad volumétrica en laboratorio que se comparará a través de una correlación lineal con la humedad volumétrica en terreno.

$$\theta = w * \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad [5]$$

Donde θ es la humedad volumétrica, w es la humedad gravimétrica, ρ_b es la densidad aparente del suelo, ρ_w es la densidad del agua (1.000 kg m^{-3}) a presión y temperatura estándar. Además de ello, se aplica una regresión lineal múltiple para determinar la relación entre el número de pasadas de la maquinaria de madereo (variable independiente) y la humedad volumétrica y gravimétrica (variable dependiente). Se aplica un análisis estadístico de correlación lineal y regresión simple y múltiple para determinar la relación entre resistencia a la penetración medida en terreno y densidades y porosidades medidas en el laboratorio (Reyes *et al.* 2014ab). Se evalúa también con un modelo de regresión lineal simple la relación entre el nivel de tráfico en función del número de pasadas (variable independiente) y la resistencia a la penetración (variable dependiente), usada como un indicador de la compactación, y la profundidad de ahuellamiento (Zenner *et al.* 2007).

4. CONCLUSIONES

Los sistemas de cosecha forestal se clasifican en sistemas de madereo terrestre, con cable y aéreos, donde la pendiente determina una categorización más detallada de las maquinarias de madereo empleadas. El uso de maquinaria para la cosecha forestal impacta el suelo, sobre todos los sistemas de cosecha terrestre (manual, animal y mecanizado), donde la maquinaria y la carga generan impactos al suelo.

Los principales impactos en el suelo producto del tráfico de maquinarias de madereo son la compactación, erosión, remoción y mezcla del estrato orgánico, y ahuellamiento, las cuales se ven principalmente influenciadas por el tipo de máquina y carga, número de pasadas, pendiente y humedad del suelo, afectando las propiedades físicas y mecánicas de este recurso. Es por esto por lo que en los últimos años se han desarrollado múltiples tecnologías y accesorios para la maquinaria, con el fin de disminuir los posibles impactos en el suelo.

También han surgido normativas y manuales con sugerencias de prácticas preventivas y mitigatorias, con el objetivo de disminuir los daños ya producidos y, en la medida de lo posible, evitar su aumento a futuro, donde en Chile la principal es la normativa forestal vigente.

Hay muchos estudios internacionales referentes a los impactos al suelo producto del tráfico de maquinarias de maderero, pero los realizados a nivel nacional son más limitados, por ello es necesario hacer más estudios que aporten resultados de impacto al suelo basados en la maquinaria, suelo, clima y bosque con las características para hacerlos extrapolables a las operaciones forestales de distintas zonas del país.

Por tanto, un estudio sobre la base de una operación simulada permite aislar el efecto del tráfico de la maquinaria de maderero y así controlar las variables que influyen en el impacto al suelo durante la cosecha forestal. La propuesta metodológica desarrollada aísla el efecto del tráfico y ofrece una alternativa plausible, en condiciones de operación, para la obtención de múltiples variables (ahuellamiento, resistencia a la penetración, humedad volumétrica y gravimétrica, densidad aparente y real, y porosidad total) para el análisis de los impactos sufridos por el suelo con el tránsito de la maquinaria de maderero. Este tipo de estudio desarrollado a nivel nacional serviría para potenciar un área de investigación, que aún se encuentra en una etapa primaria en Chile.

Además, la información derivada de estudios de este tipo puede ser potencialmente utilizada para el desarrollo de investigación e innovación en ciencia y tecnología, como el desarrollo de herramientas computacionales y softwares para el trazado de vías de saca u otros fines, aplicables en la industria forestal chilena que pueden ayudar en la toma de decisiones, mejorar la productividad, reducir costos y mejorar el desempeño ambiental y social de la cosecha forestal.

5. REFERENCIAS

- Agherkakli B, A Najafi, S Sadegui. 2010. Ground based operation effects on soil disturbance by Steel tracked skidder in a steep slope of forest. *Journal of Forest Science* 56(6):278-284.
- Ampoorter E, R Goris, W Cornelis, K Verheyen. 2007. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management* 241:162-174.
- Aust W, C Blinn. 2004. Forestry best management practices for timber harvesting and site preparation in the eastern United States: An overview of water quality and productivity research during the past 20 years (1982–2002). *Water Air Soil Pollution* 4(1):5-36.

- Bossi P. 2007. Estudio de tiempo y rendimiento en torres de madereo en predio Ranchillo, séptima región. Memoria Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 94 p.
- Bygdén G, L Eliasson, I Wästerlund. 2004. Rut Depth, soil compaction and Rolling resistance when using bogie tracks. *Journal of Terramechanics* 40:179-190.
- Cárcamo V. 2006. Evaluación del crecimiento de *Pinus radiata* en suelos compactados, valdivia. Tesis Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 38 p.
- Carey P, V Sandoval, R Saldivia. 2007. Proyección de los sistemas de cosecha forestal en las plantaciones establecidas en el contorno de la reserva Río Cruces para los próximos diez años. *Bosque* 28(2):173-177.
- Carey P, R Labbé, G Trincado, O Thiers, D Gárate. 2018. Productivity and costs of two low-investment biomass harvesting systems applied in a situation of mixed forest of semi-natural regeneration. *Bosque* 39(3): 419-430.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF, CL). 2013. Guía Básica de buenas prácticas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios. 91 p.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF, CL). 2016. Normativa Forestal aplicable a la evaluación y fiscalización forestal. 257 p.
- Cuevas J. 2006. Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition* 6(2):13-27.
- Dickerson B. 1976. Soil Compaction After Tree-Length Skidding in Northern Mississippi. *Soil Science Society of American Journal* 40(6):965-966.
- Ellies A, C Ramírez, H Figueroa. 1993. Modificaciones estructurales de un suelo sometido a distintos usos forestales. *Bosque* 14(2):25-30.
- Ellies A. 1995. Efectos del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque* 16(2):101-110.
- Ferreira R, G Sellés. 2013. Manual de riego para especies frutales: uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 319 p. (Boletín INIA N° 278).
- Flores L, J Alcalá. 2010. Manual de Procedimientos Analíticos. Ciudad de México, México. Universidad Nacional Autónoma de México. 56 p.
- Forest Stewardship Council (FSC, DE). 2011. Estándar para la certificación FSC de plantaciones forestales. 44 p.

- Forest Stewardship Council (FSC, DE). 2015. Manual de operaciones de aprovechamiento en plantaciones forestales. 77 p.
- Gayoso J, A Iroumé. 1991. Compaction and soil disturbances from logging in Southern Chile. *Annals of Forest Science* 48:63-71.
- Gayoso J, A Iroumé. 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque* 16(2): 3-12.
- Gayoso P. 2003. Evaluación del impacto en el suelo de un equipo de madereo en un rodal de *Pinus radiata* D.Don. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile. 84 p.
- Gayoso J, S Gayoso. 2009. Vías de saca: Extracción forestal en plantaciones bajo restricciones ambientales. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 100 p.
- Gayoso J, S Gayoso. 2010. Protocolo para la medición de cambios físicos en el suelo generados por operaciones de cosecha forestal. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 57 p.
- Gómez J. 2013. Manual de Prácticas de Campo y del Laboratorio de Suelos. Espinal, Colombia. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). 100 p.
- Han S.-K, H.-S Han, S Page-Dumroese, L Johnson. 2009. Soil compaction associated with cut-to-length and whole-tree harvesting of a coniferous forest. *Canadian Journal of Forest Research* 39:976-989.
- Instituto Forestal (INFOR, CL). 2018. Anuario Forestal 2018. Santiago, Chile. 177 p. (Boletín Estadístico N° 163).
- Iroumé A, J Gayoso, L Infante. 1989. Erosión hídrica y alteración del sitio en cosecha a tala rasa. *Rev. Ecol. Biol. Soil* 26(2):171-180.
- Jansson K, J Johansson. 1998. Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden. *Forestry* 71(1):57-66.
- Jansson K, I Wästerlund. 1999. Effect of traffic by lightweight forest machinery on the growth of young *Picea abies* trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14(6):581-588.
- Kolka P, M Smidt. 2004. Effects of forest road amelioration techniques on soil bulk density, surface runoff, sediment transport, soil moisture and seedling growth. *Forest Ecology and Management* 202:313-323.
- Laureda D, G Botta, A Becerra, H Rosatto. 2016. Compactación del suelo inducida por la maquinaria en campos de polo en Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO* 48(1):79-99.

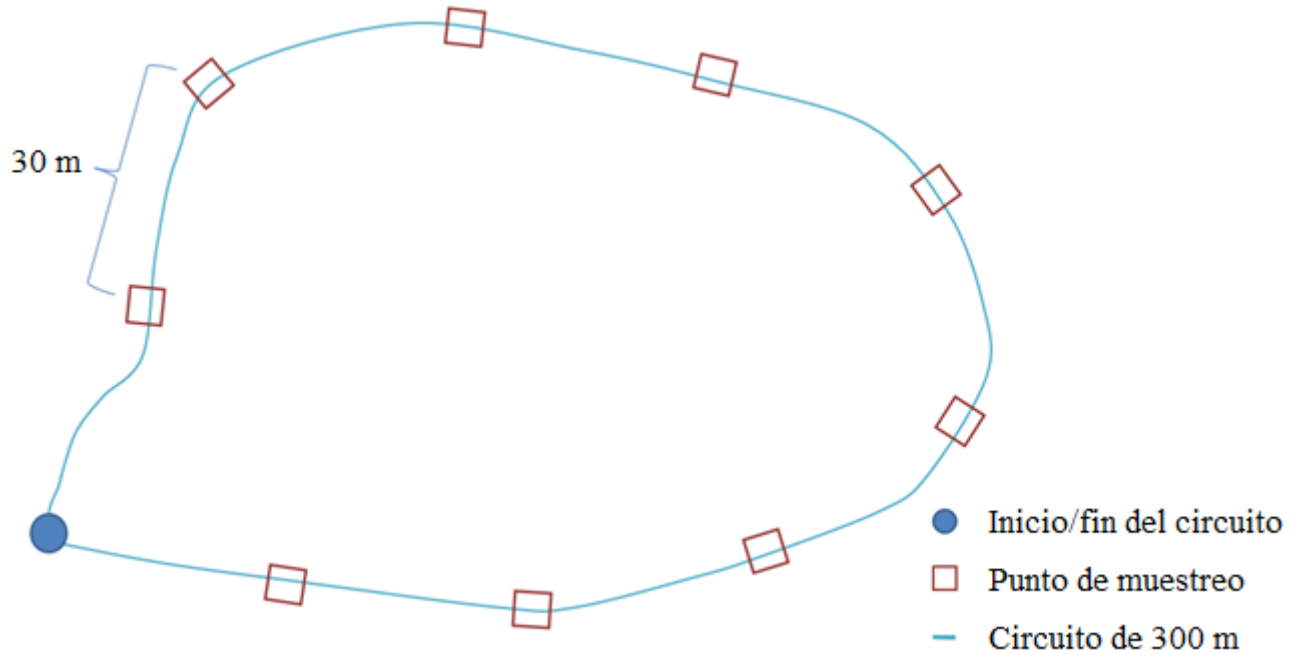
- McNabb D, A Startsev, H Nguyen. 2001. Soil Wetness and Traffic Level Effects on Bulk Density and Air-Filled Porosity of Compacted Boreal Forest Soils. *Soil Science Society of American Journal* 65:1238-1247.
- Monroy M. 1981. Cambios físico-mecánicos de los suelos de textura fina por efecto de madereo con tracción animal y mecanizada. Tesis Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 126 p.
- Muñoz F, M Espinosa, P Real, A Pauchard, J García, D González, R Vidal. 2008. Manual de las mejores prácticas forestales. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. 27 p.
- Murphy G, J Firth, M Skinner. 2004. Long-term impacts of forest Harvesting related soil disturbance on log product yields and economic potential in a New Zealand forest. *Silva Fennica* 38(3):279-289.
- Myhrman D. 1990. Factors influencing rut formation from forestry machines. In: Proceedings of the 10th International Conference of the International Society for Rottain-Vehicle Systems 2. Kobe, Japón. 467-476 pp.
- Naghdi R, I Bagheri, M Lotfalian, B Setodeh. 2009. Rutting and soil displacement caused by 450C Timber Jack wheeled skidder (Amsalem forest northern Iran). *Journal of Forest Science* 55(4):177-183.
- Najafi, A., Solgi, A., Sadeghi, S.H., 2009. Soil disturbance following four wheel rubber skidder logging on the steep trail in the north mountainous forest of Iran. *Soil and Tillage Research* 103, 165–169.
- Neri F, R Spinelli, J Lyons. 2007. Ground pressure forwarder trials: assess benefits in reducing wheel rutting. In 40th International Symposium on Forestry Mechanization: “Meeting the Needs of Tomorrows Forests – New Developments in Forest Engineering”, Octubre 7-11, 2007 in Vienna y Heiligenkreuz, Austria. 10 p.
- Neuenschwander R. 2001. Maquinaria de Explotación Forestal: Métodos, Máquinas, Costos. Talca, Chile. Universidad de Talca. 150 p.
- Nissen J, C Quiroz, O Seguel, R Mac Donald, A Ellies. 2005. Variación del potencial mátrico durante el movimiento de agua en Andisoles. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 5(2):9-18.
- Nissen J, C Quiroz, O Seguel, R Mac Donald, A Ellies. 2006. Flujo Hídrico no Saturado en Andisoles. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 6(1):9-19.
- Nyland RD. 2002. Silviculture: Concepts and Applications. Illinois, United States. Waveland Press Inc. 682 p.
- Orozco L, C Brumér, D Quirós. 2006. Aprovechamiento de impacto reducido en bosques latifoliados húmedos tropicales. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 442 p.

- Parker R. 2007. Monitoring soil strength conditions resulting from mechanical Harvesting in volcanic ash soils of Central Oregon. *Western Journal of Applied Forestry* 22(4):261-268.
- Payahuala M, J Dörner. 2009. Determinación de la capacidad de soporte de un Andisol (*Duric hapludand*) por medio de dos métodos gráficos. *Agro Sur* 37(3):220-231.
- Pinard M, F Putz, J Tay, T Sullivan. 1995. Creating Timber Harvest Guidelines for a Reduced-Impact Logging Project in Malaysia. *Journal of Forestry* 93(10):41-45.
- Powers R, D Andrew, F Sánchez, R Voldseth, D Page-Dumroese, J Elioff, D Stone. 2005. The North American long-term soil productivity experiment: Findings from the first decade of research. *Forest Ecology and Management* 220(1-3):31-50.
- Quijas S, A Boit, K Thonicke, G Murray-Tortarolo, T Mwampamba, M Skutsch, M Simoes, N Ascarrunz, M Peña-Claros, L Jones, E Arets, VJ Jaramillo, E Lazos, M Toledo, LG Martorano, R Ferraz, P Balvanera. 2018. Modelling carbon stock and carbon sequestration ecosystem services for policy design: a comprehensive approach using a dynamic vegetation model. *Ecosystems and People* 15(1):42-60.
- Rab M. 1996. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the *Eucalyptus regnans* forest of southeastern Australia. *Forest Ecology and Management* 84:159-176.
- Reisinger T, G Simmons, P Pope. 1988. The impact of timber Harvesting on soil properties and seedling growth in the south. *Southern Journal of Applied Forestry* 12(1):58-67.
- Reyes J, O Thiers, V Gerding. 2014a. Characterization of soil properties of *Nothofagus* spp. forest with and without scarification in the Andean region of Southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 14(1):101-113.
- Reyes J, O Thiers, V Gerding, P Donoso. 2014b. Effect of scarification on soil change and establishment of an artificial forest regeneration under *Nothofagus* spp. in Southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 14(1):115-127.
- Rojas J. 2004. Cambios en la localización de caminos y determinación de los costos totales de cosecha. Tesis Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Talca, Chile. 56 p.
- Tan X, S Chang, R Kabzems. 2005. Effects of soil compaction and forest floor removal on soil microbial properties and N transformations in a boreal forest long-term soil productivity study. *Forest Ecology and Management* 217:158-170.
- Upfold S, S Ackerman. 2014. Guidelines for forest engineering practices in South Africa. 106 p.
- United States Department of Agriculture (USDA, US). 1999. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Washington DC, Estados Unidos. 82 p.

- Wang J, ST Grushecky, J McNeel. 2005. Production analysis of helicopter logging in West Virginia: A preliminary case study. *Forest Products Journal* (12):71-76.
- Williamson J, W Nielsen. 2000. The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. *Canadian Journal of Forest Research* 30:1196-1205.
- Weaver W, E Weppner, D Hagans. 2014. Manual de caminos forestales y rurales: Una guía para planificar, diseñar, construir, reconstruir, mejorar, mantener y cerrar caminos forestales. Arcata, Estados Unidos. Pacific Watershed Associates. 416 p.
- Zenner E, J Fauskee, A Berger, K Puettmann. 2007. Impacts of skidding traffic intensity on soil disturbance, soil recovery, and aspen regeneration in North Central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry* 24(3):177-183.
- Zenner E, A Berger. 2008. Influence of skidder traffic and canopy removal intensities on the ground flora in a clearcut-with-reserves northern hardwood stand in Minnesota, USA. *Forest Ecology and Management* 256:1785-1794.

ANEXOS

Anexo 1: Diseño experimental de circuito controlado de 300 m para análisis de tránsito de maquinaria de cosecha.



Anexo 2: Método de medición de las variables del suelo en cada punto de muestreo, derivado del tránsito de maquinaria forestal en un sitio determinado.

