UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA EXTRACCIÓN DE MADERA SOBRE LA COMPACTACIÓN DE SUELO

por

Valeria Graciela CAZZOLA MALANGA

Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO

URUGUAY

2023

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a: _____

Ing. Agr. MSc. Gonzalo García

Tribunal: _____

Ing. Agr. MSc. Gonzalo García

_____

Ing. Agr. MSc. Andrés Baietto

_____

Ing. Agr. Félix Varela

Fecha: 15 de agosto de 2023

Estudiante: _____

Valeria Graciela Cazzola Malanga

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a UPM, Forestal Oriental por brindar el sitio y maquinaria para el experimento. En especial a Nelson Küh por su ayuda y apoyo en el campo.

A PONSSE Uruguay, por contribuir con la logística posterior del desarrollo del trabajo y a todas las personas que trabajan allí por recibirme tan amablemente. En especial agradecer a su gerente Martin Toledo y al equipo de Training entre ellos Ignacio, Diego y Santiago.

Substancialmente agradecer a mi casa de estudios, Facultad de Agronomía, por brindarme un lugar para crecer profesional y personalmente. Por todas las oportunidades, experiencias, educación, amigos y hermosos momentos en un lugar tan cálido como lo es nuestra Facultad. A todos los docentes y compañeros que contribuyeron a que hoy sea quien soy. Agradecer y destacar a Allison Silvera por su ayuda en los diseños gráficos. Andrés Baietto por su apoyo en estadística y laboratorio. Alejandro Olivera por sus recomendaciones prácticas y teóricas.

Mi mayor afecto y agradecimiento a mi tutor, Gonzalo García quién es un referente para mí. Gracias por su apoyo y dedicación a lo largo de este proceso, y todas las oportunidades brindadas.

Por último, a mis más cercanos amigos y familia por su apoyo incondicional a lo largo de los años. En especial a mi mejor amiga Pamela, mis padres y mi hermano, quienes siempre me alentaron y acompañaron en este proceso.

Gracias a todos los que hicieron posible mi camino hasta este día. Y a los que ya no están, dedicándole este trabajo a mis abuelos, Clara y Juan.

TABLA DE CONTENIDO

Página No.

PÁGINA DE APROBACIÓN 2
AGRADECIMIENTOS 3
RESUMEN 7
ABSTRACT 8
1. INTRODUCCIÓN 9
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 12
2.1 COSECHA FORESTAL 12
2.2 MÉTODOS DE COSECHA 13
2.2.1 Sistema de corte a medida 13
2.2.2 Sistema de fuste entero 14
2.2.3 Sistema de árbol entero 15
2.3 COSECHA MECANIZADA 16
2.4 MAQUINARIA 17
2.4.1 Forwarder 17
2.5 ANTECEDENTES DE COMPACTACIÓN POR MAQUINARIA 19
2.5.1 Variables afectadas 20
2.5.5.1 Porosidad 21
2.5.1.2 Densidad Aparente 21
2.5.1.3 Resistencia a la penetración 22
2.5.1.4 Velocidad de infiltración 22
2.5.2 Efecto en el suelo 24
2.5.3 Aspectos operativos en extracción de madera que pueden afectar las propiedades del suelo 25
2.5.3.1 Aspectos del suelo 26
2.5.3.2 Carga dinámica según terreno 27
2.5.3.3 Frecuencia de pasadas 28
3. MATERIALES Y MÉTODOS 29
3.1 Descripción del sitio 29
3.1.1 Suelo 29
3.1.1.1 Descripción del perfil 29
3.1.1.2 Análisis fisicoquímico 30
3.1.2 Clima 31
3.2 Descripción del monte 32
3.3 Evaluación de resistencia a la penetración 32
3.3.1 Descripción del ensayo 32
3.3.1.1 Maquinaria utilizada 33

3.1.1.2 Presión teórica sobre el suelo 35
3.1.1.3 Mediciones 36
3.1.2 Corrección de humedad y Modificación del método de corrección estadístico para RP 38
3.1.3 Análisis estadístico 39
3.1.3.1 Modelo de ajuste y estandarización de RP y DRP 39
3.1.3.2 Modelo estadístico 39
4. RESULTADOS 41
4.1 CORRECCION DE RP POR CONTENIDO DE HUMEDAD 41
4.1.1 Modelos de corrección 41
4.1.2 Dispersión de registros corregidos y sin corregir 42
4.2 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN 43
4.2.1 Nivel de carga 43
4.2.2 Número de pasadas 46
4.3 CONFIGURACIÓN Y OPERATIVA DE LOS FW 46
5. DISCUSIÓN 48
5.1 CORRECCION POR HUMEDAD 48
5.2 NIVEL DE CARGA 49
5.3 PASADAS 50
5.4 CONFIGURACION Y OPERATIVA DE LOS FW 52
5.4.1 Configuración estructural de los FW 52
5.4.2 Comparación de FW con las distintas variables evaluadas 53
5.5 EFECTO EN EL SUELO 54
5.6 PRESPECTIVAS A FUTURO 55
6. CONCLUSIÓN 57
7. BIBLIOGRAFÍA 58
8. ANEXO 68

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Tabla No. Página

1. *Tipos de autocargadores o FW y sus características principales* *18*
2. *Análisis fisicoquímico de los horizontes del suelo* *31*
3. *Especificaciones de los FW utilizados, modelos originales de PONSSE*..... *33*
4. *Especificaciones de los FW utilizados durante el ensayo*..... *33*
5. *Dimensiones de la caja de carga y peso estimado para cada FW al momento del ensayo* *35*
6. *Presión teórica sobre el suelo de cada FW en kgf/cm² y kPa*..... *36*
7. *Promedio de RP sin corregir y corregida para todos los tratamientos* *45*
8. *Comparación de FW con las distintas variables evaluadas*..... *47*

Figura No. Página

1. *Evolución de la superficie forestada en Uruguay*..... *10*
2. *Evolución de la extracción de madera en Uruguay* *10*
3. *Sistema Corte a Medida (CTL)*..... *14*
4. *Sistema Fuste Entero (TL)* *15*
5. *Sistema Árbol Entero (FT)* *16*
6. *Efecto de las ruedas y bandas en la presión del suelo*..... *27*
7. *Carga dinámica según terreno*..... *28*
8. *Ubicación geográfica del predio "Mafalda"*..... *29*
9. *Perfil de suelo*..... *30*
10. *Monte en pie, cuadro B226 de Eucalyptus dunnii*..... *32*
11. *Forwarders utilizados: Buffalo King (A), Elephant King (B) y Mammoth (C)* . *34*
12. *Dimensiones de la caja de carga de un FW*..... *35*
13. *Penetrómetro modelo penetroLOG PLG2040 (Falker, RS, Brasil)* *37*
14. *Muestreador de suelos*..... *37*
15. *Esquema del proceso de mediciones*..... *38*
16. *Modelo gráfico de RP y contenido de humedad*..... *41*
17. *Modelo gráfico de DRP y contenido de humedad* *42*
18. *Diagrama de dispersión comparativa de los registros de RP y RPC* *43*
19. *RP para el tratamiento control y el promedio de los tratamientos con carga* *44*
20. *RP para las distintas cargas evaluadas* *45*
21. *RP según número de pasadas para todas las máquinas evaluadas* *46*
22. *Compactación de restos por pasaje del FW.*..... *53*

RESUMEN

La cosecha es la etapa del ciclo productivo del sistema forestal que mayores impactos ocasiona al suelo, siendo específicamente relevante durante la etapa de transporte primario o extracción de madera. Este trabajo tuvo como objetivo general evaluar la compactación de suelo generada por la extracción de madera. Los objetivos específicos fueron los siguientes: (i) evaluar la compactación provocada por el tránsito de tres Forwarders (FW) con distinta capacidad de carga de madera y presión sobre el suelo, (ii) evaluar el efecto de sucesivas pasadas de los mismos. El ensayo se localizó a 26 kilómetros al norte de la localidad de Nuevo Berlín, departamento de Rio Negro, Uruguay, en un predio perteneciente a la empresa UPM, Forestal Oriental. Se consideró un rodal objetivo de *Eucalyptus dunnii* de 8 años de edad y 0,24 m^3/árb, cosechado bajo el sistema *Cut To Length* (CTL). Se evaluaron tres FW con capacidades de extracción de madera de 18, 20 y 25 toneladas y por lo tanto generando diferentes presiones en el suelo. Se evaluó la resistencia a la penetración (RP) corregida por el contenido gravimétrico de humedad del suelo para las tres cargas de FW; para una, dos y tres pasadas de cada uno. Tanto el control como todas las pasadas estuvieron condicionadas por una pasada previa del harvester, al momento de cosecha del rodal. La circulación de los FW se realizó sobre un suelo susceptible a compactación con baja cantidad de residuos de cosecha y con escasa humedad, condición causada por un previo incendio del rodal. La evaluación fue realizada inmediatamente luego del pasaje de los FW. Los resultados obtenidos demuestran que existen diferencias significativas entre los FW y su capacidad de carga, caracterizados por la obtención de mayores valores de RP a mayores presiones sobre el suelo. No obstante, no se verificaron diferencias significativas entre el número pasadas, sin importar su magnitud y carga.

Palabras Clave: Cosecha Forestal, forwarder, compactación de suelo, resistencia a la penetración

ABSTRACT

Forest logging is the stage of the production cycle in the forest system that causes the greatest impact on the soil, being specifically relevant during primary transport or timber extraction. The general objective of this study was to assess the soil compaction generated by the timber extraction. On the other hand, the specific objectives involved the following: (i) to assess the compaction produced by the traffic of three forwarders (FW) with different wood load capacity and pressure on the soil, and (ii) to assess the effect of consecutive passes of the mentioned machines. The experimental site was set up 26 kilometres away from the north of Nuevo Berlín, Río Negro department, Uruguay, in field belonging to UPM, Forestal Oriental company. An 8-years-old *Eucalyptus dunnii* stand and 0,24 m3/tree were considered, harvested using the Cut To Length system (CTL). Three FW with wood extraction capacities of 18, 20 and 25 tons, respectively, were assessed, thus generating different pressures on the soil. The resistance to penetration (RP) corrected by the gravimetric soil moisture content was evaluated for the three FW loads, for one, two, and three passes of each. Both the control and the passes were subjected to a previous pass of the harvester machine, at the moment of the stand harvesting. The FW traffic was executed on a type of soil vulnerable to compaction, with a low quantity of organic matter as well as low-moisture content, condition caused by a previous forest fire occurred at the stand. The assessment was carried out immediately after the FW passes. The results obtained show the existence of statistically significant differences between the FW and their load capacity, characterized by higher levels of RP when higher pressures are applied on the soil. However, no significant difference was verified between the number of passes, regardless of their magnitude and load.

Keywords: Forest harvesting, forwarder, compaction of soil, penetration resistance

1. INTRODUCCIÓN

La implementación y desarrollo del sector forestal en Uruguay fue impulsado por la Ley forestal N° 15.939, que data del 1987, como marco legal regulatorio de la producción. Los objetivos principales de dicha ley estuvieron orientados hacia la conservación de los bosques nativos y la ampliación de los recursos forestales del país para un posterior desarrollo industrial.

De acuerdo con la Sociedad de Productores Forestales (SPF, 2022), actualmente los bosques ocupan una superficie de 2 millones de hectáreas (ha), de los cuales el 60% corresponden a plantaciones comerciales, representando más del 6% de la superficie del territorio nacional. El Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP, 2021) establece que actualmente 1.087.109 ha efectivas son ocupadas por plantaciones comerciales.

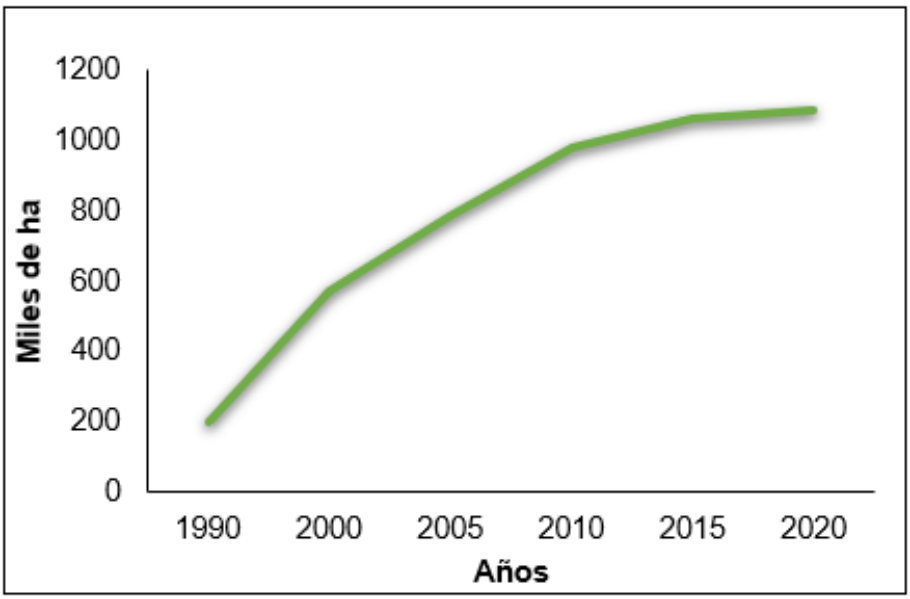
En 2021 el sector se convirtió en el segundo complejo exportador del país, registrando más de 2 mil millones de dólares, luego de alcanzar su valor récord en 2018 con 2.187 millones de dólares (Uruguay XXI, 2021). De esta manera, el sector forestal se ubicó como el mayor exportador en volumen, aportando 3,8% al PBI nacional según SPF (2022).

El crecimiento del área forestada en Uruguay tuvo un aumento de un millón de hectáreas en 30 años, desde la promulgación de la Ley Forestal (Figura 1). Este crecimiento sostenido del sector derivó en el aumento del flujo de operaciones forestales, con una incorporación creciente de la mecanización de actividades. Particularmente, la mecanización de la cosecha forestal marco un hito en la producción nacional. La maquinaria para esta tarea llegó a mediados de 2008, cuando se comenzaba a cosechar y extraer las superficies plantadas (Figura 2) luego de la implementación de la ley y permaneciendo en las cosechas de las grandes superficies plantadas posteriormente, lográndose mejoras en el rendimiento del volumen extraído, estándares de calidad de producto, seguridad de los operadores y costos de producción.

Sin embargo, el uso de maquinaria de gran porte y el aumento de sus dimensiones en las últimas décadas junto con el tránsito que deben de realizar al efectuar sus tareas, causa implicancias en la conservación del recurso suelo (Balbuena et al., 2000).

Figura 1

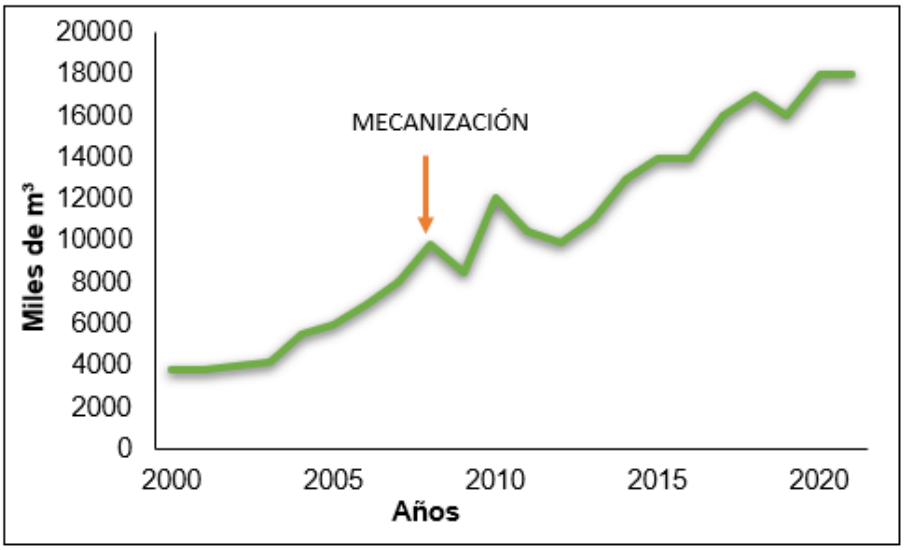
Evolución de la superficie forestada en Uruguay



Nota. Elaborado a partir de datos de Dirección General Forestal (DGF, 2022).

Figura 2

Evolución de la extracción de madera en Uruguay



Nota. Elaborado a partir de datos de Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias (DIEA, 2021).

El suelo es el recurso básico sobre el cual se sustenta toda producción, por ello es importante que se mantengan sus características y propiedades intrínsecas de modo de preservar el nivel de producción (Villa, 1995). En este contexto, la etapa productiva que causa mayor daño al suelo es la extracción de madera debido fundamentalmente a la concentración del tránsito de maquinaria en un corto periodo de tiempo provocando una inmediata alteración (Fuentes,

1993, como se cita en Villa, 1995). De acuerdo con Gayoso e Iroumé (1995), Villa (1995) y Larocca et al. (2017) este uso de maquinaria pesada altera un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. De las mismas, las propiedades físicas son afectadas de forma directa, entre ellas la textura, porosidad y almacenamiento de agua en el suelo. Viéndose afectada la capacidad de soporte y la productividad del suelo. Estos efectos varían según el sitio, y condiciones ambientales en las cuales se efectué las operaciones cosecha forestal (Gayoso & Iroumé, 1995).

La importancia de este estudio radica en la falta de investigación sobre los efectos de las operaciones de cosecha forestal en suelos del Uruguay. Adicionalmente de esta forma se tendrá una primera aproximación de los efectos de la presión que ciertas máquinas ejercen sobre el suelo.

El presente estudio tiene por objetivo general evaluar la compactación de suelo generada por la extracción de madera realizada bajo diferentes presiones ejercidas sobre el suelo. Para ello se analizará el comportamiento del perfil del suelo través de dos variables directamente vinculadas al proceso de compactación: resistencia a la penetración y contenido de humedad.

Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

i. Evaluar los efectos de compactación provocado por el tránsito de tres Forwarders con distinta capacidad de carga de madera y presión sobre el suelo.

ii. Evaluar el efecto en la compactación por sucesivas pasadas de Forwarders.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 COSECHA FORESTAL

Daniluk (2002) define Cosecha Forestal como el conjunto planificado de actividades relacionadas con la corta, procesamiento y extracción de trozas u otras partes aprovechables de los árboles, para su posterior transformación, considerando sus efectos a corto, mediano y largo plazo sobre los recursos naturales. Según Machado (2002), como se cita en Machado De Assis (2010), la Cosecha Forestal se define como el conjunto de actividades realizadas en una masa forestal, con el objetivo de preparar y extraer la madera del corte hasta el lugar de transporte, utilizando técnicas y normas establecidas, con el fin de convertirlo en un producto final. En el mismo sentido, Malinovski y Malinovski (1998), como se cita en Souza y Pires (2009) definen la cosecha forestal como una cadena de producción formada por etapas denominadas actividades parciales, que abarcan desde la tala de los árboles hasta la colocación de la madera en el patio de la industria consumidora. Los autores referidos anteriormente definen las siguientes fases y actividades de las operaciones de cosecha:

i. *Apeo - Procesado:* comprende las actividades de tala, desrame, dimensionamiento, descortezado y trozado de árboles, posterior apilamiento de madera. Estas operaciones pueden ser manuales (hacha o trozador), semi – mecanizadas (motosierra) o mecanizadas (cosechadoras forestales como harvesters y feller – bunchers).

ii. *Extracción o Transporte primario:* fase que comprende el transporte de la madera desde el sitio de corte hasta el borde de camino o cancha de acopio. Esta etapa es realizada de forma suspendida, semi – suspendida o por arrastre.

iii. *Carga:* representa la colocación de la madera extraída en vehículos que la transporten a patios especiales o al sitio de uso final.

iv. *Transporte secundario:* consiste en transportar la madera recolectada del bosque a las plantas de procesamiento.

2.2 MÉTODOS DE COSECHA

El método de cosecha se define por el conjunto de operaciones realizadas para obtener la madera cortada, y su correspondiente transporte según el destino y requerimiento de las industrias. La forma en la que se procesa la madera también es parte del método de cosecha, si es procesada al momento del corte o posteriormente a borde de camino o cancha de acopio.

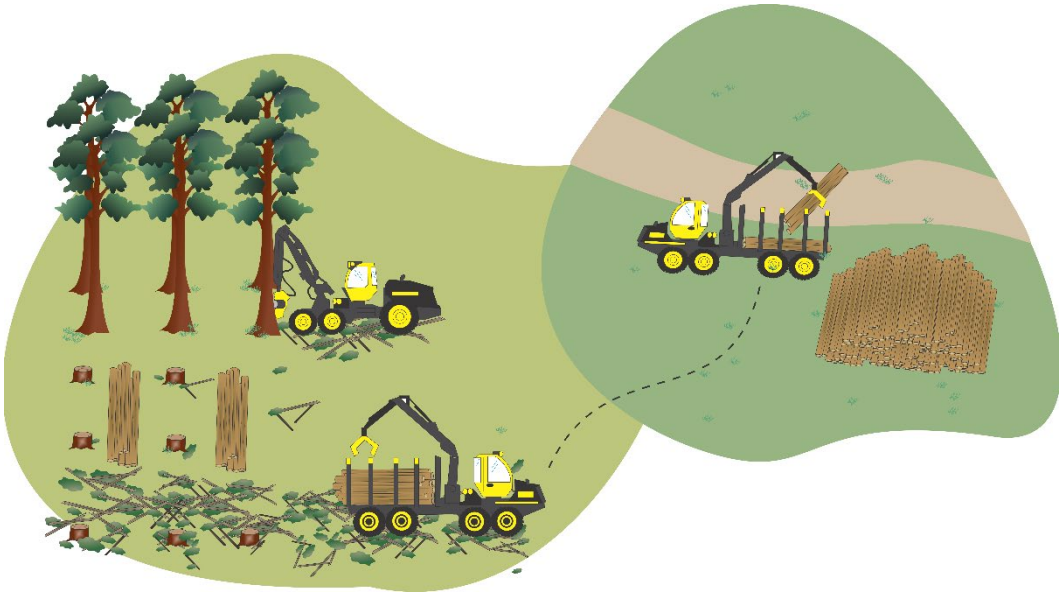
García (2018) establece que el sistema de cosecha se define por la forma en que la madera es entregada a las canchas de acopio, a borde de caminos situados en el interior del bosque o directamente en las plantas de procesamiento. Por otro lado, según Uusitalo (2010), los sistemas de cosecha pueden ser clasificados de acuerdo con cómo se procesa y extraen las trozas del rodal forestal, en conjunto a la combinación de maquinaria utilizada (sistema de cosecha). En base a esto, el autor propone la definición tres sistemas de cosecha forestal principales: corte a medida, fuste entero y árbol entero.

2.2.1 Sistema de corte a medida

El sistema de corte a medida, o más conocido como CTL, por su sigla en inglés (*cut to length*), es un método donde los árboles una vez apeados son procesados y apilados en forma de trozas dentro del rodal forestal para luego ser extraídas a borde de camino o cancha de acopio temporarias (Figura 3). García (2018) señala al sistema de Harvester – Forwarder como el más utilizado en Uruguay. El Harvester (HV) es la maquinaria encargada de la cosecha propiamente dicha: apea y procesa los árboles (desramado, descortezado, dimensionamiento y trozado a medida), realizando un semi apilado de trozas de cada árbol (Uusitalo, 2010). Luego el Forwarder (FW), o tractor forestal autocargador, recoge las pilas de trozas de madera del sitio de cosecha, transportándolas hasta el borde de camino o cancha de acopio temporario, donde posteriormente el trasporte secundario se encargará de suministrarlas a las industrias correspondientes (Ayrala, 2017; García, 2018). Olivera (2016) estima que más del 60% de la madera cosechada en Uruguay se realiza con este método, bajo el esquema HV – FW, la cosecha con destino a pulpa de celulosa cosechada en casi su totalidad bajo el diseño mencionado.

Figura 3

Sistema Corte a Medida (CTL)



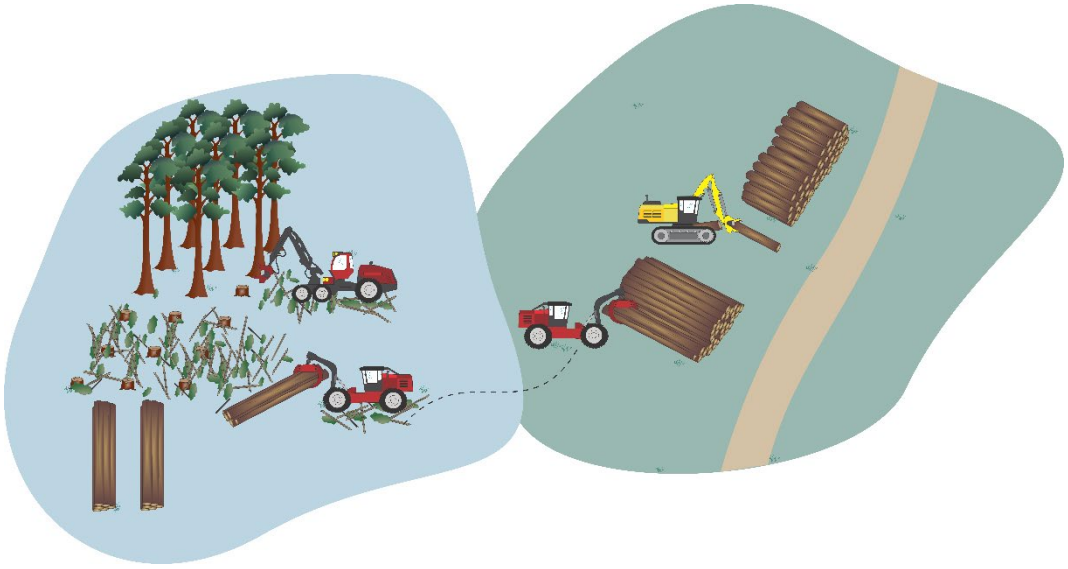
Nota. Elaborado a partir de Castro et al. (2015).

2.2.2 Sistema de fuste entero

El sistema de fuste entero o TL (por sus siglas en inglés derivadas de *tree length),* es un método donde los árboles son apeados y continuamente semi – procesados en el lugar. Posteriormente los fustes se transportan a borde de camino o cancha de acopio para su trozado final (Figura 4). García (2018) establece la secuencia Harvester – Skidder/Clam bunk – Slasher. El primero encargado de apear y semi – procesar los árboles según requerimientos del producto. El transporte primario se realiza por arrastre con Skidder o Clam bunk, y el trozado con un sistema de sierra automatizado llamado Slasher. Este sistema es muy versátil, pudiendo ser utilizado para la obtención de madera para pulpa de celulosa, energía o aserrío.

Figura 4

Sistema Fuste Entero (TL)



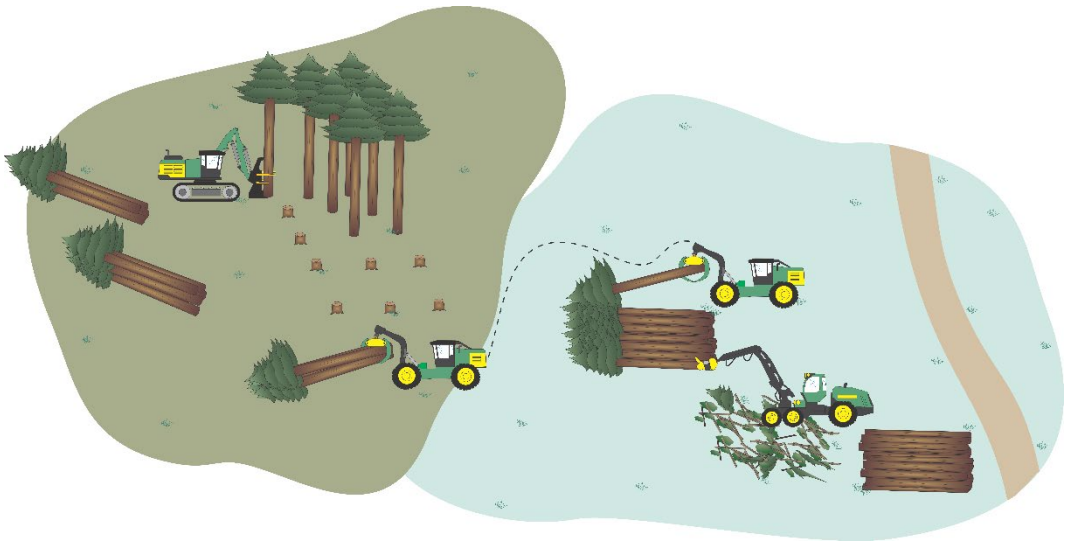
Nota. Elaborado a partir de Castro et al. (2015).

2.2.3 Sistema de árbol entero

El sistema de árbol entero o FT (*full tree* en inglés), según Uusitalo (2010) consiste en la remoción del árbol entero del rodal hacia el borde de camino o cancha de acopio donde será procesado (Figura 5). Se divide en tres etapas principales: apeo (que puede ser manual con motosierra o mecanizado con Feller Buncher), transporte primario mecanizado (Skidder) y procesado (motosierra o con procesador de tipo Slasher o Harvester). Este sistema es más utilizado para madera con destino a la industria del aserrado (García, 2018). Machado De Assis (2010) determina que este sistema es muy utilizado en los casos donde se realice un futuro aprovechamiento de la biomasa remanente en el lugar de procesado de los árboles, dada la alta concentración de nutrientes en los restos vegetales. En contrapartida, el mismo autor establece sistemas de cosecha donde los residuos vuelven al rodal, previniendo así la abrupta exportación de nutrientes.

Figura 5

Sistema Árbol Entero (FT)



Nota. Elaborado a partir de Castro et al. (2015).

2.3 COSECHA MECANIZADA

La cosecha forestal según Da Silva (2012) es una de las actividades que tiene mayor importancia económica en el costo final de producción de la madera. A su vez la productividad operativa varía según factores del sitio, de los árboles y de los operadores (García, 2018). La mecanización de la cosecha ha significado un proceso continuo de mejorías en las condiciones de trabajo, reduciendo los índices de accidentes laborales, así como la regularización del abastecimiento y reducción del costo final de la madera puesta en planta (Da Silva, 2012).

Robert et al. (2018) mencionan que la mecanización en la cosecha forestal refuerza los índices de competitividad del sector, aunque el uso de máquinas en zonas de pendiente sea un desafío técnico y operacional para la ingeniería de equipos futuros. Según Parise (2005), la mecanización de la cosecha forestal genera un conjunto de beneficios para las empresas que operan en el sector. Entre los beneficios mencionados por los autores se destacan la reducción de mano de obra, aumento de la productividad y calidad de productos, así como la posibilidad de operar las 24 horas del día con mayor eficiencia. A su vez, Soares (2010) destaca la mecanización por su rusticidad, y solución frente al aumento de la demanda de madera. Ante estos beneficios, Souza y Pires (2008) establecen que la mecanización de la cosecha forestal permitió a las empresas ofrecer un producto de mayor calidad a menor costo. En función de esto, los autores evidenciaron que la transición del proceso manual o semi – mecanizado hacia uno totalmente mecanizado repercutió en la formación de la mano de obra, alterando significativamente la estructura de costos en función del reemplazo de mano de obra barata y poco calificada por mano de obra especializada.

2.4 MAQUINARIA

La maquinaria empleada en la cosecha forestal se divide a grandes rasgos en dos tipos: maquinaria de corte y de extracción. La primera se encarga de apear los árboles y, en eventuales casos, de su procesamiento o semi – procesamiento según la máquina y el sistema de cosecha empleado. La maquinaria de extracción se encarga de la carga y transporte primario de la madera desde el sitio de cosecha al borde de camino o cancha de acopio, según corresponda, dependiendo de la planificación de la cosecha (G. García, comunicación personal, octubre, 2021).

Dentro de la maquinaria de corte se encuentran el HV y el Feller Buncher (FB). Ambas constan de tres partes principales que varían según el tipo de maquinaria y modelo, siendo el soporte de estas la máquina base (de ruedas o bandas). A continuación, se encuentra la grúa, encargada de sostener el cabezal cosechador. La grúa puede ser telescópica o paralela en el caso del HV, mientras que en el caso del FB el cabezal puede estar montado en la grúa o acoplado a la máquina base. Por último, se encuentra el cabezal cortador, de cuchilla y multifunción en el caso del HV. Para el FB, el cabezal puede variar siendo de cuchilla o de disco, este último teniendo acumulador central o lateral (G. García, comunicación personal, octubre, 2021).

La maquinaria de extracción se la subdivide según la forma en la que transporta la madera, las cuales son: transporte suspendido (FW y tractor agrícola con tráiler y grúa), transporte por arrastre (Skidder y Clam bunk) y transporte por cable (menos utilizado). A continuación, se profundizará en la maquinaria de transporte suspendido, específicamente el FW, ya que tiene especial énfasis en esta investigación.

2.4.1 Forwarder

El FW tiene la función de transportar la madera luego de apearla, desde el interior del rodal hasta el borde de camino o cancha de acopio. Esta actividad es conocida como transporte primario o extracción de madera. El FW es un tractor forestal auto cargable que puede ser de ruedas neumáticas, (con tracción 4x4, 6x6 u 8x8) o de orugas (bandas). Se compone de chasis articulado, grúa hidráulica articulada y telescópica acoplada a una pinza, cuya finalidad es cargar la madera en la caja de carga (Machado De Assis, 2010; Quintana & Barrios, 2014).

Machado De Assis (2010) concuerda con Márquez (2020) estableciendo que el FW es más utilizado en el sistema CTL, en conjunto con el HV. Quintana y Barrios (2014) indican que estos equipos fueron desarrollados para operar en el sistema CTL, teniendo como función el transporte de la madera ya trozada, con un largo de troza de aproximadamente 6 metros.

Los FW se diferencian por varias características, (Malinovski, 2012, como se cita en Quintana & Barrios, 2014) dentro de las cuales se encuentran: el motor,

compartimiento de carga, alcance de la grúa, capacidad de la garra (pinza), transmisión y sistema hidráulico. A su vez estas características deben ser cuidadosamente seleccionadas según el tipo de árboles y bosques en el cual se irá a operar, evitando que el equipo sea utilizado en forma inadecuada.

Actualmente los FW están equipados con transmisión hidrostática – mecánica, lo que permite que la máquina reaccione con agilidad ante los obstáculos que le impone el terreno. Tanto la grúa como la garra son controladas a través de palancas situadas en los reposabrazos del asiento del conductor; el cual a su vez gira 360 grados permitiendo trabajar tanto para adelante como para atrás cómodamente. En algunos modelos de máquinas la cabina también es giratoria, lo que permite mejorar la comodidad del operador en situación de trabajo (Uusitalo, 2010).

La eficiencia del ciclo operativo del FW está influenciada por el desplazamiento tanto cargado como vacío; pero la carga y descarga de las trozas son las etapas más importantes (Lima & Leite, 2002, como se cita en Machado De Assis, 2010). Según Uusitalo (2010) estas etapas consumen aproximadamente 60% del tiempo total, 40% en la etapa de carga y 20% en la descarga.

En la actualidad existen FW de varios tamaños y capacidad de carga, los cuales toleran zonas con pendiente de hasta 40 grados (Machado De Assis, 2010). Pantaenius (2011) indica que los FW extraen entre 8 – 20 m^3 por viaje en distancias de entre 300 – 1000 m. En función de su tamaño, potencia y utilidad según tipo de operación (aclareo o tala rasa), Uusitalo (2010) define cuatro grupos principales de autocargadores o FW (Tabla 1).

Tabla 1

Tipos de autocargadores o FW y sus características principales

Tipo de FW	*Número de ruedas*	*Peso (t)*	*Carga máxima (t)*	*Potencia del motor (HP)*	*Par de elevación de la grúa (kNm)*
FW para aclareo	8	10 – 12	9	120	75
FW de uso múltiple	6 u 8	12 – 16	10 – 12	174	100
FW para tala rasa	8	15 – 20	13 – 17	201	130 – 150
FW para tala rasa pesada	8	20 – 22	18 – 19	268	140 – 160

Nota. Tomado de Uusitalo (2010).

2.5 ANTECEDENTES DE COMPACTACIÓN POR MAQUINARIA

Los suelos según Dominati et al. (2010) son componentes cruciales de los ecosistemas forestales que aseguran la productividad y la conservación de la biodiversidad al regular los ciclos de agua y nutrientes. Según Mayer et al. (2020) la cosecha de árboles generalmente conduce a la reducción de las reservas de carbono del suelo. La cosecha mecanizada y el transporte de trozas mediante FW pueden dañar notablemente los suelos y reducir la productividad forestal (Hartmann et al., 2014; Horn et al., 2007; Picchio et al., 2011).

La cosecha de madera para Reeves (2011) de acuerdo con Missanjo y Kamanga-Thole (2014) puede causar cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reduciendo la productividad del sitio. Determinar qué factores del sitio físico controlan la respuesta del suelo a las actividades de perturbación es complejo. Esta complejidad según Reeves (2011) está relacionada con la heterogeneidad de los sitios de cosecha y a los diferentes métodos de monitoreo de las perturbaciones. Los resultados que obtuvo el autor sugieren que las características específicas del sitio controlan los impactos en el suelo resultantes de las operaciones de cosecha, los cuales deben considerarse para minimizar la perturbación del suelo.

Continuando con Reeves (2011), correlacionar la perturbación perjudicial del suelo con los sistemas de extracción de madera y características del sitio proporciona un método para estimar la susceptibilidad del sitio a las operaciones de cosecha. Varios autores (Cambi et al., 2015; Hartmann et al., 2014; Horn et al., 2007; Vossbrink & Horn, 2004) concuerdan que, aunque la eficiencia y la potencia de la maquinaria forestal ha aumentado en los últimos años, también se han vuelto más pesada. Esto sugiere que la perturbación de los suelos forestales causada por las operaciones de tala puede ser más grave y duradera.

La compactación es la forma más citada de perturbación del suelo resultante de actividades de cosecha debido a su potencial para impactar negativamente el crecimiento de la vegetación (Cochran & Brock, 1985; Geist et al., 1989; Gómez et al., 2002; Parker et al., 2007; Wang et al., 2007; Williamson & Neilsen, 2000). Las operaciones de tala mecanizada provocan tensiones verticales y horizontales al suelo, lo que trae como consecuencia la compactación (Ares et al., 2005; Cambi et al., 2015; McNabb et al., 2001).

Gayoso y Alarcón (1999) definen la compactación como un proceso mecánico que genera un aumento en la densidad del suelo debido a la reorganización de las partículas de este, en respuesta a la aplicación de fuerzas externas ejercidas por el tránsito de maquinaria en diversas labores y específicamente en la extracción de las trozas durante la cosecha. La compactación del suelo es una forma de degradación física que resulta en la densificación y distorsión del suelo donde la porosidad, la actividad biológica y la permeabilidad se ven reducidas, destruyéndose la estructura del suelo (European Soil Data Centre, 2023). Mientras que para la Soil Science Society of America como se cita en Napper et al. (2009) la compactación del suelo es un aumento en

la densidad aparente del suelo y una disminución concomitante en la porosidad del mismo, debido a la aplicación de fuerzas mecánicas al suelo. Se pueden establecer tres niveles y profundidades de compactación: superficial (0 a 10 cm), moderada (hasta 30 cm) y profunda (más de 30 cm).

Smith y Norris (1995), como se cita en Gayoso y Alarcón (1999) establecen que la compactación afecta la proporción superficial del suelo, sección que almacena la mayor proporción de nutrientes y en la cual se desarrollan la mayor parte de las raíces de los suelos. Para Chancellor (1997), como se cita en Botta (2018), el suelo se compacta cuando la proporción del volumen de poros ocupados por aire en relación con el volumen total es inadecuada para permitir el máximo crecimiento de los cultivos. Botta et al. (2002) definen a la compactación superficial como la compactación producida en el horizonte arable, y como compactación subsuperficial a la producida por debajo de la profundidad normal de labranzas. En los suelos forestales la compactación superficial se debe principalmente a la interacción entre las ruedas de la maquinaria y suelo. Algunos de los daños causados por el deslizamiento incluyen la mezcla de componentes de la capa superior del suelo, daño a las raíces y, en casos extremos, podría provocar la ruptura de la capa superior del suelo (Owende et al., 2002).

Cabe destacar que en algunos casos la compactación de suelo no ocurre debido a la aplicación de fuerzas externas, sino que, por el contrario, puede estar relacionada a la inestabilidad del suelo frente a la presencia de agua o a la ocurrencia de alteraciones poslaboreo. Cualquier operación de cosecha o silvicultural que preserve el horizonte superior del suelo y la materia orgánica previene la compactación (Smith, 1991, como se cita en Villa, 1995).

Existen variables que pueden incidir en que el suelo se compacte en mayor o menor medida. Algunas de estas variables son propias del suelo (profundidad, textura, densidad aparente inicial, contenido de materia orgánica y humedad del suelo), asociadas al mismo (topografía y material parental), mientras que otras dependen de la operación que se realice (características de la maquinaria que transita, entre ellas: peso, número de pasadas, tipo de tren de rodaje, entre otros) (Ballard, 2000; Cambi et al., 2015; Han et al., 2009; Jamshidi et al., 2008; Nazari et al., 2020; Wang et al., 2007).

2.5.1 Variables afectadas

Según Matangaran et al. (2019) tanto la operación de cosechadoras como de FW generan cambios en las propiedades del suelo. Los mismos autores indican que las operaciones provocan un aumento de la densidad aparente del suelo, reducen la porosidad total, tasa de infiltración, permeabilidad del suelo, capacidad de retención de agua y cambia la estructura del suelo.

Para Gayoso y Alarcón (1999) el grado de compactación está determinado por factores del suelo como: materia orgánica, textura, estructura y contenido de humedad (CH). Estos autores establecen a la porosidad y la resistencia a la penetración como las variables más importantes en los estudios sobre la compactación del suelo en relación con el enraizamiento. Mientras que las

medidas de densidad aparente, macroporosidad y penetrabilidad son índices indirectos del estado estructural del suelo (Buzó & Ferreira, 2008). Los factores intrínsecos del suelo se ven afectados en conjunto a la fuerza por unidad de superficie aplicada sobre el mismo. Los efectos sobre el suelo varían según la clase, magnitud y número de repeticiones de la perturbación, siendo el CH actual del suelo, el factor más crítico (Gayoso & Alarcón, 1999).

A continuación, se detallan las principales variables del suelo afectadas por las operaciones de cosecha, las cuales son: porosidad, densidad aparente, resistencia a la penetración y velocidad de infiltración.

2.5.5.1 Porosidad

Rucks et al. (2004) definen la porosidad total o espacio poroso del suelo, como el porcentaje del volumen del suelo ocupado por poros, o como la suma de macroporos y microporos presentes en el suelo. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023), los microporos retienen el agua en el suelo, mientras que los macroporos no participan en este proceso, siendo los responsables del drenaje y la aireación del suelo; constituyendo, el principal espacio en el que se desarrollan las raíces.

Las características del espacio poroso dependen de la textura y la estructura del suelo. La porosidad total de suelos se determina a través de sus densidades aparente y real (García Petillo et al., s.f.).

Los suelos arcillosos poseen más porosidad total que los arenosos (Rucks et al., 2004). Missanjo y Kamanga-Thole (2014) indican que los suelos de textura gruesa tienen más proporción de macroporos, porque la disposición de partículas es más desagregada, además de ser de mayor tamaño. En cambio, los mismos autores indican que los suelos de textura fina tienen mayor agregación y más proporción de microporos. Los macroporos según Rucks et al. (2004) en este tipo de suelos se encuentran entre los agregados del suelo. Por ello los autores establecen que los suelos de textura fina tienen tanto macro como microporos, teniendo así generalmente una mayor porosidad total, o suma de todos los poros, que los suelos de textura gruesa. El tamaño de los poros cobra mayor importancia que el volumen de estos, por lo tanto, dos suelos con la misma porosidad total pueden comportarse muy diferentes frente a la presencia de agua y aire (Donoso, 1981).

2.5.1.2 Densidad Aparente

La Densidad aparente (DAp) del suelo es una propiedad que relaciona el peso seco del mismo con respecto al volumen imperturbado que ocupa (Villa, 1995). García Petillo et al. (s.f.) concuerdan con Rucks et al. (2004) indicando que el volumen imperturbado se refiere al que ocupa el suelo sin ser modificado, es decir, manteniendo su porosidad, lo que incluye el volumen de los sólidos y el de los poros. Los mismos autores establecen que la DAp varia principalmente con factores físicos, tales como granulometría, rugosidad, contenido de materia orgánica, estructura, textura, mineralogía y CH del suelo. Los suelos de menor estructura, y por lo tanto más porosos, poseen menor DAp, asimismo esta

característica se correlaciona con mayor contenido de materia orgánica, la cual facilita la granulación de los suelos, haciéndolos más sueltos y porosos (Donoso, 1981; Froehlich & McNabb, 1984; Gayoso & Iroumé, 1991).

Donoso (1981) indica que la DAp de un suelo aumenta con la profundidad, debido al menor contenido de materia orgánica, menor agregación y mayor compactación causada por el peso del propio suelo.

La DAp es un buen indicador de características del suelo, tales como: porosidad, grado de aireación y velocidad o capacidad de infiltración. En suelos forestales el rango de DAp generalmente oscila entre 0,6 a 1,9 g/cm^3 (Donoso, 1981; Froehlich & McNabb, 1984).

Un aumento de la de la DAp, trae consigo una serie de cambios en el suelo. Entre los cuales, Toro (1991), como se cita en Villa (1995), menciona: incremento en la resistencia a la penetración de las raíces, reducción de la tasa de infiltración de agua, alteración del intercambio gaseoso y de la eficiencia del sistema radicular para absorber agua y nutrientes. Este incremento en la variable trae como consecuencia la disminución de la porosidad, con mayor incidencia en el volumen de macroporos (Gayoso & Alarcón, 1999).

2.5.1.3 Resistencia a la penetración

Fuentes (1993), como se cita en Villa (1995), define la resistencia a la penetración (RP) como una fuerza de reacción producto de la introducción de un elemento al suelo. Sus valores dependen de la densidad aparente, del CH y de la estructura y textura del suelo (Rucks et al., 2004).

La resistencia mecánica a la penetración (RMP), es un indicador utilizado para caracterizar los efectos físicos adversos que ofrece el suelo al crecimiento y desarrollo de las raíces (Rucks et al., 2004). Esta variable es útil para describir el estado físico del suelo (Buzó & Ferreira, 2008).

La medida de la RMP se realiza con un instrumento denominado penetrómetro. Las medidas obtenidas con este se toman como índice de la resistencia mecánica o índice de Cono que ofrece el suelo al crecimiento radicular, lo cual depende de la magnitud del espacio poroso grueso, y su rigidez, la que, a su vez, es afectada por el CH del suelo (Rucks et al., 2004).

La resistencia del suelo tiene una dependencia con las variables del suelo, ya que cambian con el estado momentáneo del mismo. Los factores más importantes son la densidad aparente y la humedad (Patrizzi et al., 2003).

2.5.1.4 Velocidad de infiltración

La velocidad de infiltración del suelo o infiltración es definida por Fuentes (1993), como se cita en Villa (1995), como el flujo de agua que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie. Durán et al. (2013) la definen como la velocidad con que el agua pasa del exterior al interior del perfil del suelo, siguiendo los gradientes de potencial gravitacional y de matriz. Una vez colmados los macroporos con agua, la misma es impulsada por gravedad y succionada por los microporos, debido a la atracción capilar siguiendo el potencial de matriz. El proceso de infiltración puede ser afectado, además, por la compactación, los

cambios en la DAp, el contenido de materia orgánica, humedad y porosidad del suelo (Fuentes, 1993, como se cita en Villa, 1995).

La infiltrabilidad en el suelo y su variación en el tiempo depende del CH inicial del suelo, de la succión de este, la textura y de la uniformidad del perfil (Durán et al., 2013). La infiltrabilidad es relativamente alta cuando el suelo se encuentra seco, tendiendo a disminuir a velocidad constante con el tiempo (Fuentes, 1993, como se cita en Villa, 1995). Donoso (1981) concuerda con Fuentes (1993), como se cita en Villa (1995), en que la disminución de la infiltabilidad puede explicarse por el deterioro de la estructura del suelo y el endurecimiento superficial. Este último, es causado fundamentalmente por la expansión de arcillas y compresión del aire en el suelo, lo que genera menor capacidad de infiltración y mayor escurrimiento superficial, lo que se traduce en un aumento del riesgo de erosión (Gayoso & Alarcón, 1999).

En los suelos arenosos la velocidad de infiltración del agua es mayor, aún en zonas con pendientes fuertes (Durán et al., 2013). Por otro lado, los suelos con altos contenidos de materia orgánica se comportan como porosos, aumentando así la infiltración del agua en el mismo (Donoso, 1981).

Smith (1991), como se cita en Villa (1995), establece que la mayoría de los suelos son susceptibles a compactación durante las épocas de lluvias, aumentando directamente con el CH del suelo. Como el agua no puede comprimirse, la compactación de suelos húmedos produce destrucción de los poros de drenaje y de la estructura de este (Donoso, 1981; Gayoso & Alarcón, 1999).

Missanjo y Kamanga-Thole (2014) establecen que la retención de agua aumenta con la compactación del suelo. El suelo compactado retiene más agua que el suelo no compactado, porque la compresión disminuye el volumen de los poros, especialmente en la parte superior del perfil del suelo.

Assan y Gorosito (s.f.) describen el proceso de infiltración a partir del concepto de conductividad hidráulica (propiedad física de los suelos, que describe la capacidad de trasmitir agua, expresada en unidades de velocidad). El valor máximo de velocidad de infiltración coincide con la conducción hidráulica del suelo saturado. Soracco et al. (2005) encontraron una asociación negativa entre valores de DAp y conductividad hidráulica saturada (Ksat). Los autores indican que el comportamiento de la Ksat es muy dependiente del volumen de poros del suelo, y su disminución puede ser atribuida a la disminución del volumen y continuidad de los poros. Existiendo así una correlación negativa (R= 0,80) entre DAp y Ksat.

En general, mientras más bajo sea el CH mayor es la resistencia a la compactación del suelo debido a la mayor fricción de las partículas. La compactación por pasadas de maquinaria es generalmente máxima con contenidos de humedad próximos a capacidad de campo, ya que la estructura del suelo es más susceptible a sufrir cambios (Gayoso & Iroumé, 1991; Smith, 1991, como se cita en Villa, 1995).

2.5.2 Efecto en el suelo

Gómez et al. (2002) determinan que las actividades de cosecha compactan suelos, limitando la profundidad efectiva de enraizamiento de las plantas. Un aumento de la DAp de los suelos forestales debido a la compactación puede reducir la porosidad total entre un 50 y un 60 %. Lo que perturba drásticamente la difusión de oxígeno del suelo y el equilibrio hídrico, provocando anegamiento, escorrentía y erosión (Ampoorter et al., 2007; Frey et al., 2009; Grace et al., 2006; Jansson & Johansson, 1998; Picchio et al., 2012; Schack-Kirchner et al., 2007; Solgi & Najafi, 2014; Startsev & McNabb, 2000; Williamson & Neilsen, 2000). En consecuencia, se reduce la disponibilidad de oxígeno y agua para las raíces de los árboles y los microorganismos del suelo, lo que conduce a perturbaciones en la productividad forestal y los servicios ecosistémicos (Agherkakli et al., 2010; Ares et al., 2005; Kozlowski, 1999).

El proceso de compactación modifica el estado de agregación del suelo y las interacciones entre sus fases sólida, líquida y gaseosa, debidas al incremento de la DAp y de la resistencia mecánica del suelo. Esto afecta la acumulación y el suministro de agua y de aire a través de la disminución de la porosidad, de la tasa de infiltración y de la capacidad de retención hídrica (Bayhan et al., 2002).

Los suelos de textura gruesa suelen ser más resistentes a la compactación en comparación con los suelos de textura fina (Gómez et al., 2002). Esto está relacionado a que generalmente los suelos de textura fina retienen más agua, se compactan en mayor medida, generando que el suelo sea más susceptible (Cambi et al., 2015). Para Nazari et al. (2021) los suelos con mayores contenidos de arcilla después de las actividades de cosecha resultan en DAp más altas y porosidades más bajas, lo inverso ocurre en suelos de textura gruesa.

Los suelos se recuperan de la compactación a diferentes velocidades. La compactación de suelos de textura gruesa puede recuperarse en tan solo un año, mientras que la compactación en suelos de textura fina puede persistir durante décadas y empeorar en cosechas continuas (Geist et al., 1989; Froehlich et al., 1981; Froehlich et al., 1985; Mace, 1971).

Nazari et al. (2021) determinaron que las variables físicas analizadas en su experimento (DAp, porosidad total y Ksat) no recuperaron el nivel normal en un período de 3 a 6 años. Por lo tanto, la alteración de las propiedades físicas puede perturbar la función y la productividad de los ecosistemas forestales, ya que desempeñan un papel importante en el suministro de agua y aire, así como en el ciclo biogeoquímico de los ecosistemas forestales.

Las cosechas repetidas pueden generar compactación acumulativa si no se les da tiempo a los suelos entre rotaciones para que recuperen su estado original (Froehlich et al., 1985).

Las raíces y la fauna del suelo mejoran la compactación moviendo activamente las partículas del suelo aumentando el espacio poroso (Miller et al., 2004). La DAp del suelo generalmente se ve disminuida con la profundidad debido a una mayor resistencia del suelo y una DAp inicial más baja en el perfil del suelo (Carter et al., 2006; Gent et al., 1984; Gómez et al., 2002).

Soto et al. (2014) establecen un umbral de RP en 2000 kPa, por encima del cual hay efectos perjudiciales sobre el crecimiento de las plántulas del género Nothofagus en suelos de los andes chilenos. Por otro lado, Threadgill (1982) indica que valores de 1500 kPa pueden reducir el crecimiento de las raíces, mientras que valores superiores a 2100 kPa lo detendría, no obstante, la capacidad radicular para explorar el suelo depende de la especie vegetal. En relación con ello, Stenitzer (1988), como se cita en Draghi et al. (2015) modelizó el crecimiento de las raíces dependiendo del tipo de raíz. Este autor define los valores que comienzan a ser limitantes varían entre 1000 kPa (raíces de baja resistencia) y 1700 kPa (raíces de alta resistencia), mientras que valores entre 3000 y 4000 kPa detendrían el crecimiento.

Para Missanjo y Kamanga-Thole (2014) la generalización sobre los efectos negativos de la perturbación del suelo relacionada con la cosecha en el crecimiento de los árboles puede ser un error, ya que estos impactos dependen de su gravedad, las propiedades del suelo y las condiciones climáticas. Estos autores indican que el grado de perturbación del suelo entonces, depende de la intensidad de las operaciones en el sitio, el tipo de equipo utilizado, la época del año en que se realiza la cosecha, frecuencia de entrada, cantidad de tala y restos en el sitio, humedad y tipo de suelo.

2.5.3 Aspectos operativos en extracción de madera que pueden afectar las propiedades del suelo

Las operaciones de la maquinaria forestal generalmente impactan sobre los suelos, causando aperturas de capas superficiales o de compactación de este (Matangaran et al., 2019). El uso de maquinaria de extracción por arrastre atenúa las consecuencias en comparación a las de extracción suspendida (Uusitalo, 2010). Matangaran et al. (2019) indican la existencia de una correlación positiva entre la intensidad de las operaciones (frecuencia de pasada y peso de maquinaria) y la intensidad de perturbación al suelo.

Según Daniluk (s.f.), los aspectos operativos de la extracción se clasifican en variables controlables e incontrolables. Estas últimas son el suelo, la topografía, el clima y las características del bosque como calidad de madera, densidad de plantación y volumen por hectárea. Por otro lado, los factores que se pueden y deben controlar, engloban la planificación operativa de la extracción, (dinámica del terreno y circulación de maquinaria) y las características de la maquinaria utilizada (tipo, tamaño y potencia).

En cuanto a las variables controlables, es relevante tener en cuenta las condiciones en que se realizara la cosecha forestal. Para generar menor daño al suelo se priorizan zonas sensibles, evitando circular por vías de drenaje, suspensión de las operaciones cuando el CH del suelo sea tal que se pueda producir compactación, huellas y mezcla de suelo por tráfico de maquinaria. Por otra parte, es preciso destacar que existe la posibilidad de suspender actividades de extracción en temporadas de lluvia, o inclemencias climáticas especialmente en suelos arcillosos (G. García, comunicación personal, octubre, 2021).

El aumento de la pendiente y de la carga de la maquinaria toma importancia en el caso del arrastre longitudinal, lo que se explica por el patinaje de la maquinaria (Gayoso, 1983, como se cita en Villa, 1995). El tránsito pendiente arriba causa mayor compactación que pendiente abajo (Smith, 1991, como se cita en Villa, 1995). En cuanto a la dirección de la extracción, se debe planificar la etapa de corte de modo de generar el menor recorrido posible para reducir los movimientos de la maquinaria (G. García, comunicación personal, octubre, 2021).

Matagaran et al. (2019) mencionan el efecto de las maniobras del FW sobre la compactación del suelo. La presión ejercida de los neumáticos y el contacto con la superficie del suelo pueden provocar la formación de surcos profundos. Los cuales se evidencian en las huellas que deja el FW al transitar por el rodal con carga, mostrando así daños en el suelo debido a las operaciones de maquinaria pesada.

2.5.3.1 Aspectos del suelo

Cuando las condiciones del suelo no sean las óptimas para operar, se genera una disminución de la productividad de la maquinaria (Daniluk, s.f.). Existen dos propiedades a tener en cuenta para determinar si la maquinaria puede operar según las condiciones del suelo, las cuales son el coeficiente de tracción y el poder portante del suelo (G. García, comunicación personal, octubre, 2021).

Daniluk (s.f.) define el coeficiente de tracción de la maquinaria como el grado de tracción o desplazamiento entre el tren de rodado y el suelo. Se determina según el rodado, el tipo de suelo y su CH. La tracción efectiva o capacidad de arrastre disponible antes de que la maquinaria comience a patinar es igual al producto del coeficiente de tracción por el peso de la operación de la máquina, el cual es la sumatoria del peso del equipo y de la carga transportada. Este coeficiente se modifica según el tren de rodado, siendo mayor en maquinaria con bandas en comparación a maquinaria con neumáticos. En cuanto al tipo de suelo existe mayor capacidad de arrastre en suelos arcillosos frente a suelos arenosos.

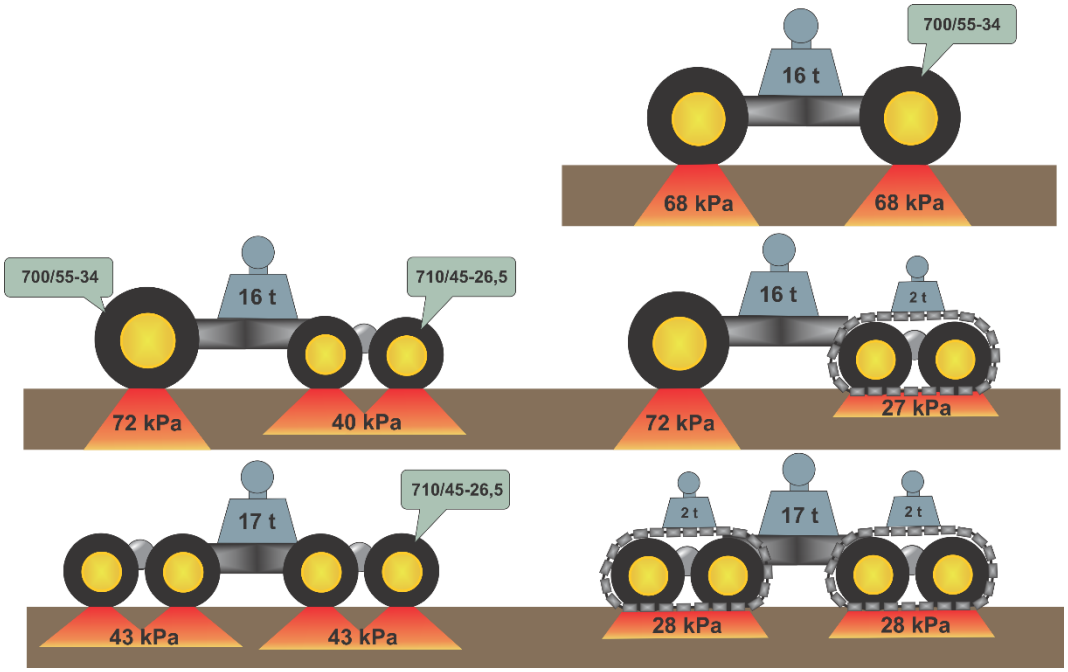
El poder portante del suelo es la capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él; varía según el tipo de suelo y la presión ejercida sobre el mismo (Daniluk, s.f.). Para Revathi (2013) la capacidad portante del suelo se define por la máxima presión de contacto de la rueda permitida. Si el peso aplicado es menor que el poder portante del suelo, este se deformará elásticamente y la maquinaria transitará sin dejar huellas. Si, por el contrario, el poder portante es inferior, el suelo fragmenta su estructura y se compacta hasta un índice portante equivalente a la presión que recibe (Daniluk, s.f.). Dado que la presión de contacto es difícil de determinar con precisión, Revathi (2013) establece que valor de la capacidad portante del terreno solo puede utilizarse como guía. El poder portante dependerá de la textura y CH del suelo, los suelos de texturas finas y con menores contenidos de humedad poseen mayor poder portante, ya que se deforman menos (Daniluk, s.f.).

La presión ejercida en el suelo repercute entonces en la capacidad de tracción o arrastre y en el poder portante del suelo. Lo que se traduce en posibles efectos negativos al suelo, siempre y cuando no se tomen medidas preventivas (Gayoso & Iroumé, 1995). La presión ejercida depende no solo del peso de la maquinaria, sino que también del tipo de tren de rodado (Balbuena et al., 2000). Este puede ser de bandas o de neumáticos de distintas características (tamaño, estructura y diseño de la banda de rodaje de los neumáticos).

Para disminuir la presión ejercida en los suelos se recomienda el uso de bandas o de maquinaria con mayor número de neumáticos, siendo en la medida de lo posible neumáticos de alta flotación (García, 2018). Al realizar estas medidas se distribuye mejor el peso en el tren de rodado y por ende en la presión al suelo (Figura 6).

Figura 6

Efecto de las ruedas y bandas en la presión del suelo



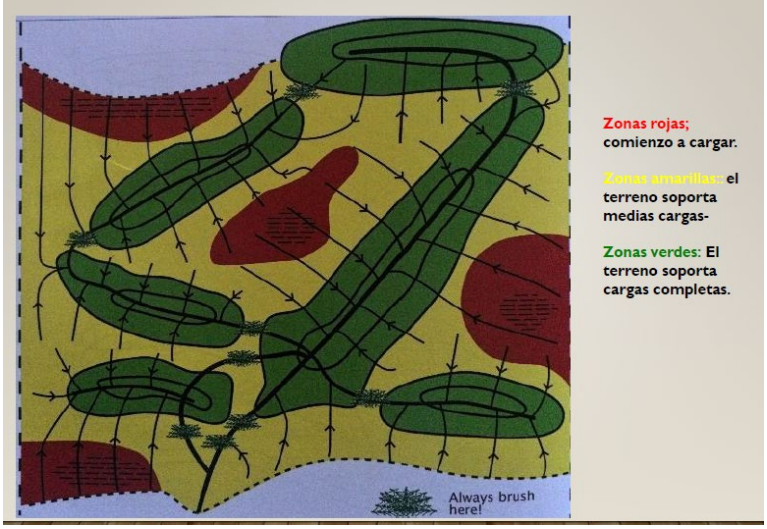
Nota. Elaborado a partir de Olofsfors (s.f.), como se cita en García (2018).

2.5.3.2 Carga dinámica según terreno

Daniluk (s.f.) y G. García (comunicación personal, octubre, 2021) coinciden en otro aspecto operativo para tener en cuenta en la extracción de madera: la carga según la dinámica del terreno. Debido a las características del sitio como suelo, textura, pendiente y posición en la ladera, el terreno no soporta las mismas capacidades de carga (Uusitalo, 2010). Por lo tanto, en la medida de lo posible se debe planificar la operación de manera que la maquinaria transite con menor carga en las zonas más sensibles y con mayor carga en las menos sensibles (Figura 7).

Figura 7

Carga dinámica según terreno



Nota. Tomado de Uusitalo (2010).

2.5.3.3 Frecuencia de pasadas

El principal efecto para Adams y Froehlich (1981); Gayoso (1983), y Smith (1991), como se cita en Villa (1995) relacionado a la maquinaria es el número de pasadas o viajes realizados sobre la misma área de suelo y su efecto en la compactación. Cuanto mayor es el número de pasadas, mayor compactación genera en el suelo. A su vez Smith (1991), como se cita en Villa (1995) establece que la profundidad de compactación es otra de las consecuencias generadas por el número de pasadas.

Owende et al. (2002) señalan la presencia de surcos como consecuencia de las pasadas repetidas de maquinaria pesada sobre el suelo, fenómeno estrechamente asociado con suelos blandos. En la mayoría de estos suelos, el efecto de ahuellamiento es incremental con cada pasada de la máquina, pero es más pronunciado en las primeras una a dos pasadas (Owende et al., 2002). Por otro lado, Matangaran et al. (2019) establecen el efecto de la compactación por frecuencia de pasadas, a un límite de cuatro a cinco pasadas, generando un aumento drástico de la densidad del suelo, que se vuelve constante al aumentar las pasadas.

La mayor alteración de la DAp del suelo, la porosidad total y la Ksat según los estudios de Nazari et al. (2021) se producen después de pasadas muy frecuentes (mayores a 20) de la maquinaria. Esto contradice para los mismos autores las afirmaciones existentes de que la mayoría de los daños a los suelos forestales ocurren después de unas pocas pasadas de maquinaria.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

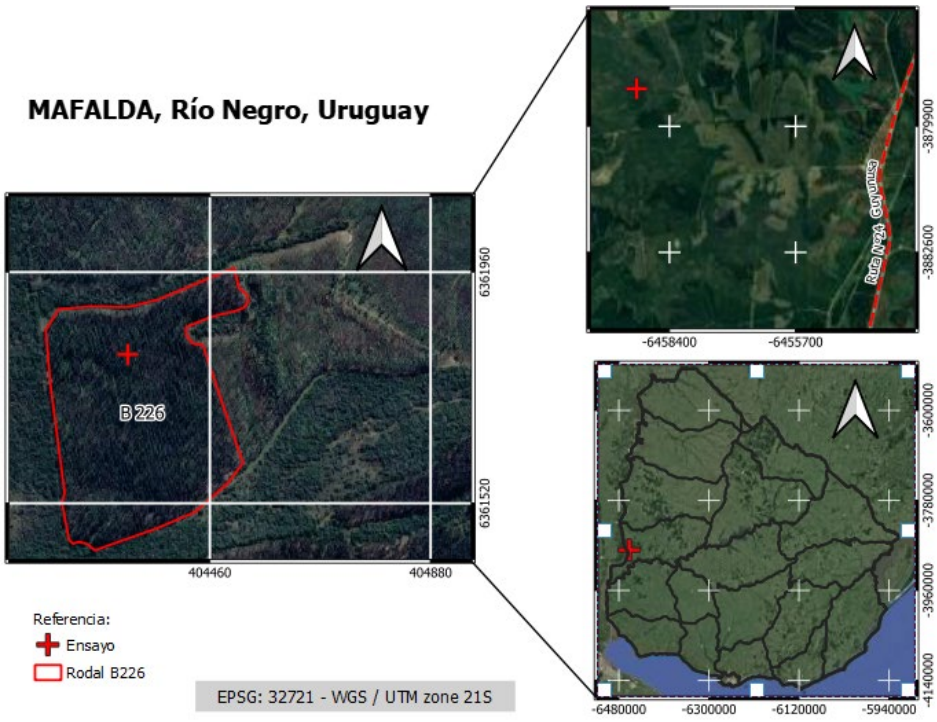
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El sitio utilizado para la realización del ensayo fue el predio denominado “Mafalda”, perteneciente a la empresa UPM, Forestal Oriental, ubicado a 26 km al norte de la localidad de Nuevo Berlín, departamento de Río Negro, Uruguay (Figura 8). El acceso al predio se realiza a través de la ruta nacional número 24 “Guyunusa”, kilómetro 40 aproximadamente.

Dentro del predio se utilizó el rodal B226 de *Eucalyptus dunnii*, elegido por la empresa, cuya localización geográfica del experimento dentro del mismo fue: 58°01’22.63” O y 32°52’39.90” S (Figura 8).

Figura 8

Ubicación geográfica del predio “Mafalda”



Nota. Elaborado a partir de Google (2023).

3.1.1 Suelo

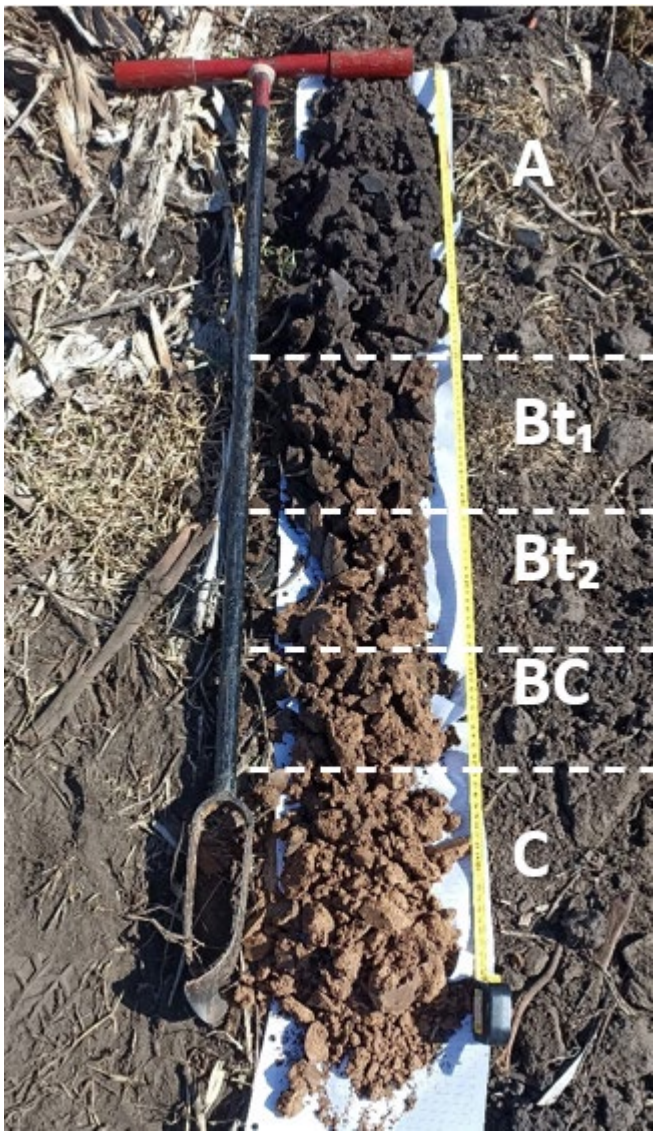
3.1.1.1 Descripción del perfil

Previo a la realización del ensayo, se realizaron varios perfiles de suelo en el sitio con un taladro holandés con el monte en pie. Resultando en perfiles homogéneos, se eligió un perfil modal (Figura 9) para su caracterización fisicoquímica. El perfil modal tuvo aproximadamente 120 cm de profundidad, con

cinco horizontes diferenciados (Tabla 2), cuya ubicación fue 32° 52’ 37,7’’ S y 58° 01’ 25,0’’ W. Se colectaron muestras de cada horizonte, las cuales fueron mantenidas en una conservadora, para luego ser secadas en estufa de circulación forzada a 105° por 72 h. Posteriormente, dichas muestras fueron utilizadas para el análisis físico y químico del suelo (ver ítem análisis fisicoquímico de suelo).

Figura 9

Perfil de suelo



3.1.1.2 Análisis fisicoquímico

Para cada horizonte de suelo se analizó pH (técnica relación 1:5 base suelo – agua), contenido de carbono y materia orgánica (técnica Walkley – Black). El contenido de arcilla fue determinado por el método del hidrómetro (Forsythe, 1975), previa eliminación del carbono orgánico con perhidrol, mientras que el de arena se realizó por tamizado y posterior pesado. Finalmente, la cantidad de limo fue calculada por diferencia. Por otro lado, la acidez titulable a pH 7 fue

determinada por extracción con Acetato de Bario 0.5N, buffereado a pH 7 y posterior titulación con NaOH 0.05 M. La cantidad de bases de intercambio (Ca, Mg, K y Na), fueron obtenidas mediante una extracción con Acetato de Amonio 1 M buffereado a pH 7 y determinados por absorción atómica (Ca y Mg) y emisión (K y Na) (Isaac & Kerber, 1971). En el caso de la CIC a pH 7, la misma fue estimada mediante la suma de bases más la acidez titulable. Finalmente, la saturación en bases fue calculada como la relación entre la CIC a pH del suelo y la CIC a pH 7. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Análisis fisicoquímico de los horizontes del suelo

		Granulometría					*Bases Intercambiables*				*CIC a pH suelo*	*CIC a pH 7*	*SB (%)*
Horiz.	*Prof. (cm)*	*% Ar*	*% L*	*% Ac*	*pH*	*MO (%)*	*Ca*	*Mg*	*K*	*Na*			
							$cmol_c/kg$						
Ap	0-38	34	37	29	5,5	4,8	10,4	1,7	0,7	0,1	13	14,2	91%
Bt_1	38-62	29	36	35	5,5	3,7	12,4	2,3	0,7	0,2	15,6	16,3	96%
Bt_2	62-81	20	32	48	5,8	2,4	15,8	3,5	1,1	0,4	20,7	20,7	100%
BC	81-100	25	39	36	7,0	1,6	14,2	2,8	1,1	0,4	18,5	18,5	100%
C	> 100	29	40	31	7,1	1,4	13,7	2,7	1,1	0,3	17,7	17,7	100%

Nota. Horiz: Horizonte; Prof: Profundidad; %Ar: Arena; %L: Limo; %Ac: Arcilla; %MO: Materia orgánica; SB (%): Saturación de bases.

La clase textural obtenida en casi todos los horizontes fue Franco arcilloso (FAc), a excepción del horizonte Bt_2, el cual obtuvo una textura arcillosa (Ac). En base a los análisis químicos de los horizontes del perfil de suelo, el suelo contiene altos contenidos de MO y saturación en bases, CIC del horizonte A entre 10 – 20 $cmol_c$/kg suelo, relación Ac B/A mayor a 1,2 con transición abrupta entre ambos. Por lo tanto, el suelo se clasifica como un Brunosol Subéutrico Lúvico.

3.1.2 Clima

Uruguay según la clasificación climática de Köppen se cataloga como Cfa (Köppen, 1936). La primera letra indica el grupo, la segunda el régimen de lluvias y la tercera las temperaturas en verano. En este sentido, el grupo C indica climas de latitudes medias, el sufijo f un régimen húmedo y el sufijo a está asociado a temperaturas subtropicales. Este tipo de clima es considerado como subtropical húmedo, con inviernos fríos o templados y veranos húmedos y cálidos. Las precipitaciones se distribuyen de forma más o menos homogénea a lo largo del año, sin una estación seca. La temperatura media del mes más frío está entre -3 y 18 °C, mientras que en verano superan los 22°C de temperatura media en el mes más cálido. Finalmente, las temperaturas medias suelen superar los 10°C al menos cuatro meses al año.

Según una caracterización climática del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) de Uruguay realizada para el período 1980 – 2009 por Castaño et al. (2011) la precipitación acumulada en la zona de estudio se encuentra en los 1200 mm anuales, con temperaturas promedio de 18 °C, registros máximos promedio de 24 °C durante enero, y valores mínimos de 11 °C durante julio.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTE

El ensayo fue realizado en la operativa diaria de una cosecha bajo el sistema CTL, utilizando un frente de cosecha propio de UPM y maquinaria marca PONSSE.

El rodal utilizado para el estudio fue el cuadro B226 (Figura 10) del predio Mafalda; ocupando 33,4 ha implantadas de *Eucalyptus dunnii* procedente de semilla con régimen fustal, en segunda rotación. La orden de cosecha indica 8 años de edad para el monte, con 602 árb/ha, y 0,24 m^3/árb; totalizando 142 m^3/ha y 4742,8 m^3 totales en el rodal (N. Küh, comunicación personal, setiembre, 2022).

El monte se cosechó antes de la edad de rotación planificada, ya que fue afectado por un incendio, por lo tanto, la madera se encontraba con bajo CH al momento de la cosecha.

El inventario precosecha indica un DAP (diámetro a la altura de pecho) promedio de 14,9 cm y una AMD (altura media dominante) de 25,7 m (M. Blanco, comunicación personal, setiembre, 2022).

Figura 10

Monte en pie, cuadro B226 de Eucalyptus dunnii.

3.3 EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

3.3.1 Descripción del ensayo

Para evaluar la compactación, se eligió comparar tres FW con diferentes capacidades de carga y a su vez probar el efecto del incremento del número de pasadas de estos. Para ello, se utilizó un diseño anidado con un tratamiento

adicional (control), tres repeticiones y diez tratamientos. Se combinaron tres niveles del factor capacidad de carga y presión con tres niveles del factor número de pasadas anidadas en el nivel de carga, completando así 30 unidades experimentales (incluyendo el tratamiento adicional).

Tanto el control como todos los tratamientos tienen una pasada previa de HV. Cada parcela chica ocupaba una superficie de 4 m de largo por 4,5 m de ancho, siendo de ubicación contiguas entre sí.

3.3.1.1 Maquinaria utilizada

Los FW utilizados para el ensayo pertenecen a la marca de maquinaria forestal PONSSE. Los modelos utilizados fueron: Buffalo King, Elephant King y Mammoth (Figura 11), los cuales tienen una capacidad de carga de 18, 20 y 25 toneladas de madera, respectivamente. Las especificaciones técnicas de estos se detallan a continuación en la Tablas 3, y Tabla 4 (elaborada con datos de campo e información proporcionada por N. Küh, comunicación personal, setiembre de 2022).

Tabla 3

Especificaciones de los FW utilizados, modelos originales de PONSSE

Modelo de Forwarder	*Peso típico (Kg)*	*Capacidad de carga (Kg)*	*Área de carga (m^2)*	*Fuerza de tracción (KN)*	*Tipo de transmisión*
Buffalo King	21100	18000	5,2 – 5,8	210	Manual
Elephant King	23700	20000	5,8 – 6,7	240	Manual
Mammoth	28500	25000	6,8 – 8	320	CVT*

Nota. *CVT: transmisión variable continúa. Elaborado a partir de Ponsse Plc. (2019a; 2019b; 2022).

Tabla 4

Especificaciones de los FW utilizados durante el ensayo

Modelo de Forwarder	*Rodado delantero*	*Rodado trasero*
Buffalo King	710/45 - 26,5	750/55 - 26,5
Elephant King	750/55 - 26,5	750/55 - 26,5
Mammoth	780/50 - 28,5	780/50 - 28,5

Figura 11

Forwarders utilizados: Buffalo King (A), Elephant King (B) y Mammoth (C)

A

B

C

La carga de madera en todas las pasadas del ensayo fue la misma dentro de cada FW, de forma de minimizar la variación entre pasadas. Cada FW fue cargado a capacidad completa. Se estimó un coeficiente de metro cubico estéreo a toneladas de 0,45 (N. Küh, comunicación personal, setiembre, 2022). A partir de este coeficiente, junto con las dimensiones de la caja de carga de la maquinaria (Figura 12), se estimaron los metros cúbicos y las toneladas de cada carro de FW (Tabla 5).

Figura 12

Dimensiones de la caja de carga de un FW

Tabla 5

Dimensiones de la caja de carga y peso estimado para cada FW al momento del ensayo

Modelo	*A*	*H*	*A*	*h*	*m^3 estéreos estimados*	*Toneladas estimadas*
Buffalo King	*2,75*	*1,44*	*1,00*	*0,64*	*33,12*	*14,90*
Elephant King	*3,50*	*1,45*	*1,20*	*0,64*	*42,07*	*18,93*
Mammoth	*3,90*	*1,50*	*1,71*	*1,04*	*54,92*	*24,72*

Nota. Dimensiones A, H, a, h, medidas en metro.

3.1.1.2 Presión teórica sobre el suelo

La presión sobre el suelo ejercida por la maquinaria fue calculada de forma teórica (Tabla 6), bajo el supuesto de distribución homogénea de peso en las ocho ruedas. La masa adicional de madera transportada por cada FW fue la estimada a campo, y las medidas de los neumáticos fueron tomadas al momento del ensayo. Cabe destacar que el diseño de todos los neumáticos eran el mismo (F2) y todas las máquinas son de tracción 8x8, con cuatro neumáticos delanteros y cuatro traseros.

Tabla 6

Presión teórica sobre el suelo de cada FW en kgf/cm² y kPa

Modelo	*Buffalo King*		*Elephant King*		*Mammoth*	
Masa (kg)	21100		23700		28500	
MA (kg)	14904		18931		24716	
Masa total (kg)	36004		42631		53216	
Neumático	*Delantero*	*Trasero*	*Delantero*	*Trasero*	*Delantero*	*Trasero*
Ancho (m)	0,71	0,75	0,75	0,75	0,78	0,78
DE (m)	1,31	1,50	1,50	1,50	1,45	1,45
q (m)	0,32	0,41	0,41	0,41	0,39	0,39
Lts (m)	0,63	0,76	0,76	0,76	0,73	0,73
S (m²)	0,45	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
S total (cm²)	1,78	2,28	2,28	2,28	2,27	2,27
S total del FW (cm²)	4,06		4,55		4,54	
Presión sobre el suelo (kgf/cm²)	0,89		0,94		1,17	
Presión sobre el suelo (kPa)	87,02		91,86		115,02	

Nota. MA: Masa adicional, carga de madera; DE: Diámetro exterior; q: Perfil; Lts: Longitud tractiva; S: Área de rueda tractiva.

3.1.1.3 Mediciones

La cosecha del rodal se realizó con un HV marca Ponsse modelo Ergo 8x8, el día 16 de setiembre de 2022, y la extracción de madera en conjunto con las mediciones se realizaron el día 26 de setiembre de 2022. Se comenzó marcando tres transectas por las cuales transitó cada tipo de FW y las parcelas fueron aleatorizadas correspondientes a las medidas según el número de pasadas.

En cada parcela se tomaron 10 mediciones de resistencia a la penetración (RP) a una profundidad de suelo de 20 cm, con el penetrómetro modelo penetroLOG PLG2040 (Falker, RS, Brasil), (Figura 13). En cuanto a las muestras de suelo para humedad del suelo, se sacaron dos muestras con un muestreador de suelos a una profundidad aproximada de 10 cm (Figura 14). Repartiendo la mitad de las mediciones entre ambas huellas de maquinaria, tanto para RP como para humedad del suelo.

Figura 13

Penetrómetro modelo penetroLOG PLG2040 (Falker, RS, Brasil)

Las mediciones con el penetrómetro quedan guardadas y georreferenciadas en el software del instrumento. Las muestras de suelo realizadas a los 10 cm de profundidad se utilizaron para ajustar las medidas de RP por humedad actual del suelo. Los valores de resistencia utilizados fueron un promedio de las 10 mediciones de cada parcela y a su vez promediadas en los 20 cm de profundidad, obteniendo un solo valor de resistencia para ajustarlo por humedad, representando así la condición media de dicha proporción de suelo.

Figura 14

Muestreador de suelos

Nota. Las dimensiones promedio de los cilindros metálicos o anillos del interior del penetrómetro tienen 5 cm de diámetro, 3 cm de alto, 2,5 mm de espesor, cuantificando así un peso de 58,7 g y un volumen de 74,6 cm^2.

Para cuantificar contenido de humedad (CH) del suelo, se utilizó el método gravimétrico del cilindro metálico. A cada muestra de suelo imperturbado contenido dentro del cilindro metálico se le tomo el peso a campo con balanza electrónica. Se la envolvió en papel film, y almacenó en conservadora hasta llevarla al laboratorio. Luego se secó en estufa de circulación forzada modelo Nova Ética 400/7D-300 air-forced oven (Nova Ética, SP, Brazil) a 105° C por 72 h. Luego se registró el peso seco, sacando por diferencia el CH al cual se midió RP, según cada parcela. A continuación, se muestra un esquema resumen de las actividades realizadas (Figura 15).

Figura 15

Esquema del proceso de mediciones

3.1.2 Corrección de humedad y Modificación del método de corrección estadístico para RP

Dado que la RP es altamente afectada por el CH del suelo, se realizó una corrección de la variable por dicho contenido. Para ello se utilizó un método simple de corrección de la RP según el contenido de agua del suelo propuesto por Duarte et al. (2022). Estos autores proponen un comportamiento no lineal para la relación RP – Humedad. Dada la complejidad para monitorear de forma objetiva el estado físico del suelo, el método propuesto se basa en cuatro etapas secuenciales que se detallan a continuación.

Primero se debe ajustar una función de regresión, encontrando una relación entre RP y la humedad del suelo. Luego se establece un valor de humedad de referencia y se calcula la diferencia de resistencia a la penetración (DRP) como la resta de cualquier valor de humedad tomado en el ensayo y el valor de humedad de referencia. Una vez calculadas las diferencias, las mismas deben ser relacionadas con la humedad del suelo, ajustando una función matemática, definida como ecuación de corrección. Por último, se calcula la corrección basada en la relación entre RP y humedad del suelo según la siguiente condición lógica: resta en los casos donde la RP a cualquier humedad del suelo es mayor a la RP con humedad de referencia, y suma en caso contrario.

En este ensayo, la humedad de referencia utilizada fue de 13%, ya que fue la humedad promedio de todas las muestras cuantificadas. Una vez ajustados los datos de RP por humedad (RPC), se realizó el análisis estadístico de los mismos, tanto corregidos como sin corregir.

3.1.3 Análisis estadístico

3.1.3.1 Modelo de ajuste y estandarización de RP y DRP

Para el análisis de los datos de RP y DRP se utilizó un modelo lineal multinivel mixto (LMM). Estos modelos según De la Cruz (2008) se utilizan para analizar conjuntos de datos que se encuentran organizados de forma jerárquica, modelando cada nivel de jerarquía y generando estimaciones más precisas. Se basan en la premisa de reconocer que elementos pertenecientes a un mismo grupo o contexto tenderán a ser más similares en su comportamiento entre sí, que con respecto a los que pertenecen a distintos contextos.

Con el fin de considerar los agrupamientos, se deben incluir niveles como factores de efectos aleatorios, los que se traducen en un modelo de coeficientes aleatorios que van a tomar en cuenta la variabilidad entre agrupamientos (De la Cruz, 2008). En el marco del experimento, este abordaje permitió agrupar los registros de RP y DRP según el tratamiento que correspondiera. Por tanto, el modelo estadístico utilizado fue el que se muestra a continuación (Ecuación 1):

$$Y = \mu + \alpha_i + Z_j + \varepsilon \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde: *Y* es la RP o DRP, μ la media general, α_i el logaritmo natural del CH, Z_j el efecto aleatorio del agrupamiento tratamientos y ε el error asociado.

Por otro lado, con el objetivo de evaluar la adecuación del modelo propuesto, se realizó la comprobación de los supuestos de normalidad de los residuales (Shapiro – Wilk) y de homogeneidad de varianza (Breusch-Pagan).

Finalmente, para representar la proporción de la variabilidad de la RP o DRP explicada por el CH y el efecto aleatorio del agrupamiento tratamientos, se utilizó el pseudo-R cuadrado condicional (R_P^2) según la expresión propuesta por Nakagawa et al. (2017) (Ecuación 2).

$$R_p^2 = \frac{\sigma_f^2 + \sigma_\alpha^2}{\sigma_f^2 + \sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde: R_P^2 representa la proporción de la varianza explicada por los efectos fijos y aleatorios, σ_f^2 la varianza explicada por los efectos fijos, σ_α^2 la varianza explicada por los efectos aleatorios, σ_ε^2 el nivel de varianza observado.

3.1.3.2 Modelo estadístico

El diseño experimental utilizado para el análisis de los datos de RP y RPC fue un diseño anidado con un testigo adicional. El modelo estadístico utilizado es el que se muestra a continuación (Ecuación 3):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{j(i)} + \gamma_k + \varepsilon_{ijk} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde: *Y* es la variable de repuesta, μ la media general, α_i el efecto fijo de la carga del FW con tres niveles, $\beta_{j(i)}$ el efecto fijo del número de pasadas del FW con dos niveles anidado en la carga, γ_k el efecto fijo del tratamiento adicional testigo y; ε_{ijkl} el error experimental.

La comparación de medias se realizó a través de la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher (DMS). Se realizó la comprobación de normalidad (Shapiro – Wilk) y homogeneidad de varianza (Levene).

Finalmente, la comparación de los registros de resistencia a la penetración respecto a un valor límite para el crecimiento radicular (2000 KPa) (Soto et al., 2014) fue realizada mediante una prueba t a una cola. Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el software R 4.0.2 a través de la interfase Rstudio.

4. RESULTADOS

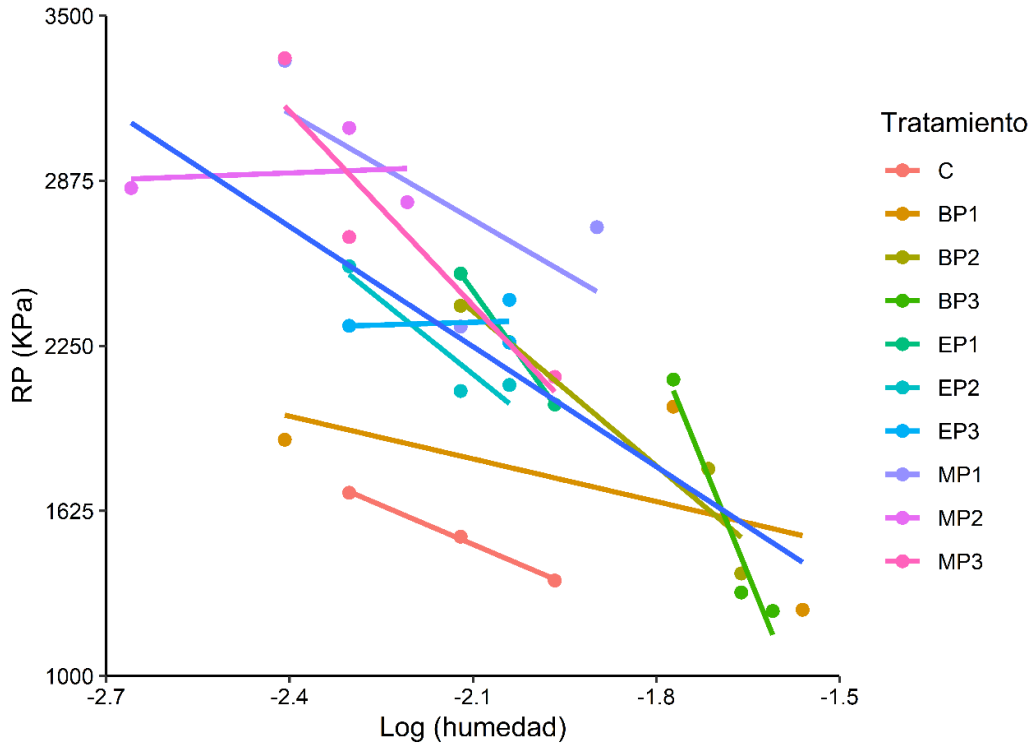
4.1 CORRECCION DE RP POR CONTENIDO DE HUMEDAD

4.1.1 Modelos de corrección

A continuación, se muestran los modelos gráficos obtenidos para RP y DRP, en función del CH, con su correspondiente ecuación de corrección y R_P^2 obtenido (Figura 16 y 17). Las rectas graficadas representan el comportamiento de las variables para cada grupo de los tratamientos. La mayoría de ellos tienen un comportamiento similar, tendiendo a aumentar la RP a medida que se disminuye la humedad del suelo.

Figura 16

Modelo gráfico de RP y contenido de humedad



Nota. La línea azul indica el modelo para todos los datos y las mini rectas de colores indican el modelo específico para cada grupo (tratamiento).

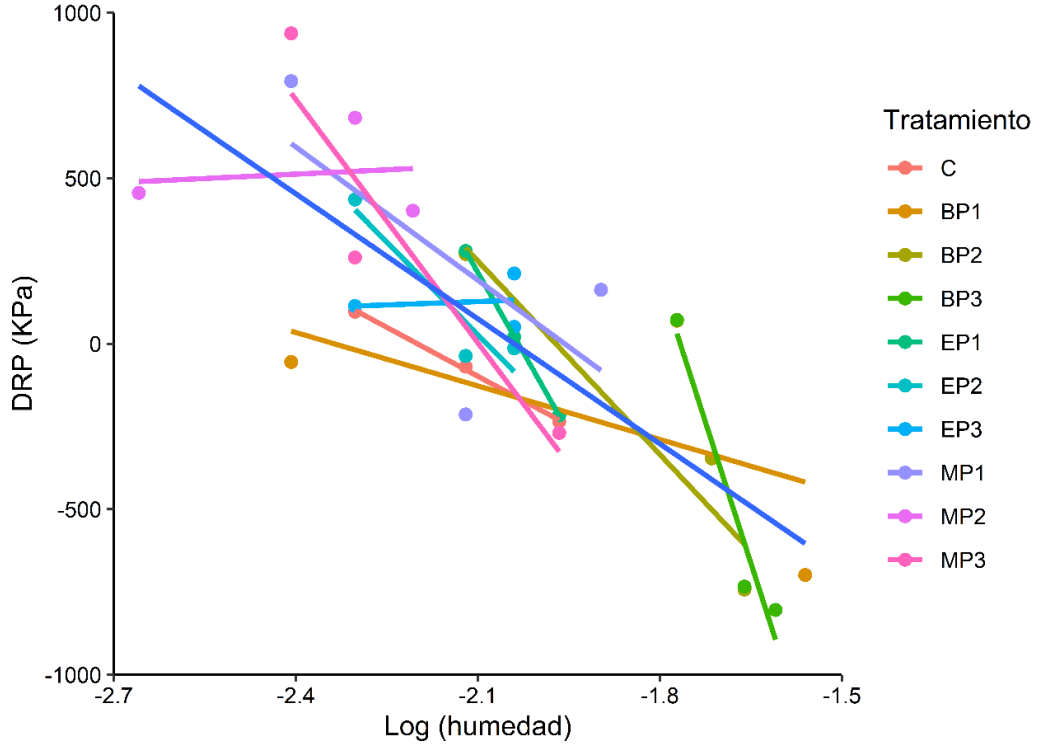
El modelo en la que se relaciona la RP y el CH del suelo se muestra a continuación (Ecuación 4):

$$Y = -404{,}81 - 1258{,}51 \times \log(H),\ R_P^2 = 0{,}70 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Con relación al modelo obtenido para la estimación de la DRP en función del CH del suelo se presenta en la Figura 17. El comportamiento medio es similar al modelo mostrado anteriormente.

Figura 17

Modelo gráfico de DRP y contenido de humedad



Nota. La línea azul indica el modelo para todos los datos y las mini rectas de colores indican el modelo específico para cada grupo (tratamiento).

El modelo de obtención de la DRP en función del CH del suelo se muestra a continuación (Ecuación 5):

$$Y = -2567{,}64 - 1258{,}51 \times \log(H),\ R_P^2 = 0{,}63 \text{ (Ecuación 5)}$$

En ambos modelos, los coeficientes fueron significativos ($p < 0{,}05$). Ambos evidencian una relación negativa y significativa, es decir, al aumentar la humedad la RP disminuye. Los valores de R_P^2 de los modelos muestran que los mismos son capaces de explicar gran parte de la variabilidad de la RP y DRP incluyendo el contenido de humead del suelo como explicativa.

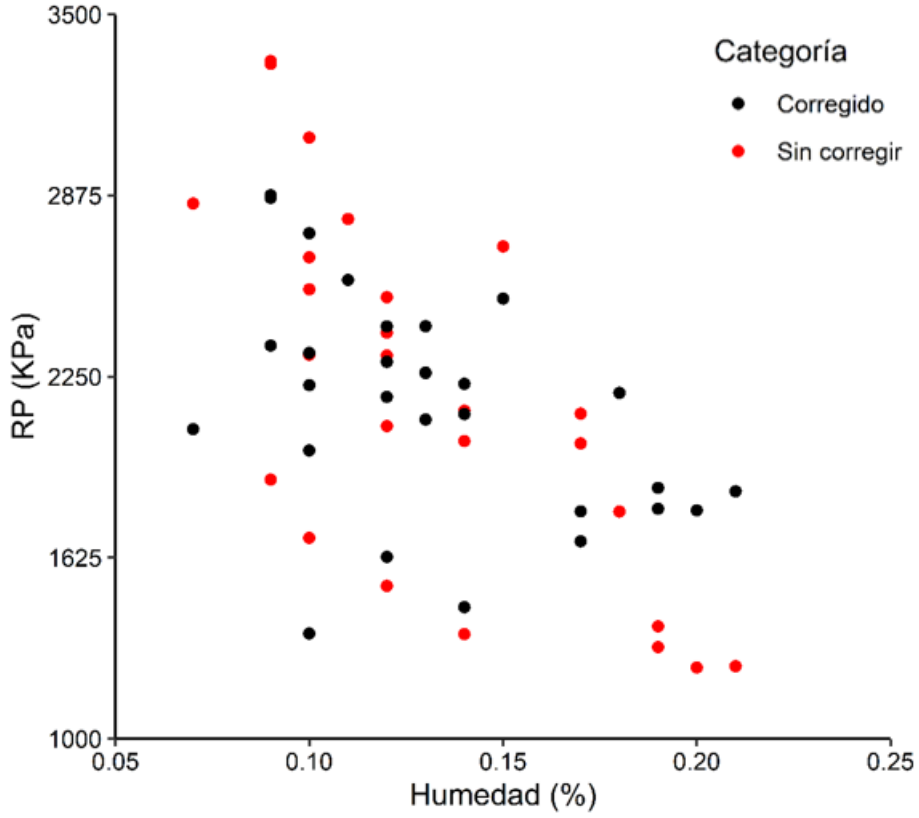
4.1.2 Dispersión de registros corregidos y sin corregir

Los registros de RP sin corregir tienen una tendencia a disminuir al aumentar el CH, mientras que los registros de RP corregidos no visualizan dicha tendencia, sino que pasan a encontrarse distribuidos aleatoriamente. Se evidencia

así la efectividad del proceso de corrección de los datos, como se visualiza en el diagrama de dispersión (Figura 18).

Figura 18

Diagrama de dispersión comparativa de los registros de RP y RPC



4.2 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

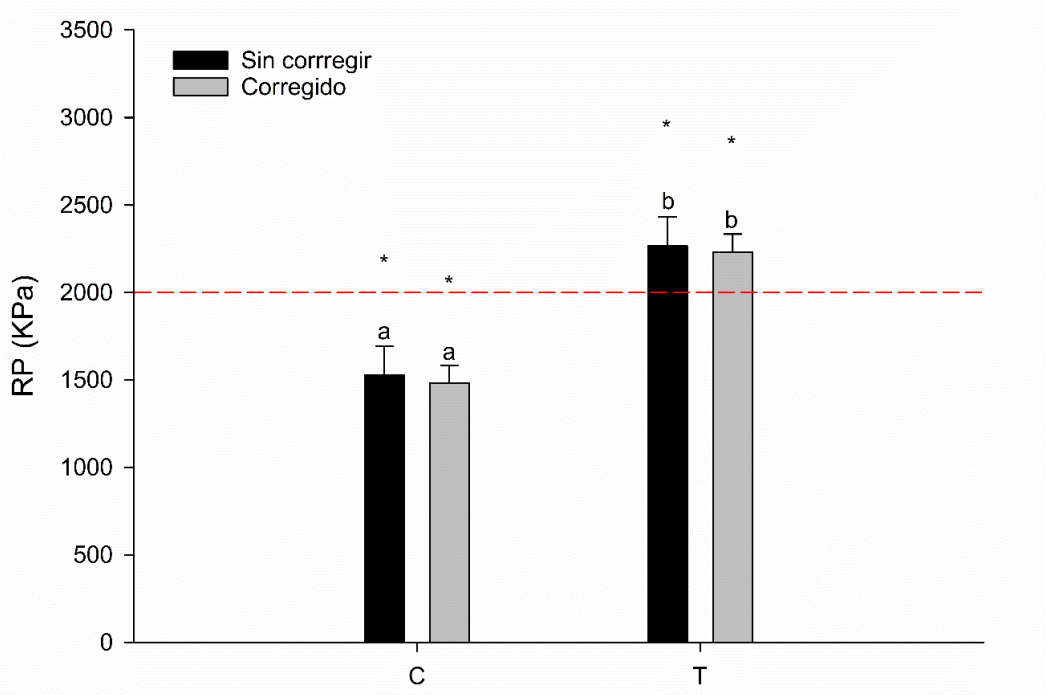
Los registros se analizaron según: nivel de carga y número de pasadas, tanto para los datos de RP sin corregir y corregidos por humedad. Se realizó el análisis de varianza correspondiente a cada uno (ANOVA, el cual se presenta en el anexo).

4.2.1 Nivel de carga

Existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el tratamiento control (sin carga) con respecto a los tratamientos con carga (Figura 19); la línea punteada trazada a 2000 kPa indica el umbral de crecimiento radicular según Soto et al. (2014). Los valores de RP corregidos son levemente menores a los sin corregir. Las medias utilizadas para la comparación resultan del promedio de todas las pasadas para una misma carga. Para los registros del control y del promedio de los tratados existen diferencias con el umbral de crecimiento tanto para los registros sin corregir como corregidos.

Figura 19

RP para el tratamiento control y el promedio de los tratamientos con carga



Nota. Letras diferentes dentro de los tratamientos sin corregir y corregidos indican diferencias significativas. Línea punteada roja indica el umbral teórico de RP para el desarrollo de las raíces. * indican diferencias significativas entre cada registro promedio y el umbral.

Respecto a los tratamientos con carga, el efecto de la corrección por humedad es notoriamente mayor, ya que los datos sin corregir podrían estar subestimando o sobreestimando los resultados. Uno de los ejemplos más claros es el tratamiento control (sin carga adicional de peso), donde la RP una vez corregida por CH descendió en 45 kPa (Tabla 7). Un comportamiento similar presentó el Elephant King, descendiendo unos 60 kPa. El valor de RP para el Buffalo King, aumentó 245 kPa en el caso donde la RP fue corregida por humedad. Caso contrario sucedió para el Mammoth, el cual presentó la disminución más abrupta de RP (285 kPa). Sin embargo, el promedio de los tratamientos con carga solo presenta una leve disminución de 35 kPa con respecto al valor de RPC.

Los valores obtenidos de RPC (Tabla 7) frente al pasaje de las distintas máquinas con respecto al testigo aumentan un 24% frente al pasaje del Buffalo King, 33% en el caso del Elephant King y un 41% para el pasaje del Mammoth.

Tabla 7

Promedio de RP sin corregir y corregida para todos los tratamientos

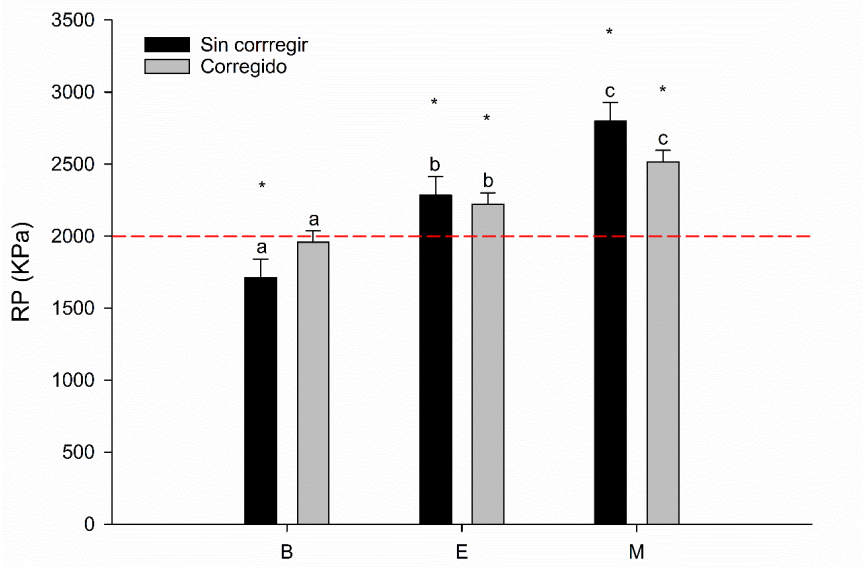
Tratamiento	*RP promedio (kPa)*	*RPC promedio (kPa)*
Testigo	1527	1482
Buffalo King	1713	1958
Elephant King	2284	2221
Mammoth	2800	2515
Promedio Tratados*	2266	2231

Nota. *Promedio tratados hace referencia al promedio de los tratamientos con pasaje de maquinaria (Buffalo King, Elephant King y Mammoth).

Existieron diferencias significativas entre los tratamientos con carga ($p < 0,05$) (Figura 20); la línea punteada trazada a 2000 kPa indica el umbral de crecimiento para el desarrollo de raíces de plántulas según Soto et al. (2014)., donde los menores valores de RP se relacionan con el menor peso de carga de maquinaria (Buffalo King) y mayor valor de RP con la máquina que mayor peso de madera transportaba (Mammoth). El Buffalo King es la única maquinaria que se mantuvo con valores de RP similares a 2000 KPa, cuando se corrigen los valores por humedad. Para los demás tipos de FW tanto corregidos como sin corregir y el Buffalo King sin corregir presentan diferencias significativas con el umbral de crecimiento.

Figura 20

RP para las distintas cargas evaluadas



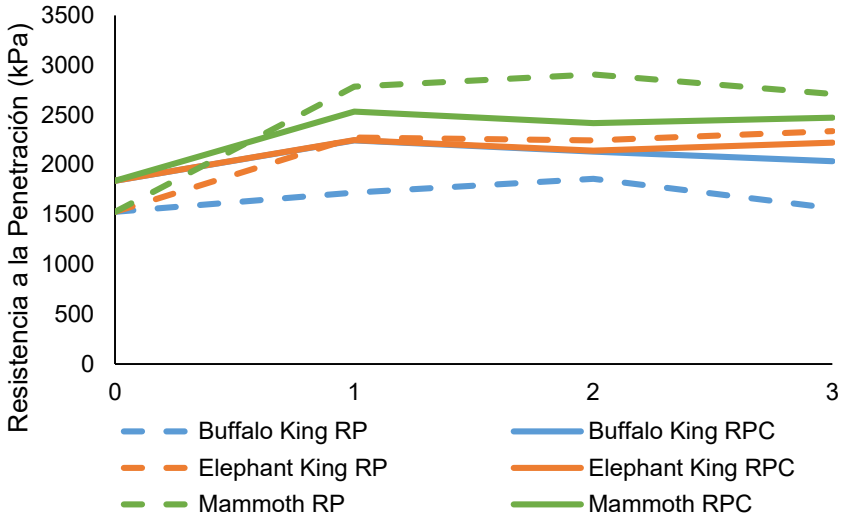
Nota. B: Buffalo King; E: Elephant King; M: Mammoth. Letras diferentes dentro de los tratamientos sin corregir y corregidos indican diferencias significativas. Línea punteada roja indica umbral de RP para el desarrollo de raíces. * indican diferencias significativas para cada registro promedio y el umbral.

4.2.2 Número de pasadas

No existen diferencias significativas en cuanto al número de pasadas dentro de cada tratamiento (ver ANOVA en Anexo). Se evidencia un comportamiento de RP constante entre una, dos y tres pasadas de cada máquina, tanto para los valores corregidos como sin corregir por humedad (Figura 21).

Figura 21

RP según número de pasadas para todas las máquinas evaluadas



Nota. El valor de RP correspondiente a las pasadas 0, es el valor del testigo sin pasadas.

4.3 CONFIGURACIÓN Y OPERATIVA DE LOS FW

Al relacionar la variable evaluada (RP) con respecto a la configuración estructural de las máquinas: presión teórica sobre el suelo, peso total de la operación, superficie de rodado y carga de madera se evidencian diferencias en términos porcentuales entre los FW evaluados al realizar la comparación entre los mismos (Tabla 8). Las diferencias más abruptas radican en el peso total de la operación, presión sobre el suelo, capacidad de carga de madera y RP.

Tabla 8

Comparación de FW con las distintas variables evaluadas

Variable	*Buffalo King - Mammoth*	*Elephant King - Mammoth*	*Buffalo King - Elephant King*
Peso total de la Operación	32%	20%	16%
Superficie de Rodado	11%	s/d	11%
Presión sobre el suelo	24%	20%	5%
Carga de Madera	9,8 ton	5,8 ton	4 ton
RP	22%	12%	12%

Nota. Se representa la comparación del segundo FW con respecto al primero.

5. DISCUSIÓN

Evaluar la compactación de un suelo es sumamente complejo dado el dinamismo de este. La compactación es una característica que se describe a través de distintas variables, entre ellas porosidad, DAp, RP y velocidad de infiltración. A partir de las cuales y según el tipo de suelo se establece si el mismo se encuentra compactado. A términos de esta investigación solo se evalúo la RP sobre un suelo Brunosol Subéutrico Lúvico, de textura franco-arcillosa cosechado bajo el sistema CTL.

El diseño, planeamiento y la operativa de una cosecha forestal intervienen directamente en el efecto de ésta en el suelo. Tanto el tipo de maquinaria, el estado del suelo y los restos vegetales sobre los que transitará la maquinaria en un sistema de cosecha CTL, influyen en el efecto de la compactación sobre el suelo.

5.1 CORRECCION POR HUMEDAD

La RP está influenciada por la humedad del suelo, como demuestran varios autores (Gayoso & Alarcón, 1999; Missanjo & Kamanga-Thole, 2014; Patrizzi et al., 2003; Rucks et al., 2004). De acuerdo con los resultados obtenidos, las diferencias significativas entre los registros de RP sin corregir y corregidos, indican la necesidad de considerar y aplicar un proceso de corrección por el factor humedad.

La humedad es un factor sumamente relevante en el suelo, posee gran variabilidad en el espacio. Dentro de un mismo suelo puede variar ampliamente con solo apenas unos metros de diferencia. La dinámica y capacidad de retención de agua en el suelo, esta influenciada directamente por las propiedades físicas, químicas y biológicas de cada suelo. Asimismo, existen numerosos factores que influyen en la dinámica del agua en el suelo y por lo tanto de su capacidad de retener agua, básicamente se resume a relaciones de energía físico - químicas y atracción de partículas, lo que se vincula directamente a la textura y estructura del suelo (Durán et al., 2013).

Autores como Duarte et al. (2020) y Larocca et al. (2017) evidencian resultados similares a los reportados en este trabajo; quienes establecen que, para comparar valores de RP medidos bajo diferentes condiciones de humedad, los datos deben ser corregidos en función de una humedad de referencia para asegurar comparaciones confiables. Asimismo, varios autores concuerdan en la relación entre la humedad y la RP, cuanto más bajo es el CH, mayor es la RP (Villa, 1995). La cinética entre dichas variables está caracterizada por una tendencia general de reducción exponencial de la RP por un aumento de la humedad del suelo. Duarte et al. (2020) lo atribuyen al efecto lubricante que tiene la humedad en la penetración del cono del penetrómetro. Sin embargo, Duarte et al. (2022) establecen un comportamiento no lineal entre RP y CH, en

consecuencia, al variar la humedad un mismo suelo puede presentar diferentes valores de RP.

Este trabajo demostró coeficientes de regresión de 0,63 para DRP – CH, y 0,70 para RP y CH, lo que evidencia la importancia de corregir los registros. Duarte et al. (2020) hallaron coeficiente de determinación de 0,79 entre la diferencia entre la RP medida y la RP de referencia en función de la humedad del suelo. Por otro lado, para la RP y el contenido de agua, demostraron un $R^2 = 0,65$ para un Latosol (textura: 40% Ar, 19% L y 41% Ac) de Brasil. Estos resultados están en concordancia con los reportados por Duarte et al. (2022) quienes encontraron una alta asociación entre RP corregida y CH: $R^2 = 0,79$ para un suelo oxisol (textura: 40% Ar, 20% L y 40% Ac) de Brasil.

Duarte et al. (2020) establecen necesario conocer de antemano la relación entre la RP y la humedad del suelo. Además, es fundamental tener en cuenta que la relación varía según la DAp promedio del suelo, como lo demostraron Vaz et al. (2013), como se cita en Duarte et al. (2020). Por lo tanto, la ecuación de corrección encontrada refiere a una DAp promedio del suelo. Para otros valores de DAp, es probable que la ecuación de corrección adecuada sea otra. Además, una disminución en la humedad del suelo aumenta la diferencia de la relación RP y CH.

Los valores corregidos por CH fueron generalmente más altos que los registros sin corregir, lo que coincide con lo propuesto por Duarte et al. (2022), quienes concluyen que el método de corrección presenta un mejor ajuste de los registros. Estos registros pueden ser superiores o inferiores a los sin corregir dependiendo del tipo de suelo. Retomando lo antes mencionado, otra variable citada por varios autores (Duarte et al., 2020; Villa, 1995) que condice la relación RP y CH y la hace variar es la DAp, según su valor promedio en el suelo (Duarte et al., 2022). Atado a la misma, se encuentra la textura del suelo. Suelos con mayor contenido de arcilla, como es el caso en estudio, tienen un efecto más pronunciado de las fuerzas de adhesión entre el suelo y la varilla metálica del penetrómetro, particularmente a niveles más bajos de humedad del suelo (Vaz et al., 2011, como se cita en Duarte et al., 2022). Estos autores sugieren realizar la corrección de las mediciones de RP a humedades cercanas a presiones de succión de 10 kPa, dado que la RP se encuentra menos influenciada por la textura.

5.2 NIVEL DE CARGA

Bajo las condiciones del ensayo existieron diferencias significativas entre las cargas de cada FW, tanto entre ellos como con respecto al control. El suelo sin pasadas de FW (control) obtuvo el menor valor de RP, lo que era de esperarse. Sin embargo, cabe destacar que ese tratamiento (como también los demás) tienen una pasada previa de HV, por lo tanto, podría estar condicionado al peso de este, a su diseño estructural y la operativa de la cosecha (realizada una semana previa a la extracción y evaluación realizada).

Las diferencias entre el control sin pasadas de FW y los tratamientos que si fueron expuestos a cargas de FW son evidentes. Esto se ha comprobado en investigaciones previas, Matagaran et al. (2019) encontraron diferencias en las mediciones del índice de cono (RP) luego del primer paso de maquinaria de bandas en un suelo arcilloso (Ultisol, del sur de Indonesia), mostrando aumentos en la profundidad del perfil.

El peso de la máquina más la madera que extrae conduce fácilmente a la deformación del suelo en forma de surcos en la superficie de este, debido a la sobrecarga de presión sobre el mismo (Matagaran et al., 2019). Los mismos autores discuten la complejidad de comparar investigaciones sobre compactación de suelo debido a las diferencias entre las máquinas y los tipos de suelo. Esto está relacionado a que todos los suelos ceden diferente a la sobrecarga y presión de las máquinas sobre el mismo.

Al evaluar el nivel de carga, un mayor nivel por extracción de madera correspondió a un mayor valor de RP. Esto concuerda con lo reportado por Jansson y Wästerlund (1999) y Picchio et al. (2012), quienes establecen que las máquinas más livianas tienen menos impacto en el suelo que las más pesadas.

En cuanto al análisis de presión de la maquinaria sobre el suelo, el valor teórico calculado evidencia que, a medida que el peso de la operación aumenta la presión de esta en el suelo también lo hace. Lo que a su vez se condice con un mayor resultado en la RP del suelo posterior a la pasada de la maquinaria. Sin embargo, el aumento de RP no mostró un aumento en la misma proporción que la presión y la carga. Este factor puede atribuirse al efecto de diferente distribución de carga en los FW a la teórica donde consideramos una distribución homogénea del peso. Tanto el Mammoth como el Elephant King podrían tener la carga distribuida más homogéneamente entre ejes en comparación al Buffalo King.

5.3 PASADAS

La evaluación de la RP para una, dos y tres pasadas no presentó diferencias significativas entre las mismas en ninguno de los tratamientos evaluados. No obstante, se constataron diferencias significativas entre el promedio de los tratamientos respecto al control sin pasadas de FW. Esto quiere decir que, a efectos del suelo, sería lo mismo pasar una que tres veces por el mismo lugar. Sin embargo, no se evaluó el efecto en más números de pasadas. El resultado obtenido puede atribuirse a algunos factores como: igual carga entre pasadas, bajo número de pasadas evaluadas, configuración estructural y operativa de traslado de la maquinaria.

Primeramente, se podría atribuir el resultado sin diferencias significativas entre el número de pasadas a un efecto de compactación del suelo en la primera pasada, generando que el suelo haya llegado a un límite de deformación máximo. Sin embargo, esto no es así, dado que, si fuera un efecto intrínseco del suelo, este no debería haber obtenido diferentes valores de RP al variar la presión ejercida

sobre él, es decir al variar el tipo de máquina y por ende la carga sobre el suelo. Es así como el efecto de nulidad entre una, dos y tres pasadas debería estar ligado al número de pasadas y no al suelo o a la carga en sí. De igual forma cabe destacar que todas las pasadas se realizaron bajo el mismo nivel de carga, por lo tanto, puede que, variar las pasadas hasta tres veces, y no la carga entre ellas, no haya sido un número significativo para ver diferencias significativas entre las mismas.

Los resultados se condicen con investigaciones previas, Balbuena et al. (2000) no encontraron diferencias entre una y cinco pasadas de maquinaria (en ese caso evaluaron un tractor 2WD con acoplado), si encontraron diferencias significativas al pasar diez veces. Por otro lado, Matagaran et al. (2019) observaron que existen diferencias solo en la primera pasada, alcanzando una constante hasta ocho pasadas (límite de pasadas evaluadas por los autores, por un FW de bandas con un peso mayor a 20 toneladas).

Lo establecido por estos autores es ratificado por Jorajuría et al. (1997) indican un aumento relativo de RP puede tener una relación inversa con el número de pasadas. Lo que explicaría un comportamiento evidente en la primera pasada, para luego mantenerse constante al aumentar el número de pasadas, hasta un límite superior donde el efecto en el suelo es evidente. En este trabajo se visualizó el efecto de la primera pasada y un comportamiento que tiende a ser constante en las siguientes pasadas. Para Nazari et al. (2021) es posible que las primeras pasadas de las máquinas reduzcan la calidad de las propiedades físicas del suelo, como la estabilidad de los agregados, la adhesión entre partículas y el movimiento de agua, lo que hace que el suelo sea vulnerable a una mayor compactación. Entre ellos se encuentra la disminución de los macro y microporos del suelo.

Nazari et al. (2021) vinculan el número de pasadas a las demás propiedades físicas del suelo, donde establecen que la mayor alteración de la DAp del suelo, la porosidad total y la Ksat se produce después de pasadas muy frecuentes (mayores a 20). Esto contradice las afirmaciones existentes de que la mayoría de los daños a los suelos forestales ocurren después de unas pocas pasadas de máquinas. Estos autores discuten que los efectos en las propiedades físicas de los suelos comienzan a verse luego de las ocho a once pasadas. El pasaje frecuente de maquinaria puede compactar el suelo, aumentando así su DAp si la presión de la máquina sobre el suelo es mayor que la resistencia puesta por el suelo (Ampoorter et al., 2007).

Cabe destacar que las pasadas en una operativa estándar de cosecha pueden variar, generalmente son números mayores a tres; factor condicionado por la configuración espacial del rodal, la distancia media de extracción y el volumen de madera a extraer. Los sitios del rodal más lejanos al camino tendrán menos pasadas y por lo tanto menor efecto en la compactación del suelo.

5.4 CONFIGURACION Y OPERATIVA DE LOS FW

5.4.1 Configuración estructural de los FW

La aparición de surcos por maniobras direccionales tiene una correlación positiva con la intensidad de pasadas de la maquinaria (Matagaran et al., 2019). La formación de surcos en el suelo es una señal de que la carga sobre el mismo es mayor a su capacidad de soporte en la capa superior del suelo (Bygdén et al., 2003). Gayoso e Iroumé (1991) demuestran que la macroporosidad del suelo se reduce bajo huellas y canchas de acopio en aproximadamente un 20%, llegando a valores residuales inferiores al 10%.

En este ensayo se visualizaron marcas por pasaje de maquinaria, sin llegar a visualizar surcos (Figura 24). Esto se atribuye al escaso volumen y el estado deshidratado de los restos vegetales sobre los cuales transitó la maquinaria. En un sistema de cosecha CTL, se espera que el impacto sea menor, dado que la maquinaria transita sobre restos vegetales húmedos, los cuales actúan como zona de amortiguación entre la maquinaria y el suelo, previniendo así daños mayores al mismo. El sistema CTL retiene mayores residuos de biomasa en el sitio de cosecha en comparación a los demás sistemas, por lo tanto, debería generar menores impactos en el suelo (Ayrala, 2017; García, 2018; Olivera, 2016). La condición de los restos vegetales sobre los cuales se efectuó este ensayo eran mínimos en cantidad y con bajo CH, condición dada por el incendio que sufrió el rodal cosechado. Esto además generó una cosecha más temprana, donde el rodal tenía menos edad de lo normal y consecuentemente menos biomasa. Por lo tanto, se esperaría que, frente a una situación estándar de cosecha, los daños al suelo puedan ser menores que en la situación estudiada en este ensayo.

Figura 24

Compactación de restos por pasaje del FW.

Otro factor relacionado a la configuración estructural de la máquina es el ancho del neumático. Los FW del ensayo rondaban anchos de 710 mm a 780 mm, lo que genera mayor área de contacto en el suelo. Myhrman (1990), como se cita en Eliasson (2005) informa que anchos de neumáticos entre 600 a 800 mm, reduce la profundidad de surcos en aproximadamente 50% para FW de ocho ruedas y 22 toneladas.

5.4.2 Comparación de FW con las distintas variables evaluadas

En cuanto a la comparación de los FW con las distintas variables evaluadas, para esta operación el Mammoth genera mayores valores de RP por operación realizada, en comparación al Buffalo King y al Elephant King, en

concordancia a su mayor peso total en la operación (32% y 20% respectivamente), y una mayor cantidad de madera transportada en metro cúbico que los demás FW (9,8 m^3 más en comparación al Buffalo King y 5,8 m^3 más en el caso del Elephant King). La presión sobre el suelo del Mammoth con respecto al Buffalo King y Elephant King, aumentó un 24% y 20% respectivamente, si existiendo un aumento de 11% en la superficie del rodado al comparar el Mammoth con el Buffalo King, de lo contrario no hay diferencia para la superficie de rodado entre el Mammoth y el Elephant King.

Al comparar el Elephant King con el Buffalo King, el primer FW mencionado carga 4 ton más de madera, lo que se traduce en un aumento del 16% en peso total de la operación, con un 11% más en superficie de apoyo de los neumáticos. Los cuales generan 5% más de presión sobre el suelo y según los resultados evaluados un aumento del 12% en cuanto a RP. Mientras que el Mammoth genera el mismo aumento en RP (12%) con respecto al Elephant King, pero transportando 1.8 ton más de madera.

Cabe destacar que, en una operativa de cosecha estándar, donde la cual se desarrolla sobre un suelo sensible como el de este ensayo; los FW al momento de transitar sobre zonas sensibles no lo harían a carga completa, o lo harían utilizando bandas. De esta forma la presión sobre el suelo sería menor, generando así que el efecto en la compactación se reduzca.

5.5 EFECTO EN EL SUELO

El umbral más frecuente establecido como limitante para el desarrollo radicular de plantines es de 2000 kPa (Soto et al., 2014). Las evaluaciones realizadas obtuvieron resultados por encima de este valor, para el Elephant King (2221 kPa) y Mammoth (2515 kPa), mientras que los resultados para el control sin carga (1482 kPa) y el Buffalo King (1958 kPa) fueron estadísticamente equivalentes al umbral. Esto podría condicionar el futuro de los plantines de una siguiente rotación en cosechas anteriores realizadas con maquinaria de mayor porte. Sin embargo, Missanjo y Kamanga-Thole (2014) establecen el umbral crítico para el crecimiento de raíces de los árboles entre 2000 y 3000 kPa, según la especie de árbol y las condiciones del suelo. Frente a ello se deberá evaluar el efecto en las futuras rotaciones ya que a su vez debe tenerse en cuenta un proceso clave entre ambas etapas: el laboreo.

Según Arvidsson y Jokela (1995), como se cita en Soto et al. (2014) la compactación del suelo afecta el metabolismo de las plantas, generando una disminución del crecimiento de las raíces, reducción del área foliar y por ende de la fotosíntesis, estancando así el crecimiento de las plantas. Los efectos de la compactación sobre el crecimiento de las plántulas son variados según Kozlowski (1999), dependiendo de las características de la especie en desarrollo y del tipo de suelo. Estos impactos múltiples y variados se confunden con los efectos de las operaciones de cosecha forestal o la preparación mecánica del suelo.

Cabe destacar que el valor obtenido de RP fue inmediato al pasaje de maquinaria. Por lo tanto, no se puede aseverar que cause problemas en el desarrollo radicular de futuros árboles implantados en los próximos meses; dado que previo a su plantación se realiza una etapa de laboreo del suelo. El laboreo de suelos contribuye directamente a la desagregación y aireación del suelo. En conjunto a ello, otros procesos posteriores que contribuyen a la descompactación del suelo son: mineralización de restos vegetales, aporte de materia orgánica, reactivación de la fauna edáfica (Miller et al., 2004) y de sus procesos biológicos, relacionados a las condiciones climáticas del sitio (M. Pérez Bidegain, comunicación personal, octubre 2022). De esta forma, el suelo reactivará su dinamismo generando un estado diferente a la inicial.

Dado el tipo de suelo (Brunosol Subéutrico Lúvico), con textura franco-arcillosa, este tendrá una dinámica química asociada a su tipo de agregados y textura lo que seguramente le llevará más tiempo estabilizarse frente a un suelo netamente forestal de textura arenosa (Dirección de Suelos y Fertilizantes, 1976). Cabe destacar que el sitio del ensayo era una segunda rotación forestal, por lo tanto, ya existieron dos laboreos previos en el suelo, lo que genera cambios frente a la situación inicial del mismo.

5.6 PRESPECTIVAS A FUTURO

Se aclara entonces que los datos obtenidos son inmediatos al tránsito de maquinaria, cuyo sitio será laboreado y de esta forma desagregado tanto por los factores ambientales como por el crecimiento de las raíces de los próximos árboles. Por lo tanto, la compactación de suelos por efecto de la maquinaria en el largo plazo debe evaluarse en el tiempo, no solo en un momento especifico.

Asimismo, se plantea la evaluación de otras variables como DAp y porosidad del suelo, indicadores de compactación para una evaluación más exhaustiva. Para evidenciar el efecto de las pasadas de maquinaria se debería evaluar con mayor número de pasadas (se propone 1, 5 y 10 pasadas). Es recomendable también evaluar la compactación por maquinaria en otros tipos de suelos, con más residuos forestales y utilizando madera con alto CH, sin efecto del incinerado.

Para minimizar el impacto de la compactación, ya sea en épocas o en sectores de fácil anegamiento Nazari et al. (2021) y G. García (comunicación comunicación personal, octubre, 2021) recomiendan la selección de máquinas forestales adecuadas que produzcan menor compactación. Referido a la planificación de la operativa concuerdan en disminuir la frecuencia de pasadas de las máquinas, circular sobre residuos forestales frescos en lo posible, neumáticos de alta flotación, uso de bandas u otras alternativas en zonas más sensibles para disminuir los efectos sobre el suelo y los recursos hídricos. Se recomienda manejar un volumen de carga adecuado, relacionado a la carga dinámica según el terreno; especialmente en zonas sensibles como la evaluada en este ensayo.

En cuanto a la operativa de la cosecha, retomando a Miller et al. (2004), indican que las operaciones de cosecha están limitadas a periodos de humedad de suelo. A modo de ejemplo, los suelos pesados a los que les lleva más tiempo recomponerse luego de una perturbación, se recomienda una planificación de tal forma que sean cosechados en épocas donde el CH del suelo sea menor. Esto se relaciona no solo a las dificultades que los suelos húmedos presentan en la cosecha, sino también a optimizar las etapas siguientes de la producción forestal y un máximo beneficio de la próxima rotación.

6. CONCLUSIÓN

Las siguientes conclusiones están ligadas a la condición del sitio, las cuales no son circunstancias estándar de una cosecha forestal. Esto está vinculado a que la evaluación fue llevada a cabo sobre un suelo franco arcilloso con mayor susceptibilidad a la compactación, bajo un sistema de cosecha CTL con escasa cantidad de residuos forestales y bajo CH en los residuos vegetales.

Para la situación descripta, existe un efecto significativo de los tratamientos sobre la resistencia a la penetración del suelo debido al pasaje inmediato de los FW. A mayor peso de la operación y por lo tanto mayor presión sobre el suelo, mayor valor de resistencia a la penetración impone el suelo. No obstante, el aumento de la carga no supuso su aumento proporcional en la resistencia a la penetración. Tampoco, se evidenciaron diferencias entre una, dos y tres pasadas de FW, sin importar su magnitud y carga de madera.

Finalmente, se propone realizar estudios de compactación que evalúen el efecto que esta tiene sobre otras propiedades físicas del mismo, así como realizar una evaluación de comportamiento en periodos más largos de tiempo. También podría evaluarse el crecimiento de los futuros árboles implantados para estimar si hay efecto sobre el desarrollo forestal de los mismos.

7. BIBLIOGRAFÍA

Adams, P. W., & Froehlich, H. A. (1981). *Compaction of forest soils: A pacific northwest extension publication.* Oregon State University. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/administrative_report_or_publications/tt44pn16q

Agherkakli, B., Najafi, A., & Sadeghi, S. H. (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. http://dx.doi.org/10.17221/93/2009-JFS

Ampoorter, E., Goris, R., Cornelis, W. M., & Verheyen, K. (2007). Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management, 241*(1-3), 162-174. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.019

Ares, A., Terry, T. A., Miller, R. E., Anderson, H. W., & Flaming, B. L. (2005). Ground-based forest harvesting effects on soil physical properties and douglas-fir growth. *Soil Science Society of America Journal, 69*(6), 1822-1832. http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0331

Assan, M. M., & Gorosito, S. M. (s.f.). *Relación agua – suelo – planta: Infiltración.* Universidad Nacional de Catamarca. http://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CUADERNOS%20DE%20CATEDRA/Assan/Guia%20didactica%202%20Infiltracion.pdf#:~:text=Conductividad%20Hidr%C3%A1ulica%20Para%20describir%20el%20proceso%20de%20infiltraci%C3%B3n,trasmitir%20agua%2C%20se%20expresa%20en%20unidades%20de%20velocidad.

Ayrala, C. (2017). *Análisis económico de dos contratistas de cosecha forestal mecanizada operando bajo diferentes sistemas en tala rasa de Eucalyptus grandis en el Noreste de Entre Ríos* [Trabajo final de grado, Universidad Tecnológica Nacional]. Repositorio de la Universidad Tecnológica Nacional RIA. https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/5763/Trabajo%20Final%20-%20Ayrala%2C%20Cristi%C3%A1n%20Ariel.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Balbuena, R., Terminiello, A., Claverie, J., Casado, J., & Marlats, R. (2000). Compactación de suelo durante la cosecha forestal: Evolución de las propiedades físicas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 4*(3), 453-459. http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662000000300023

Ballard, T. M. (2000). Impacts of forest management on northern forest soils. *Forest Ecology and Management, 133*(1-2), 37-42. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00296-0

Bayhan, Y., Kayisoglu, B., & Gonulol, E. (2002). Effect of soil compaction on sunflower growth. *Oil & Tillage Research, 68*(1), 31-38. http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00078-8

Botta, G. F. (2018). *Compactación del suelo: Cómo prevenir el problema*. INIA. http://www.inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20La%20Estanzuela/Actividades%202018/30%20mayo%20-%20jornada%20compactaci%C3%B3n%20en%20suelos/Compactaci%C3%B3n%20del%20suelo%20URUGUAY%202018-BOTTA.pdf

Botta, G. F., Jorajuria, D., & Draghi, L. (2002). Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics, 39*(1), 47-54. https://doi.org/10.1016/S0022-4898(02)00003-4

Buzó, R., & Ferreira, R. (2008). *Criterios de traficabilidad para corta y saca* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.

Bygdén, G., Eliasson, L., & Wästerlund, I. (2003). Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. *Journal of Terramechanics, 40*(3), 179-190. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2003.12.001

Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management, 338,* 124-138. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022

Carter, M. C., Dean, T. J., Ziyin, W., & Newbold, R. A. (2006). Impacts of harvesting and posrharvest treatments on soil bulk density, soil strength, and early growth of Pinus taeda in the Gulf Coastal Plain: A long-term soil productivity affiliated study. *Canadian Journal Forest Research, 36,* 601-614. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/25274

Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980 – 2009.* INIA.

Castro, G. P., Nutto, L., Malinovski, J. R., & Malinovski, R. A. (2015). Harvesting systems. En L. Pancel & M. Köhl (Eds.), *Tropical Forestry Handbook* (pp. 1-34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41554-8_184-1

Cochran, P. H., & Brock, T (1985). *Soil Compaction and Initial height growth of Planted Ponderosa Pine*. U.S. Department of Agriculture. https://doi.org/10.2737/PNW-RN-434

Da Silva, E. (2012). *Modelagem técnica e económica de um sistema de colheita forestal mecanizada de toras curtas* [Disertación doctoral, Universidade Federal de Viçosa]. Locus UFV. https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/730/1/texto%20completo.pdf

Daniluk, G. (s.f.). *Sistemas de saca, madereo o desembosque.* Facultad de Agronomía. https://nanopdf.com/download/la-saca-de-la-madera_pdf

Daniluk, G. (2002). *Código de cosecha forestal uruguayo.* Facultad de Agronomía. https://kipdf.com/codigo-de-cosecha-forestal-uruguayo_5ad3e1a67f8b9a84818b45bc.html

De la Cruz, F. (2008). Modelos Multinivel. *Revista Peruana de Epidemiología, 12*(3), 1-8. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203120335002

Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias. (2021). *Informe cuatrimestral de exportaciones de madera: Principales cadenas forestales.* MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Exportaciones%20de%20madera%20segundo%20cuatrimestre%202021.pdf

Dirección de Suelos y Fertilizantes. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol III. Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes.* MAP.

Dirección General Forestal. (2022). *Estadísticas Forestales 2022: Extracción – Producción - Consumo - Mano de Obra - Comercio Exterior.* MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2022-04/DGF%20Boletin%20Estadistico_2022.pdf

Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics, 69*(9), 1858-1868. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002

Donoso, C. (1981). *Ecología forestal: El bosque y su medio ambiente.* Editorial Universitaria. https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/17236

Draghi, L., Jorajuria Collazo, D., Serena, D., Bailleres, M., Melani, E., Castillo, J. M., Cerisola, C., & Palancar, T. (2015). Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agrociencia (Uruguay), 19*(2), 59-67. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482015000200008

Duarte, T. F., Da Silva, T. J. A., Bonfim-Silva, E. M., & Fenner, W. (2020). Resistance of a red latosol to penetration: Comparison of penetrometers, model adjustment, and soil water content correction. *Engenharia Agrícola, 40*(4), 462-472. http://dx.doi.org/10.1590/1809-Eng.Agric.v40n4p462-472/2020

Duarte, T. F., Da Silva, T. J. A., Bonfim-Silva, E. M., & Lima, G. F. (2022). Simple correction method of soil penetration resistance for soil water content. *Engenharia Agrícola, 42*(3), 20210229. http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n3e20210229/2022

Durán, A., García Prechac, F., & Labella, S. (2013). *Propiedades Hídricas de los Suelos* (10ª ed.). Facultad de Agronomía.

Eliasson, L. (2005). Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. *Silva Fennica, 39*(4), 549-557. https://doi.org/10.14214/sf.366

European Soil Data Centre (2023, 15 de febrero). *Soil Compaction.* https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-compaction

Forsythe, W. (1975). *Física de suelos.* IICA. https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7841/BVE19040149e.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Frey, B., Kremer, J., Rüdt, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P. (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology, 45*(4), 312-320. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.05.006

Froehlich, H. A., Aulerich, D. E., & Curtis, R. (1981). *Designing systems to reduce soil impacts from tractive logging machines.* Oregon State University. https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/dj52w595c

Froehlich, H. A., & McNabb, D. (1984). Minimizing soil compaction in Pacific Northwest forests. En E. L. Stone (Ed.), *Forest Soils & Treatment Impacts: Proceedings of the Sixth North American Forest Soil Conference* (pp. 159-192). University of Tennessee. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/technical_reports/gb19fb811

Froehlich, H. A., Miles, D. W. R., & Robbins, R. W. (1985). Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. *Soil Science Society of America Journal, 49*(4), 1015-1017. https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040045x

García, G. (2018). *Evaluación de la curva de aprendizaje en operadores de harvester para cosecha forestal mecanizada* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.

García Petillo, M., Puppo, L., Hayashi, R., & Morales, P. (s.f.). *Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo.* Facultad de Agronomía. http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Metodologia%20para%20determinar%20los%20parametros%20hidricos%20de%20%20un%20suelo%20a%20campo.pdf

Gayoso, J., & Alarcón, D. (1999). *Guía de conservación de suelos forestales.* Universidad Austral de Chile. https://www.conaf.cl/protocolo-plantaciones/Documentos-y-estudios/Proteccion-de-suelos-y-agua/Guia-de-conservacion-de-suelos_UACH-CHILE.pdf

Gayoso, J., & Iroumé, A. (1991) Compaction and soil disturbances from logging in Southern Chile. *Annals of Forest Science, 48*(1), 63-71. http://dx.doi.org/10.1051/forest:19910105

Gayoso, J., & Iroumé, A. (1995). Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque, 16*(2), 3-12. https://es.scribd.com/document/337606238/Impacto-del-manejo-de-plantaciones-sobre-el-ambiente-fisico

Geist, M. J., Hazard, J. W., & Seidel, K. W. (1989). Assessing physical conditions of some Pacific Northwest volcanic ash soils after forest harvest. *Soil Science Society of America Journal, 53*(3), 946-950. https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300030052x

Gent, J. A., Ballard, R., Hassan, A. E., & Cassel, D. K. (1984). Impact of Harvesting and Site Preparation on the Physical Properties of Piedmont Forest Soils. *Soil Science Society of America Journal, 48*(1), 173-177. https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800010032x

Gómez, A., Powers, R. F., Singer, M. J., & Horwath, W. R. (2002). Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal, 66*(4),1334-1343. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1334

Google. (2023). [Mafalda, Río Negro, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 26 de junio de 2023, de https://www.google.com/maps/@-32.880165,-58.0182931,1252m/data=!3m1!1e3?entry=ttu

Grace, J., Skaggs, R. W., & Cassel, D. K. (2006). Soil physical changes associated with forest harvesting operations on an organic soil. *Soil Science Society of America Journal, 70*(2), 503-509. https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0154

Han, S. K., Han, H. S., Page-Dumroese, D. S., & Johnson, L. R. (2009). Soil compaction associated with cut-to-length and whole-tree harvesting of a coniferous forest. *Canadian Journal of Forest Research, 39*(5), 976-989. https://doi.org/10.1139/X09-027

Hartmann, M., Niklaus, P. A., Zimmermann, S., Schmutz, S., Kremer, J., Abarenkov, K., Lüscher, P., Widmer, F., & Frey, B. (2014). Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. *The International Society for Microbial Ecology Journal, 8,* 226-244. https://doi.org/10.1038/ismej.2013.141

Horn, R., Vossbrink, J., Peth, S., & Becker, S. (2007). Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management, 248*(1-2), 56-63. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.037

Isaac, R. A., & Kerber, J. D. (1971). Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant and water analysis. En L. M. Walsh (Ed.), *Instrumental methods for analysis of soil and plant tissues* (pp. 17-37). Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/1971.instrumentalmethods.c2

Jamshidi, R., Jaeger, D., Raafatnia, N., & Tabari, M. (2008). Influence of two ground-based skidding systems on soil compaction under different slope and gradient conditions. *International Journal of Forest Engineering, 19*(1), 9-16. https://doi.org/10.1080/14942119.2008.10702554

Jansson, K. J., & Johansson, J. (1998). Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden. *Forestry: An International Journal of Forest Research, 71*(1), 57-66. https://doi.org/10.1093/forestry/71.1.57

Jansson, K. J., & Wästerlund, I. (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. https://doi.org/10.1080/02827589908540823

Jorajuría, D., Draghi, L., & Aragon, A. (1997). The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium/Trifolium grassland. *Soil and Tillage Research, 41*(1-2), 1-12. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01085-9

Köppen, W. (1936). *Das geographische System der Klimate.* Gerbrüder Brontraeger. https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf

Kozlowski, T. T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research, 14*(6), 596-619. https://doi.org/10.1080/02827589908540825

Larocca, F., Neifert, M., & Luna, A. (2017, 5 - 6 de octubre). *Evaluación del impacto del tránsito de maquinaria en la cosecha forestal* [Contribución]. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia. https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/2326/EVALUACI%C3%93N%20DEL%20IMPACTO%20DEL%20TR%C3%81NSITO%20DE%20MAQUINARIA%20EN%20LA%20COSECHA%20FORESTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ley N° 15.939: *Ley Forestal – Fondo Forestal – Recursos Naturales.* (1987). IMPO. https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987

Mace, A. C. (1971). Recovery of forest soils from compaction by rubber-tired skidders. *Minnesota Forestry Research Notes,* 226. https://hdl.handle.net/11299/58156

Machado De Assis, S. (2010). *Metodología para controle de custos na colheita florestal* [Trabajo final de grado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro]. RIMA. http://repositorio.im.ufrrj.br:8080/jspui/bitstream/1235813/2939/1/Shana.pdf

Márquez, A. (2020). *Evaluación de la productividad de harvester en dos sistemas de cosecha forestal* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República

Matangaran, J. R., Putra, E. I., Mashitha, M. W., Diatin, I., Mujahid, M., & Adlan, Q. (2019). Soil Disturbance by Logging Operation of Industrial Plantation Forest in Indonesia. *Earth and Environmental Science, 394,* Artículo e012064. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/394/1/012064/pdf

Mayer, M., Prescott, C. E., Abaker, W. E. A., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G. W. D., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J. P., Laganière, J., Nouvellon, Y., Paré, D., Stanturf, J., Vanguelova, E. I., & Vesterdal, L. (2020). Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management, 466*(15), Artículo e118127. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127

McNabb, D. H., Startsev, A. D., & Nguyen, H. (2001). Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. *Soil Science Society of America Journal, 65*(4), 1238-1247. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541238x

Miller, R. E., Colbert, S. R., & Morris, L. A. (2004). *Effects of heavy equipment on physical properties of soils and on long-term productivity: A review of literature and current research*. National council for air and stream improvement. https://www.ncasi.org/wp-content/uploads/2019/02/tb887.pdf

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2021). *Resultados Cartografía Forestal 2021.* https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos/resultados-cartografia-forestal-2021

Missanjo, E., & Kamanga-Thole, G. (2014). Impact of Site Disturbances from Harvesting and Logging on Soil Physical Properties and Pinus kesiya Tree Growth. *International Scholarly Research Notices, 2014,* Artículo e323626. http://dx.doi.org/10.1155/2014/323626

Napper, C., Howes, S., & Page-Dumroese, D. (2009). *Soil-Disturbance Field Guide*. U.S. Department of Agriculture. https://www.fs.usda.gov/t-d/pubs/pdf/08191815.pdf

Nakagawa, S., Johnson, P. C. D., & Schielzeth, H. (2017) The coefficient of determination R2 and intra-class correlation coefficient from generalized linear mixed effects models revisited and expanded. *Journal of the Royal Society Interface, 14*(134), Artículo e20170213. http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2017.0213

Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M. A., Bilyera, N., & Zamanian, K. (2021). Impacts of Logging-Associated Compaction on Forest Soils: A Meta-Analysis. *Frontiers in Forests and Global Change, 4,* Artículo e780074. https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.780074

Nazari, M., Horvat, M., Joergensen, R. G., & Peth, S. (2020). Soil organic matter mobilization by re-compaction of old forest skid trails. *European Journal of Soil Biology, 98,* Artículo e103173. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103173

Olivera, A. (2016). *Exploring opportunities for the integration of GNSS with forest harvester data to improve forest management* [Disertación doctoral, University of Canterbury]. UC Research Repository. http://dx.doi.org/10.26021/1921

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023, febrero). *Propiedades Físicas del Suelo.* https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/

Owende, P. M. O., Lyons, J., & Ward, S. M. (Eds.). (2002). *Operations protocol for eco-efficient wood harvesting on sensitive sites.* ECOWOOD. https://moam.info/operations-protocol-for-eco-efficient-wood-harvesting-on-sensitive-sites_5a27782e1723ddf23ef9425c.html

Pantaenius, P. (2011). *Sistemas de aprovechamiento forestal y temas relacionados.* Rúcula Libros. https://www.yumpu.com/es/document/read/62213007/sistemas-de-aprovechamiento-forestal-manejo-de-motosierra

Parise, D. J. (2005). *Influência dos requisitos pessoais especiais no desempenho de operadores de máquinas de colheita florestal de alta performance* [Tesis de maestría, Universidade Federal do Paraná]. Repositorio Digital Institucional da UFPR. https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/2223/R%20-%20D%20-%20DIONISIO%20JOAO%20PARISE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Parker, R. T., Maguire, D. A., Marshall, D. D., & Cochran, P. (2007). Ponderosa pine growth response to soil strength in the volcanic ash soils of central Oregon. *Western Journal of Applied Forestry, 22*(2), 134-141. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/29703

Patrizzi, V., Vaz, C. M., Lossi, M., & Primavesi, O. (2003). Modelamento do efeito da imidade e densidade na resistência â penetraçâo dos solos. *Scientia Forestalis, 62,* 34-39. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/46509/1/PROCIOP2003.00079.PDF

Picchio, R., Neri, F., Maesano, M., Savelli, S., Sirna, A., Blasi, S., Baldini, S., & Marchi, E. (2011). Growth effects of thinning damage in a Corsican pine (Pinus laricio Poiret) stand in central Italy. *Forest Ecology and Management, 262*(2), 237-243. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.028

Picchio, R., Neri, F., Petrini, E., Verani, S., Marchi, E., & Certini, G. (2012). Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. *Forest Ecology and Management, 285*(1), 38-43. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.008

Ponsse Plc. (2019a). *Buffalo King: Una máquina sólida para varias tareas.* PONSSE.

Ponsse Plc. (2019b). *Elephant King: Más madera en un solo viaje.* PONSSE.

Ponsse Plc. (2022). *Mammoth: Productividad a otro nivel*. PONSSE.

Quintana, E., & Barrios, M. (2014). *Evaluación de daños a la masa remanente en cosecha de Eucalyptus grandis* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.

Reeves, D. (2011). *Soil disturbance monitoring of timber harvest operations in the USDA Forest Service Northern Region* [Tesis de maestría, University of Idaho]. USDA – RMRS. https://forest.moscowfsl.wsu.edu/smp/solo/documents/GTs/Reeves-Derrick_Final_Thesis.pdf

Revathi, N. (2013). *Forest machine track-soil interaction* [Tesis de maestría, KTH Royal Institute of Technology]. DiVA. http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:700503/FULLTEXT01.pdf

Robert, R., Brown, R., & Ruy, C. (2018). Análisis económico de la cosecha mecanizada en repoblaciones de Eucalyptus spp. en sitios montañosos. *Madera y Bosques, 24*(3), 1-12. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431621

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo.* Facultad de Agronomía.

Schack-Kirchner, H., Fenner, P. T., & Hildebrand, E. E. (2007). Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest. *Soil Use and Management, 23*(3), 286-293. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00096.x

Soares, V. (2010). *Análise de dois modais de sistemas de colheita mecanizados de eucalipto em 1ª rotação* [Tesis de maestría, Universidade Estadual Paulista]. UNESP. https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90619/bertin_vas_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sociedad de Productores Forestales. (2022). *Uruguay Forestal: Principales cifras del sector.* https://www.spf.com.uy/uruguay-forestal

Solgi, A., & Najafi, A. (2014). The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. *Journal of Forest Science, 60*(1), 28-34. https://jfs.agriculturejournals.cz/artkey/jfs-201401-0006_the-impacts-of-ground-based-logging-equipment-on-forest-soil.php

Soracco, C. G., Palancar, T., & Fajardo, S. (2005). *Relación entre densidad aparente seca y la Infiltración del agua en el suelo* [Contribución]. XIII Jornadas de Jóvenes Investigadores de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo, Tucumán. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/117524

Soto, D., Donoso, J. P., Salas, C., & Puettmann, K. J. (2014). Light availability and soil compaction influence the growth of underplanted Nothofagus following partial shelterwood harvest and soil scarification. *Canadian Journal of Forest Research, 45*(8), 998-1005. http://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2014-0353

Souza, M., & Pires, C. (2008). *Colheita Florestal: Mensuração e Análise dos Efeitos das Variáveis Controláveis e Não Controláveis no Custo das Atividades de Corte e Descasque Mecanizado* [Contribución]. XV Congresso Brasileiro de Custos, Curitiba. https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/1199

Souza, M., & Pires, C. (2009). Colheita florestal: Mensuração e análise dos custos incorridos na atividade mecanizada de extração. *Custos e Agronegócio Online, 5*(2), 104-132. http://www.custoseagronegocioonline.com.br/numero2v5/colheita%20florestal.pdf

Startsev, A. D., & McNabb, D. H. (2000). Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Canadian Journal of Soil Science. 80*(4), 617-624. https://doi.org/10.4141/S99-092

Threadgill, E. D. (1982). Residual tillage effects as determined by cone index. *American Society of Agricultural and Biological Engineers, 25*(4), 859-863. https://doi.org/10.13031/2013.33627

Uruguay XXI. (2021). *Sector Forestal en Uruguay.* https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/sector-forestal/?download=es

Uusitalo, J. (2010). *Introduction to Forest Operations and Technology.* JVP Forest Systems Oy.

Villa, P. (1995). *Evaluación de la compactación de suelo causada con sistema de cosecha harvester – forwarder* [Trabajo final de grado, Universidad de Chile]. UChile. https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?vid=56UDC_INST:56UDC_INST&search_scope=MyInst_and_CI&tab=Everything&docid=alma991003190229703936&lang=es&context=L&adaptor=Local%20Search%20Engine&query=sub,exact,Pinus%20radiata,AND&mode=advanced

Vossbrink, J., & Horn, R. (2004). Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. *European Journal of Forest Research, 123,* 259-267. https://doi.org/10.1007/s10342-004-0040-8

Wang, J., LeDoux, C. B., & Edwards, P. (2007). Changes in soil bulk density resulting from construction and conventional cable skidding using preplanned skid trails. *Northern Journal of Applied Forestry, 24*(1), 5-8. https://www.nrs.fs.usda.gov/pubs/jrnl/2007/ne_2007_wang_001.pdf

Williamson, J. R., & Neilsen, W. A. (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*(8), 1196-1205. https://doi.org/10.1139/x00-041

8. ANEXO

ANALISIS DE VARIANZA

Modelos de RP sin y con corrección de humedad

Ambos modelos: humedad y RP (Tabla A1), así como humedad y RPC (Tabla A2), determinaron diferencias significativas entre los tratamientos, existiendo efecto de los niveles de carga. A su vez existen diferencias significativas entre el testigo y el resto de los tratamientos correspondientes a las distintas cargas. Sin embargo, no hubo diferencias significativas entre los números de pasadas (1, 2 y 3) dentro de la misma carga.

Tabla A1

ANAVA para Modelo de Humedad y RP

FV	SC	Df	CM	F	p-value
Carga	5316131	2	2658066	17,94	0,0000 *
Carga/Pasadas	203895	6	33983	0,23	0,9637
Todo vs testigo	1473024	1	1473024	9,94	0,0037 *
Error	2963719	20	148186		
Total	9956769	29			

Nota. *Indica diferencias significativas.

Tabla A2

ANAVA para Modelo de Humedad y RPC

FV	SC	Df	CM	F	p-value
Carga	1401091	2	700546	12,35	0,0001 *
Carga/Pasadas	215324	6	35887	0,63	0,7028
Todo vs testigo	1516852	1	1516852	26,75	0,0000 *
Error	1134090	20	56704		
Total	4267357	29			

Nota. *Indica diferencias significativas.