



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

**Evaluación del impacto en el suelo de un equipo de
maderero en un rodal de *Pinus radiata* D.Don**

Patrocinante: Sr. Andrés Iroumé A.

Trabajo de Titulación presentado
como parte de los requisitos para optar
al Título de **Ingeniero Forestal**.

Paola Cristina Susana Gayoso Morelli

Valdivia Chile 2003

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Andrés Iroumé Arrau	6,2
Informante:	Sr. Felipe Leiva Morey	6,2
Informante:	Sr. Víctor Sandoval Vásquez	5,8

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

Sr. Andrés Iroumé A.

A mis padres

INDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCION	1
2. MARCO TEORICO	3
2.1 Efectos de la cosecha y el madereo	3
2.2 Principales impactos sobre el suelo	4
2.3 Compactación	6
2.3.1 Extensión del daño	7
2.3.2 Intensidad de la compactación	8
2.3.3 Efectos sobre el prendimiento y la productividad del sitio	9
2.4 Planificación de vías de saca y mitigación de impactos	10
2.5 Remanente de compactación en el tiempo	11
3. DISEÑO DE INVESTIGACION	12
3.1 Antecedentes generales del área de estudio	12
3.2 Estudio de efectos del madereo planificado sobre el suelo	13
3.2.1 Planificación de las vías de saca	14
3.2.2 Diseño del muestreo ex -ante o condición previa a la cosecha	14
3.2.3 Diseño/Medición del muestreo post cosecha o determinación de la extensión de la superficie alterada	15
3.2.4 Medición de la intensidad de los cambios	16
3.3 Estudio recuperación natural de la densidad y permeabilidad en huellas después de 20 años	17
3.4 Determinaciones físico hídricas	19
3.5 Análisis de la información	19
4. RESULTADOS Y DISCUSION	21
4.1 Importancia del cambio de la densidad aparente como efecto de la cosecha planificada	21
4.1.1 Caracterización de los suelos de la unidad de estudio	21
4.1.2 Cambios atribuibles a la cosecha, sección PR-77 Rodal -1	22
4.1.3 Distancia desde cancha y efecto sobre la densidad aparente del suelo	24
4.1.4 Relaciones entre humedad y densidad aparente del suelo	25
4.1.5 Relaciones entre resistencia al corte ex – ante v/s después de la cosecha	27
4.1.6 Otras propiedades de los suelos estudiados	27
4.1.7 Relaciones entre resistencia al corte, densidad aparente y humedad	28
4.1.8 Relación entre permeabilidad y densidad aparente	29
4.2 Extensión de las alteraciones bajo cosecha planificada	30
4.3 Extensión de las alteraciones bajo cosecha no planificada	31
4.4 Recuperación de la densidad aparente en huellas después de 20 años	32
5. CONCLUSIONES	37
BIBLIOGRAFIA	39
ANEXOS	
1 Abstract	
2 Predio Los Pinos Accesibilidad e Hidrología	

- 3 Predio los Pinos Cobertura de Plantaciones y Carta Predial
- 4 Foto área rodal en estudio de *Pinus radiata* de 1977, predio Los Pinos
- 5 Superficie según uso actual del suelo Predio Los pinos y la relación de factores de sitio con cuatro procesos de degradación
- 6 Esquema de planificación de Vías de Saca y de Arrastre
- 7 Daño tipo 1
- 8 Daño tipo 2
- 9 Sin Daño
- 10 Equipo utilizado para el maderero terrestre y especificaciones técnicas
- 11 Análisis de varianza para densidad y agrupamiento de la densidad por profundidad
- 12 Análisis de regresión para densidad
- 13 Análisis de regresión para humedad
- 14 Agrupamiento de la resistencia al corte bajo condición ex-ante y después de la cosecha, y análisis de varianza
- 15 Muestreo por transectos

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo de este estudio fue evaluar los impactos al suelo generados por el desplazamiento de un *skidder* oruga, en la fase de maderero terrestre, bajo condiciones de cosecha final de un rodal de *Pinus radiata* de 25 años. El área de estudio, de una superficie de 13,42 hectáreas, está ubicado en la Décima Región de Chile sobre suelos de textura limo arcillosa y fue cosechado en la primavera del año 2002.

Se cuantificó la superficie alterada por las vías de saca y canchas, y el cambio en la densidad aparente del suelo, para las situaciones de maderero planificado y no planificado. La medición de la superficie alterada por la cosecha, consideró el levantamiento de todas las huellas en el caso de cosecha planificada y la observación visual de las alteraciones a través de transectos en la condición sin planificación.

Para determinar los cambios en las propiedades físico-hídricas se muestreó el suelo en dos etapas, una ex-ante de la cosecha, como control, y una después de la cosecha sobre las huellas de maderero.

Los resultados muestran que el 32,5% de la superficie del rodal quedó alterada por el maderero en la condición con planificación. De este porcentaje, las vías de saca con ahuellamiento y suelo mineral expuesto ocupan el 12%, las canchas cubren el 4% y el 16,5% restante corresponde a otras superficies transitadas por el *skidder* y con daño observable. En contraste, en el sector no planificado donde el operador del *skidder* podía elegir libremente sus vías de saca, un 50% de la superficie presentaba algún tipo de daño, de los cuales el 24% correspondió a huellas principales y secundarias.

Las determinaciones físicas, mecánicas e hídricas muestran un incremento de la densidad aparente y de la resistencia al corte y una ligera disminución de la conductividad hidráulica en los sectores transitados con respecto a la situación control, en los estratos evaluados de 0 a 10 cm y 10 a 20 cm de profundidad. Para la condición de huellas principales en maderero planificado, la densidad aparente llegó a ser el doble de la situación inalterada y un 38% mayor en el caso de huellas secundarias. Igualmente, en el sector no planificado, la resistencia al corte incrementó de 43 kPa para la condición ex-ante a 86 kPa después de cosecha. Sin embargo, la permeabilidad de la condición bajo huella principal sólo mostró una reducción del 8% en relación a la condición inalterada.

Se evaluó además, la recuperación de este tipo de suelos en vías de maderero usadas por *skidder* neumático hace 20 años. Hace 20 años, el suelo bajo las huellas de maderero de compactaron severamente hasta los 40 cm de profundidad, y los resultados muestran actualmente una recuperación de la densidad aparente en los primeros 20 cm de profundidad, mientras la compactación persiste a mayor profundidad. Hace 20 años, la densidad aparente en la superficie del suelo en áreas inalteradas era de 0,591 g/cm³ y de 0,964 g/cm³ bajo huellas de maderero. Hoy, la

densidad aparente en el estrato superficial sobre las huellas de madereo usadas hace 20 años es de 0,52 g/cm³, valor que es semejante a la condición inalterada original. Bajo los 20 cm de profundidad, la densidad aparente en las huellas de madereo antiguas indica que aún se mantiene del 64 al 72% de la compactación originada por el tránsito de los equipos.

Como conclusiones del estudio se pueden mencionar que la planificación de las vías de saca genera un beneficio ambiental, puesto que un menor porcentaje de la superficie del suelo se ve afectado por las operaciones de madereo. También, que para este tipo de suelos, las alteraciones del suelo generadas por el madereo se van mitigando con el tiempo, lográndose una recuperación de las propiedades gravimétricas e hídricas de los estratos superficiales después de 20 años, aún cuando la compactación permanece casi inalterada a profundidades de más de 20 cm, lo cual puede tener consecuencias degradantes en la productividad del sitio. Plantaciones con especies de menor edad de rotación podrían generar mayores impactos, ya que el madereo más frecuente impediría la recuperación de los niveles de compactación que ocurren en los estratos superficiales con rotaciones de 20 años.

Palabras claves: Compactación del suelo, maderero terrestre, recuperación del suelo

1. INTRODUCCION

Las operaciones forestales, especialmente la construcción de caminos y la cosecha, generan impactos sobre el ambiente. El tránsito de maquinaria asociado a la corta y el arrastre de trozas puede alterar la productividad de los sitios y ser fuente de producción de sedimentos y de procesos erosivos. Estas alteraciones, afectan las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del suelo, lo que pueden traer como consecuencia una disminución en el crecimiento de las plantas y por lo tanto en la producción. Sin duda, estos efectos están íntimamente relacionados con la sostenibilidad del negocio forestal y sobre todo con aquellas empresas que se encuentran bajo estándares de certificación.

Es por ello, que las empresas han asumido una mayor responsabilidad en los aspectos ambientales e implementado Sistemas de Gestión Ambiental (SGA). La premisa del mejoramiento continuo del comportamiento ambiental incluye diferentes medidas de mitigación de impactos, entre las cuales se destaca un mayor grado de planificación y una adecuada asignación de equipos. La mayor mecanización de las operaciones y mayor frecuencia de tránsito de maquinaria en el caso de plantaciones hace interesante el estudio de la interacción suelo – máquina – planta, para así cuantificar los impactos y orientarlos hacia la adaptación de medidas de mitigación.

Así, el tipo de equipo, los procedimientos de trabajo, la intensificación de las operaciones, el desarrollo de éstas en épocas de mayor humedad y el aumento de la mecanización en el maderero terrestre, son causales determinantes de la magnitud de los impactos al suelo y el agua, dando como resultado por una parte, un aumento en la carga del suelo modificando sus propiedades y funciones productivas y por otra, generando procesos erosivos y de producción de sedimentos. Por lo tanto, para adoptar las medidas de mitigación apropiadas, es necesario tener un conocimiento del nivel de impacto al suelo producto de las operaciones forestales.

Si bien, el diseño y planificación de vías de maderero en faenas de cosecha forestal mecanizada, es una técnica estudiada y aplicada desde hace años en países de tradición forestal como Estados Unidos y Nueva Zelanda, para disminuir la superficie alterada, en Chile no han tenido el mismo desarrollo (Martínez y Moyano, 1982). Esto también es válido para la Décima Región, donde se han desarrollado pocos estudios específicos que muestren la relación de los efectos positivos de la planificación sobre la disminución de los impactos sobre el suelo.

Para el caso de la evaluación de la extensión de las alteraciones, existen referentes canadienses que proponen estándares que fijan los niveles máximos aceptables de las alteraciones en las superficies netas a reforestar, sin embargo, no ocurre lo mismo para la intensidad del daño. Es así como, a menor distancia de maderero mayor es la densidad de caminos, lo que aumenta el potencial de producción de sedimentos y reduce el área neta por reforestar. A su vez, la reducción de la densidad de caminos implica mayores distancias de maderero, lo que puede aumentar la compactación del suelo en las vías de saca. Vías de saca de gran longitud también pueden aumentar la cantidad de producción de sedimentos y la

intensidad de la compactación cerca del camino, debido al mayor tránsito (MacDonald, 1999).

También la compactación puede alterar la capacidad de retención de agua del suelo, reduciendo la disponibilidad en suelos de texturas finas y gruesas. Por otra parte, la compactación puede reducir el tamaño de poros más grandes y ocasionalmente aumentar la retención de agua. Por lo tanto, una forma de medir la intensidad del daño, es midiendo el cambio de la densidad aparente, porosidad total, macro poros, la resistencia al corte y la tasa de infiltración, entre otras.

La solución al problema que afecta la productividad podría resolverse al menos de dos formas. Una, evitando la alteración del suelo tanto como sea posible con una buena planificación y otra, empleando medidas de rehabilitación del suelo. Prácticas como subsolados y manejo de desechos, son hoy ampliamente utilizadas y contribuyen a realzar otros valores medioambientales.

El objetivo general de este estudio es evaluar las alteraciones que produce el desplazamiento de un equipo de madereo terrestre con rodado oruga sobre el suelo, para las condiciones de madereo planificado y no planificado, y la capacidad de recuperación de un suelo bajo las vías de saca producidas hace 20 años por el madereo de un *skidder* neumático.

Los objetivos específicos de este estudio son:

- ♣ Determinar la superficie ocupada por distintos tipos de huellas y lugares transitados por el madereo terrestre, así como la superficie de canchas en un rodal de *Pinus radiata* D.Don sometido a cosecha final con vías planificadas y vías no planificadas.
- ♣ Determinar los cambios en la densidad aparente, porosidad y permeabilidad generados por distintas intensidades de tránsito de la maquinaria.
- ♣ Determinar la densidad aparente, resistencia al corte y permeabilidad, para cuatro profundidades, en huellas de *skidder* neumático después de 20 años.
- ♣ Determinar el comportamiento de la densidad aparente a través del tiempo para cuatro profundidades.
- ♣ Determinar niveles de recuperación del suelo en profundidad, después de 20 años.

2. MARCO TEORICO

En el marco teórico se caracterizan los impactos al suelo producidos por las operaciones forestales, revisado fundamentalmente el actual estado del arte referido a los métodos de medición de impactos, a las medidas de mitigación de las alteraciones generadas por el madereo y arrastre de trozas y, a la justificación de la planificación de vías de saca como mecanismo para disminuir el impacto al suelo. Además se incluye una breve revisión sobre el grado de recuperación de la densidad aparente de los suelos después de años.

2.1 Efectos de la cosecha y el madereo

En Chile, los terrenos de menos de 30 a 35% de pendiente se maderean de forma terrestre y los restantes con equipos de cables. Así, aproximadamente tres cuartas partes del madereo en plantaciones industriales se realiza de forma terrestre, mediante el empleo de *skidders* y *forwarders*, montados tanto sobre neumáticos como sobre orugas (INFOR, 1999). De forma correspondiente en la Décima Región (Chile) predomina igualmente el empleo de madereo terrestre.

Las investigaciones relativas al efecto del madereo sobre el suelo, concuerdan que los mayores impactos son derivados de dos fuentes: la compactación del suelo y la remoción de la materia orgánica del sitio. Estas alteraciones tienen su principal efecto sobre los regímenes de agua y aire del suelo, y desencadenan la mayor parte de los problemas que se presentan en estas faenas (Gayoso *et al.*, 2000)¹.

Es así, como las actividades comprendidas en el ciclo de cosecha de las empresas forestales corresponden a las que producen mayor impacto en el sitio y el suelo. Esta actividad después de la construcción de caminos, es considerada como la de mayor importancia, desde el punto de vista del efecto sobre la productividad del sitio.

Por tal motivo, las prácticas de cosecha convencionales a tala rasa son a menudo muy destructivas para los ecosistemas. La maquinaria pesada puede compactar el suelo y destruir la vegetación, mientras los altos volúmenes cosechados pueden contribuir a la erosión y pueden reducir la diversidad de las especies arbóreas y su capacidad regenerativa (CIFOR, 1998).

Es de vital importancia tener cuidado en la selección de la maquinaria para realizar las labores de cosecha y reducir el efecto que se genera bajo las diversas condiciones de trabajo, para lo cual debe ser acompañado de una planificación de actividades acorde con las condiciones propias del lugar, como de la capacitación y supervisión de operadores y equipos (Gayoso *et al.*, 2000).

¹ Gayoso, J.; D. Alarcón.; R. Sagardía.; R. Muñoz. 2000. Revisión Bibliográfica Programa de Conservación de Suelos. Forestal Mininco. 39 p. No publicado

Además, operaciones cada vez más intensas y el desarrollo de los grandes proyectos forestales, se han extendido hacia zonas climáticamente más lluviosas y hacia suelos de baja capacidad de soporte (Gayoso e Iroumé, 1993). Es por eso, que la intensificación de las operaciones forestales, el desarrollo de éstas en épocas de mayor humedad, el aumento de la mecanización ha producido un aumento en la carga del suelo modificando sus propiedades y funciones productivas.

Estos procesos de degradación de suelos generan impactos ambientales directos e indirectos sobre el sitio y fuera de él. En el sitio puede ocurrir pérdidas de suelo, de nutrientes, reducción de la superficie productiva y de los usos de la tierra, efectos sobre las obras de infraestructura y sobre la necesidad de modificar el manejo de la tierra. Fuera del sitio se puede generar sedimentación de cauces y acueductos, reducción de la vida útil de los embalses, obstrucción de obras de drenaje y riego, deterioro de la calidad físico química del agua, daño a los ecosistemas en general, alteración del balance hídrico, incidencia sobre el paisaje, etc.

La susceptibilidad de un sitio a la degradación es una propiedad intrínseca determinada por el carácter físico, climático y biológico de éste. Los factores relevantes y los criterios que determinan la fragilidad varían con la naturaleza del proceso potencial de degradación y la tecnología de cosecha a emplear. Algunos factores del sitio tienen relación con una cantidad de procesos de degradación (p.e. grado de pendiente), y aumentos en el gradiente contribuyen a un mayor riesgo de degradación potencial (Lewis *et al.*, 1991).

2.2 Principales impactos sobre el suelo

Dentro de los principales impactos a los cuales el suelo se encuentra expuesto, se pueden mencionar los siguientes:

- ♣ Variación de las propiedades físicas del suelo, debido al tránsito reiterado de la maquinaria, producto de la preparación de sitios, trabajo de subsolado, raleo, corta y madereo. Estos efectos adversos pueden ser muy significativos desde la perspectiva de una disminución en la productividad del sitio (Gessel, 1981; Routledge, 1987).
- ♣ Compactación, la cual altera las propiedades físicas y mecánicas del suelo y avanza a una condición menos favorable para el crecimiento de la planta, que a su vez lleva a la caída de la productividad del sitio y reduce el valor neto presente de cosechas de madera futuras (Gessel, 1981; Routledge, 1987).
- ♣ Calidad y cantidad de agua pueden verse afectadas producto de la cosecha de madera y la construcción de caminos forestales (Adams y Ringer, 1994).
- ♣ Erosión que se produce en el sitio, se verá agravada por la intensidad y duración de las precipitaciones. Importancia tiene también el tipo de precipitación, el largo

de la pendiente, lo escarpado que sea, la erodabilidad del suelo y la cobertura (Gayoso, 2000).

- ♣ Remoción del suelo, es un impacto producto de diferentes prácticas, tales como la acción directa de equipos de maderero, la acción del arrastre de las trozas cosechadas, el pisoteo de animales empleados en la cosecha y a movimientos de volumen de tierra en excavaciones u otras labores ligadas a la construcción de caminos forestales (Gayoso y Alarcón, 1999).
- ♣ Deslizamientos, son producto de la inestabilidad de los suelos, la cual puede verse acrecentada por actividades de construcción de caminos y métodos de cosecha que liberen de cubierta vegetal superficies considerables, como la tala rasa (Gayoso y Alarcón, 1999).
- ♣ Propiedades mecánicas, hidráulicas y químicas se ven afectadas además de las propiedades físicas del suelo, con consecuencia sobre la biota. La compactación genera una reducción de los macro poros, limita las posibilidades de intercambio gaseoso y consecuente disponibilidad de oxígeno, se reduce la entrada de materia orgánica y afecta los microorganismos del suelo (Bainbridge *et al.*, 1999). Arocena (2000), en un estudio sobre nutrientes señala que el grado de compactación y la pérdida de materia orgánica del piso del bosque tiene influencia directa sobre las tasas de meteorización de los minerales, la mineralización de nutrientes, y como consecuencia el crecimiento de las plantas. Jordan *et al.* (1999), pone en evidencia los efectos de las prácticas forestales sobre las poblaciones de nemátodos y biomasa microbiana, los que dependen de la materia orgánica y nitrógeno.

Por lo tanto, se puede hablar de alteraciones que afectan significativamente la productividad futura del suelo y del sitio, aquella que incluye procesos de erosión, compactación, remoción, amasado o desplazamiento, así como agotamiento de nutrientes, la variación del nivel de la napa freática, retracción y compactación por desecamiento, variación del microclima, provocando efectos sobre la microflora y microfauna, y efectos indirectos sobre áreas adyacentes (Gayoso y Alarcón, 1999).

Otros impactos corresponden al desplazamiento y remoción del suelo, la erosión y los deslizamientos. El desplazamiento y remoción de suelo es el movimiento físico del suelo por los equipos de maderero, el movimiento de las trozas y el movimiento de tierras de la construcción de caminos. Tal desplazamiento incluye la excavación y surcos generados por neumáticos, orugas, pisoteo de animales, arrastre de trozas y la exposición de suelo mineral (Gayoso y Muñoz, 1995). Los factores más determinantes del desplazamiento de suelo son la pendiente del terreno y la complejidad de las laderas, el tipo de maderero y patrón de desplazamiento de los equipos, el ancho y longitud de los caminos (Lewis, *et al.*, 1991).

La erosión es el desgaste de la superficie del suelo causada por agentes geológicos como agua, gravedad, viento y hielo (Gayoso y Alarcón, 1999). Una cierta tasa de erosión se considera normal e inevitable como resultado de procesos geológicos y

climáticos. La cosecha forestal puede contribuir a acelerar la erosión dependiendo de los factores del suelo, del terreno y el tipo y calidad de las prácticas que se ejecuten (Wästerlund, 1994). Esta erosión puede originar una reducción de la productividad como una consecuencia de pérdidas de nutrientes, materia, orgánica y minerales dentro del área de cosecha y efectos indirectos en lugares adyacentes como reducción de la calidad del agua y aumento de la sedimentación.

El movimiento del suelo por la fuerza de gravedad está presente en la mayoría de los terrenos con pendientes fuertes. Esta inestabilidad puede ser generada por la construcción de caminos y la tala rasa. En el primero de los casos se modifica el equilibrio de fuerzas en los taludes por la construcción de cortes y rellenos. En el segundo disminuye la resistencia de las raíces y las modificaciones del agua freática pueden producir zonas de saturación y aumento de la presión de agua en los poros.

Gayoso, *et al.* (1991), determinaron que los caminos, canchas y vías de saca no planificadas para maderero con *skidder* cubre hasta un 53,5% de la superficie cosechada. En cuanto a la intensidad del daño, el aumento de la densidad aparente bajo huella alcanza hasta un 1,85 veces la densidad de áreas no alteradas.

2.3 Compactación

La compactación está entre los efectos más estudiados de las operaciones forestales. La compactación ocurre cuando el suelo es presionado, obligando a las partículas a ponerse más en contacto unas con otras, mediante la expulsión del aire o agua de los poros. Los cambios en la estructura del suelo compactado, reducen el tamaño y continuidad de los poros, y aumenta la densidad del suelo. El tránsito de ruedas y la presión ejercida sobre la superficie de suelo por animales, vehículos, y la gente pueden causar la compactación de suelo (USDA, 2001). Como consecuencia, esto puede causar una disminución en el crecimiento de la planta, dificultando la penetración de las raíces al suelo, ya que tienen menos aire para respirar, el suelo es saturado más rápido cuando llueve y permanece más tiempo frío en la primavera (Arnup, 2000).

La compactación puede ocurrir después de que el equipo pesado ha realizado varias pasadas sobre el mismo suelo, especialmente cuando el suelo está húmedo. Suelos orgánicos no están sujetos a los efectos adversos de la compactación. Aunque las prácticas que causan la compactación pueden dejar poca evidencia visible, la compactación severa reducirá el crecimiento del árbol. Sobre sitios de suelo minerales, la compactación a menudo es asociada con ahuellamiento (Arnup, 2000).

La compactación es causada por las fuerzas que los equipos transmiten al suelo, estáticas y dinámicas, las que generan un reacomodo de las partículas del suelo y pérdida de estructura del mismo, aumentando la densidad aparente y la resistencia al corte (Bryan y Adams, 1994; Gayoso e Iroumé, 1993; Toro, 1991).

Resumiendo, se puede decir que la compactación resultante depende del tipo de suelo, de las condiciones de humedad, del peso de equipo, la presión de inflado o presión básica entregada al suelo, de la existencia o no de una capa protectora y del número de pasadas del equipo de madereo (Adams y Froehlich, 1981; Mc Donald *et al.*, 1996)). Sin embargo, son muchos quienes afirman que el factor más determinante corresponde al contenido de humedad (Seixas y Mc Donald, 1997).

2.3.1 Extensión del daño

Krag *et al.* (1986) demuestran que el madereo con *skidder* en terrenos con pendiente generan más alteraciones al suelo que el madereo con cables, en promedio 40 a 45% contra 22 a 30% respectivamente. Además, el porcentaje de suelo alterado por el madereo terrestre en verano varió entre 29 y 65%, mientras en invierno varió entre 14 y 53%.

Alarcón (2001), comentando el trabajo desarrollado por Monroy (1981), en la provincia de Valdivia, señala que el daño por madereo puede alcanzar a 38,8% de superficie alterada por vías secundarias, vías principales y canchas de carguío.

Brais (1997), reporta para madereo con *skidder* de orugas, 34% de área de huellas en suelo de textura fina y media y 41% en suelos arenosos. Senyk y Craigdallie (1997), reportan que para distintos tratamientos, se encuentran de suelo total alterado un 27 a 39%, incluyendo caminos, canchas, cortafuegos y vías de saca.

Wästerlund (1994), en un trabajo de revisión bibliográfica, señala que en áreas de cosecha a tala rasa, las huellas de los *skidders* ocupan de 15 a 35%, mientras que el área total alterada puede alcanzar al 80%. Además, reporta que el empleo de vías de saca preestablecidas a espacios regulares para madereo con *skidders* con huinche, puede hacer disminuir el área ocupada por las vías a sólo 8% y que ello no aplica para el caso de *skidder grapple*.

Gayoso e Iroumé (1993), señalan que para una condición de madereo con *skidder* en temporada de invierno, las vías de saca ocupan hasta el 40% de la superficie. Caminos y canchas cubren un 13% adicional.

Alarcón (2001), determinó que la superficie alterada por el empleo de tractores articulados durante la explotación cubre del 62 al 73% de la superficie total, en sectores donde no hubo planificación de las líneas de madereo.

Además, si se considera que ocurrirán sucesivas rotaciones, el daño al suelo puede irse acumulando aunque a su vez el suelo se torna más resistente (Lacey y Ryan, 2000).

El Ministerio de Bosques de British Columbia (Canadá), en su guía de conservación de suelos, señala que el área ocupada por canchas y vías excavadas deben ser desactivadas y restauradas a un estado productivo (Ministry of Forests, 1995). Con respecto al suelo alterado dentro del área neta a reforestar (ANR) generado por el

tránsito de equipos y arrastre de trozas, se recomienda no supere el 5 a 10% de la superficie según las condiciones de fragilidad de los suelos.

2.3.2 Intensidad de la compactación

Las investigaciones con relación al efecto del madereo sobre el suelo, coinciden en que los mayores impactos son producto de dos fuentes: la compactación del suelo, y la remoción de la materia orgánica del sitio. Estas alteraciones tienen su principal efecto sobre los regímenes de agua y aire del suelo, originando la mayor parte de los problemas que presentan estas faenas.

El aumento de la densidad reduce la porosidad, especialmente los macro poros, los que juegan un importante rol para el crecimiento de las raíces y desarrollo de la flora y fauna del suelo, genera una menor aireación del suelo y una menor mineralización de los nutrientes por la reducción de la tasa de intercambio gaseoso, sobretodo si la materia orgánica es enterrada en el suelo mineral (Greacen y Sands, 1980).

El grado de compactación resulta de una combinación de factores del suelo, espesor y naturaleza de la hojarasca, la textura, estructura, contenido de humedad y consolidación, y, la clase, magnitud y número de repeticiones de las fuerzas aplicadas. El factor más crítico que determina la severidad de la compactación es la humedad del suelo. En condiciones saturadas se podrá esperar un ahuellamiento excesivo y destrucción de la estructura del suelo.

Según los estudios realizados por Lineros *et al.* (1997), los equipos mecanizados provocan compactación del suelo, disminuyen el número de macro poros restringiendo de esta forma el movimiento de agua y nutrientes a través del suelo; además, aumentan la densidad aparente, aumenta la resistencia del suelo, reduce el intercambio del aire, disminuye la infiltración del agua y permeabilidad.

En otros estudios realizados por Gayoso (1982), en ensayos en suelos representativos de la zona de Los Lagos, obtuvo que el madereo altera la superficie del suelo incrementando la densidad aparente y la resistencia a la penetración. Las vías de saca transitadas por tractores articulados presentan una mayor compactación del 53% al 55% en superficie, siendo mayor que la producida por los restantes equipos de madereo (bueyes y tractor articulado en forma conjunta), en comparación con el suelo del bosque, lo que se traduce en una pérdida de crecimiento en altura del orden del 24 al 30%. El mayor efecto de compactación se produce en las vías de saca principales y en los sectores de cancha, y es causado principalmente por el efecto dinámico. Esto es el desplazamiento tracción y vibración de las máquinas.

Según los estudios realizados por Kay (1997), el impacto de vehículos de ruedas neumáticas u orugas, así como el arrastre de trozas tiene el potencial de concentrar agua y generar sedimentos que a su vez pueden tener los siguientes impactos negativos:

- ♣ Huellas profundas en el suelo. Esto tiene el potencial de acumular y transportar agua a través de las huellas creadas. La generación de sedimentos resulta del volumen y la velocidad excesivos del agua concentrada.
- ♣ Destrucción del suelo del bosque. Los puntos en que el suelo removido y extraído tiene la capacidad de acumular agua. Esto a su vez puede evitar el crecimiento de especies maderables en los lugares afectados.

La compactación puede extenderse a una profundidad considerable del perfil del suelo y la mayor compactación ocurre durante las primeras pasadas de la maquinaria. La resistencia del suelo aumenta, mientras la porosidad total, agua disponible, volumen del aire, tasa infiltración y la saturación disminuyen. Como consecuencia, se puede reducir el crecimiento del árbol, debido a restricciones en el desarrollo de la raíz, suministro del agua y aire. Además, el escurrimiento superficial aumenta y se promueve la erosión del suelo (Cullen *et al.*, 1991).

Kay (1997), menciona que la compactación de la superficie puede obstaculizar el desarrollo efectivo de las especies aprovechables y acelerar el escurrimiento de agua. Se puede planificar el empleo de métodos de aprovechamiento que causan compactación de suelos, siempre que exista el compromiso de descompactarlo una vez finalizada la extracción y antes del establecimiento del nuevo turno.

Las variables que inciden sobre el grado de compactación son: el contenido de humedad del suelo, su textura, vibración de las máquinas de cosecha, tiempo y número de pasadas de la maquinaria en el mismo sector y tipo de neumático usado (Alarcón, 2001).

Aún cuando resulta difícil decidir el límite de aumento de la densidad a partir del cual se puede caracterizar a un suelo como alterado, el Servicio Forestal del USDA (USDA, 2001), emplea como valor umbral un incremento del 15% con respecto a la condición inalterada.

2.3.3 Efecto sobre el prendimiento y la productividad del sitio

Senyk y Cragdallie (1997), observaron diferencias substanciales en el crecimiento de plántulas de coníferas luego de tres años de establecidas. El promedio de altura de las plantas en las huellas más compactadas, fue 27 a 31% menor en comparación con las plantas creciendo en sectores adyacentes no alterados.

Por otro lado, de acuerdo a antecedentes recopilados por Alarcón (2001), el efecto de la compactación expresada en disminución de crecimiento (diámetro y altura), en términos de volumen llega a ser de un 56 - 59% menor que el obtenido en sectores menos alterados. Esta disminución se mantiene durante los años observados (seis años) y de acuerdo a la bibliografía este efecto se alcanza hasta la edad adulta del árbol, aunque muestra algunos signos de recuperación, siempre que las solicitaciones no sean tan grandes que el suelo se deforme hasta un estado

irreversible, situación que se logra modificándose más allá del 50% de la densidad inicial, desde cuyo valor nunca podrá llegarse a las densidades originales.

Alarcón (2001), concluyó que las plantas establecidas en suelos compactados tienen un crecimiento significativamente menor, 30% en altura y 23% en diámetro, que las observadas sobre suelo inalterado.

2.4 Planificación de vías de saca y mitigación de impactos

La compactación del suelo causada por las operaciones forestales ha recibido considerable atención en la literatura, sin embargo, pocas referencias dan evidencia cuantitativa de los beneficios de la planificación de las vías de madereo para disminuir los impactos al suelo. Froehlich *et al.* (1981), señalaban que la planificación de las vías de saca acompañada de volteo dirigido, podía reducir en dos tercios el área compactada. Froehlich y McNabb (1984), promovían el diseño anticipado de vías de saca como un medio para restringir la compactación del suelo. Ello se basaba en el hecho que la mayor parte del daño a la estructura del suelo es causado por los primeros desplazamientos de la maquinaria. Sin embargo, la distribución del tránsito por sobre toda la superficie permanece como una opción cuando las pasadas iniciales causan sólo menores cambios en las propiedades estructurales del suelo.

En un estudio realizado por Pinard *et al.* (2000), en Malasia, se manifiesta la importancia de la planificación en los impactos producidos por labores de cosecha. Se examinó la alteración asociada a madereo con bulldozer y la regeneración en vías de saca. En sectores con cosecha controlada, 17% de la superficie quedó cubierta por vías de saca, en tanto en las que se utilizó prácticas de madereo de impacto reducido fue 6%, además de estar menos alteradas. En el madereo convencional 84% de la superficie de las vías de saca manifestó alteración al suelo mineral, en tanto que en la planificada, esta conservó en un 62% su estado.

La actividad forestal se está volviendo cada vez más competitiva y son factores clave la disminución de los costos como el aumento de la producción. Es por ello, que la conservación de los suelos sometidos a uso es tanto un problema económico como ambiental. Lo anterior conduce a la necesidad de estudiar los efectos beneficiosos que podría tener la planificación anticipada de las vías de saca en el madereo forestal.

Aún cuando es una situación sobre la cual se ha hecho conciencia, y ha conducido en algunas partes del país al uso de equipos de cosecha más apropiados, dejando los terrenos sobre 35% de pendiente para ser cosechados por equipos con cable, existen diferencias con las prácticas que utilizan países como Canadá. Es el caso de la planificación anticipada de las vías de saca y la desactivación del exceso de alteraciones en la superficie neta a reforestar (McDonald, 1999).

Experiencias de otros países, como en Malasia, Brasil, Indonesia, Camerún, Bolivia, Tanzania y Zambia, entre otros, muestran que la adecuada planificación en las

operaciones de cosecha y la utilización de equipos apropiados conducen a mantener la productividad del sitio (CIFOR, 1998).

Existen investigaciones que han hecho mediciones del patrón de desplazamiento mediante el empleo de GPS. La utilización de este sistema permite evaluar la relación existente entre las respuestas físicas del suelo y la intensidad del tráfico producto de las diferentes operaciones de cosecha con maquinaria mecanizada. Estos estudios, intentan mostrar que la adecuada planificación de las operaciones forestales, disminuyen los impactos sobre las propiedades físicas del suelo, permitiendo aumentar la productividad de los bosques futuros y el mantenimiento de los suelos (Carter *et al.*, 1999).

La planificación de vías de saca resultan efectivas, ya que conducen a una menor superficie alterada por el tránsito de maquinaria (Carter *et al.*, 1999). El diseño y preestablecimiento de las vías de saca, para que tenga resultado positivo, requiere también un volteo dirigido (Garland, 1983).

Sin embargo, Kockx y Krag (1993), y Senyk y Craigdallie (1997), encontraron sólo pequeñas diferencias en los niveles de alteración del suelo, entre métodos de localización de vías de saca preplanificadas y de libre elección del operador.

2.5 Remanente de compactación en el tiempo

La compactación pasa a ser un problema cuando el aumento de la densidad y disminución del espacio poroso limitan la infiltración, percolación y almacenaje del agua, el crecimiento de las plantas o el ciclo de nutrientes (USDA, 2001). En suelos alterados, la expansión de raíces, la microfauna del suelo, ciclos de hielo deshielo, mojado y secado son importantes para crear poros y estabilizar los agregados del suelo. En muchos sitios, el más importante requerimiento para restaurar la productividad del suelo consiste en disminuir la compactación por medios mecánicos y restaurar el sistema poroso para que el agua y el aire se puedan mover libremente a y desde las raíces de las plantas (Bulmer, 1998).

La recuperación natural de los suelos es generalmente lenta y puede necesitar años o décadas, según el grado de alteración. Ciclos de mojado y secado, y de contracción y expansión pueden romper las capas compactadas, especialmente en arcilla y arcillas limosas (USDA, 2001). La compactación en profundidad persiste más tiempo porque es menos afectada por los agentes externos. Hatchell *et al* (1970), estimó que se puede esperar una recuperación a las condiciones originales después de 18 años. Sin embargo, Went y Thomas (1981), reportaron que la compactación permanecía severa aún después de 32 años. También Adams y Froehlich (1981), señalan que la compactación en el suelo puede persistir por décadas.

3. DISEÑO DE INVESTIGACION

3.1 Antecedentes generales del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el predio Los Pinos, de propiedad del Centro Experimental Forestal (CEFOR), el cual depende de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile. Se encuentra en la ribera sur del río Cayumapú a 15 km al norte de la ciudad de Valdivia, Décima Región (Chile), bordeando el camino que une la ciudad con la carretera cinco sur, en los 39°44' y 73°11' latitud sur (Uyttendaele, 2000).

Dentro de dicho predio se encuentra el rodal en estudio, cuya superficie es de 13,42 hectáreas, el cual se encontraba cubierto por una plantación de *Pinus radiata* D. Don, establecida en el año 1977 con una densidad inicial aproximada de 2.000 árboles por hectárea. Antecedentes disponibles indicarían que dicha plantación fue probablemente manejada con una poda y dos raleos, dejando una densidad final de 570 árboles por hectárea. Esta plantación fue cosechada entre Septiembre de 2002 a Enero de 2003.

Se midieron además, huellas abandonadas en dos rodales del mismo predio, uno de 7,02 ha cosechado en primavera del año 1981 y otro de 7,62 ha cosechado en invierno del año 1980. Ambos rodales tuvieron plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, y fueron cosechados sin planificación con *skidder* neumático y reforestados con *Cupressus lusitanica* y *Pinus radiata* respectivamente. La Figura 1 muestra la localización de los rodales estudiados.

Predio Los Pinos

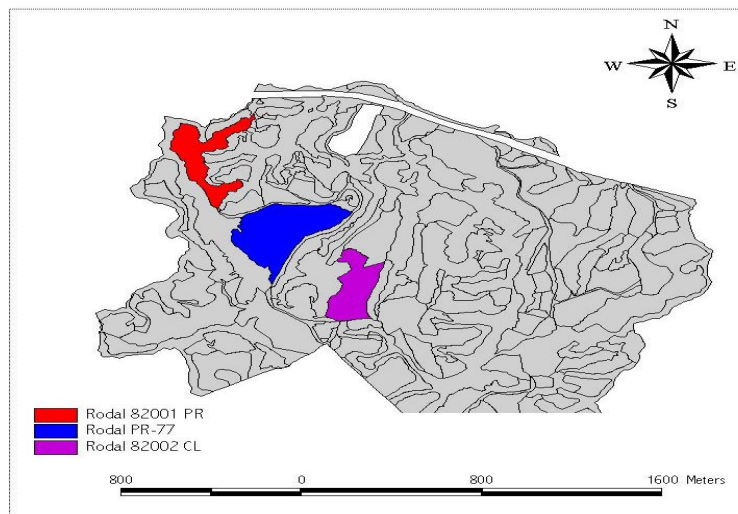


Figura 1. Predio los Pinos, localización de los rodales estudiados.

El clima de la zona corresponde al denominado templado lluvioso con influencia mediterránea, se caracteriza por la irregularidad de las precipitaciones en distribución mensual y anual las que superan los 2.000 mm/año, concentrándose principalmente en el período comprendido entre Mayo y Agosto (Fuenzalida, 1971).

La temperatura media anual bordea los 12,1°C, con un máximo medio mensual de 16,9°C en enero y un mínimo medio de 7,6°C en julio.

La red vial del predio está formada por una ruta de tránsito permanente que permite un rápido y fácil acceso a cada uno de los rodales a través de caminos secundarios y terciarios de ripio y tierra (Ver anexo 2).

El predio incluye áreas de bosque nativo (renovales) y diversos tipos de plantaciones principalmente con especies exóticas. Algunas de estas plantaciones están destinadas a experimentación, con el objetivo de servir de apoyo a las actividades de docencia que imparte la Facultad de Ciencias Forestales (Ver anexo 3).

La vegetación nativa existente en el predio corresponde al denominado bosque valdiviano, caracterizado por la presencia de *Nothofagus dombeyi*, *Laurelia philippiana*, *Aextoxicon punctatum* y *Eucryphia cordifolia*, además de otras especies que se encuentran de forma aislada como *Persea lingue*, *Gevuina avellana*, *Drimys winteri* y *Podocarpus* sp. (Schlegel y Martínez, 1987) (Ver anexo 5).

Los suelos pertenecen a la serie Los Ulmos, los cuales se encuentran en la provincia de Valdivia, ubicados en la comuna de Valdivia, Paillaco, La Unión y Corral. Se presentan en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa a una altura promedio entre los 100 y 280 m.s.n.m. Son suelos rojo arcillosos originados a partir de cenizas volcánicas antiguas que se depositaron sobre el complejo metamórfico de la costa. La topografía es compleja con pendientes dominantes superiores a 15% con sectores fuertemente ondulados 15 – 20% y moderadamente ondulados 5 – 20% (IREN, 1978).

3.2 Estudio de efectos del madereo planificado sobre el suelo

Esta parte del estudio comprendió mediciones para determinar tanto la extensión o superficie alterada por el tránsito del *skidder* oruga, como la intensidad del daño en los sectores ocupados por huellas de madereo.

El estudio tiene las limitaciones propias de las restricciones que impone la actividad de la empresa patrocinadora. Por lo tanto, el predio, rodal y equipo de cosecha son fijos, y corresponden a las faenas programadas por la Empresa, debido a lo anterior no se efectuaron repeticiones en otros sectores.

3.2.1 Planificación de las vías de saca

Considerando que una de las finalidades del estudio era determinar las alteraciones bajo condición de cosecha planificada, se procedió en base a la información cartográfica existente a delimitar la fracción del rodal que sería sometido a cosecha y a planificar las vías de saca. El área de estudio alcanza aproximadamente 7 ha, con una pendiente media del terreno de 25%. La planificación de la cosecha tomó en cuenta los caminos existentes, el equipo de madereo y volteo dirigido. Se consideraron dos vías principales con un espaciamiento de 100 metros entre ellas y de una longitud aproximada de 250 metros. Debido a la localización del camino estabilizado existente, el madereo se debió programar contra la pendiente.

A cada vía de saca planificada se le unen varias vías de arrastre, las cuales siguen un ángulo aproximado de 30°, que depende de las condiciones topográficas del sector. En los sectores con pendientes esta vía de arrastre se desarrollará siguiendo la pendiente, para evitar inestabilidad del equipo (Ver anexo 6).

3.2.2 Diseño del muestreo ex-ante o condición previa a la cosecha

Con la finalidad de caracterizar el estado del suelo antes de las operaciones de cosecha y así poder tener una línea de base para efectuar las comparaciones con la situación post cosecha, se procedió a muestrear sistemáticamente el rodal de *Pinus radiata* (1977), formando una cuadrícula de aproximadamente 60 m de lado. Las muestras y mediciones se practicaron entre septiembre y octubre de 2002 sobre puntos georreferenciados.

El número de puntos controlados fue de 27, en los cuales se tomaron las siguientes muestras en dos estratos:

- ♣ Una muestra por punto para estudio gravimétrico (densidad aparente, densidad real, porosidad total), profundidad 0 a 10 cm.
- ♣ Una muestra por punto para estudio gravimétrico, profundidad 10 a 20 cm.
- ♣ Una muestra por punto inalterada para determinación de permeabilidad.
- ♣ Una muestra por punto para clasificación, de 1,5 a 2 kg en cada estrato .

Adicionalmente se midió la resistencia del suelo mediante veleta de torsión, realizando 5 mediciones en cada uno de los puntos muestreados, a una distancia de 0,5 m alrededor del punto de muestreo, siguiendo el procedimiento estándar.

Las muestras para los estudios gravimétricos y los ensayos de resistencia al corte fueron tomadas tal como se observa en la Figura 2.

El análisis de los valores obtenidos permite cuantificar la variación existente sobre las propiedades actuales del suelo en el rodal.

La localización de las muestras de manera sistemática pretende cubrir toda la variabilidad del rodal y condiciones de posición en la ladera. Además, la intensidad del muestreo pretende conducir a un error menor al 10% en las mediciones de densidad aparente.



Figura 2. Toma de muestras en terreno, veleta de corte y cilindros

3.2.3 Diseño/Medición del muestreo post cosecha o determinación de la extensión de la superficie alterada

El muestreo estuvo dirigido a determinar la superficie que ocupan los distintos tipos de huellas en el rodal y los cambios que se producen en la densidad aparente, porosidad y permeabilidad con respecto a la situación de origen.

La determinación de las áreas alteradas se realizó por medio de observación visual de la condición del suelo en los sectores transitados, y mediciones de la longitud de cada tipo de huella mediante odómetro, con mediciones del ancho de la huella cada 20 metros. La superficie total cosechada, las canchas y otras áreas alteradas, donde se apreciaba tránsito pero era muy difícil seguir las huellas, se midieron con ayuda de GPS. Las mediciones de longitud se corrigieron por pendiente media a base planimétrica. El recuento de las superficies en cada categoría se expresa como porcentaje del área neta del rodal o superficie a ser reforestada (ANR).

La superficie se estratificó en seis niveles: sin alteración aparente o área bajo residuos que hace imposible la verificación de daño en terreno, área de canchas, área ocupada por huellas de madereo con tres niveles de intensidad de uso y otras áreas alteradas. La superficie ocupada por los caminos se excluye de la evaluación:

Condición daño tipo 1 o huellas principales. Corresponde a una huella claramente identificable en sectores próximos a canchas o donde se aprecia huellas profundas y remoción correspondientes a un alto número de pasadas del equipo de madereo. El suelo presenta generalmente exposición de suelo mineral, amasado, desplazamiento lateral y remoción de la capa orgánica (Ver anexo 7).

Condición daño tipo 2 o huellas secundarias. Corresponde a una huella claramente identificable con exposición de suelo mineral, remoción de la capa orgánica y huellas de profundidad menor, generalmente en sectores alejados de las canchas o en vías complementarias a las centrales planificadas (Ver anexo 8).

Condición daño tipo 3 o huellas terciarias. Aquellas donde las orugas del equipo de madereo estaban marcadas, pero sin causar ahuellamiento o remoción del suelo, probablemente corresponda a una sola pasada del equipo.

Condición daño tipo 4 o sectores de canchas. Sectores donde hubo movimiento de tierra o al menos nivelación y que fueron transitadas por el skidder, y por el equipo de clasificación y acumulación de trozas.

Condición sin daño aparente. Superficie restante aparentemente no alterada por el tránsito de los equipos, pero que puede haber sido afectada por el arrastre de trozas o que no puede ser evaluada por estar cubierta de desechos (Ver anexo 9).

Condición no evaluable. Corresponde a la situación donde el suelo se encuentra cubierto por desechos de la cosecha o aquellas áreas que fueron madereadas con otros equipos, como el caso del área adyacente a camino madereado con bueyes y donde por lo consiguiente no es corresponde incluir.

Se prefirió este método de medición directa al método de transectos propuesto por el Ministerio de Bosques de British Columbia, Canadá (British Columbia Ministry of Forests, 1995), debido al limitado tamaño de la superficie y a la facilidad que presentaba el ordenamiento de las vías como resultado de la planificación de las mismas. Se efectuó el reconocimiento del área y calibró la apreciación visual de los tipos de huellas. Luego, de forma sistemática se recorrió el rodal de Sur a Norte y Este a Oeste, siguiendo las huellas principales y sus bifurcaciones, midiendo la totalidad de las longitudes de los tres tipos de huellas y sus anchos. Además, se midió la superficie ocupada por áreas alteradas donde no era visible el ahuellamiento y la superficie de canchas.

3.2.4 Medición de la intensidad de los cambios

Los cambios se midieron esencialmente sobre la densidad aparente del suelo. Se tomaron muestras sobre los tres tipos de huellas para determinación de la densidad aparente, la porosidad total y la permeabilidad, cubriendo los estratos de 0 a 10 cm y 10 a 20 cm. Las muestras de suelo se tomaron sistemáticamente siguiendo las

huellas principales y secundarias desde las canchas hacia el bosque, cada 50 metros. Las muestras sobre las huellas terciarias se tomaron de manera arbitraria cubriendo los distintos sectores del rodal. Las muestras cubrieron un total de 82 unidades.

3.3 Estudio recuperación natural de la densidad y permeabilidad en huellas después de 20 años.

Se eligieron dos rodales, uno de 7,62 ha y otro de 7,02 ha,. El primero corresponde a un rodal reforestado en el año 1982 con la especie *Pinus radiata*, caracterizado como Pr-82001 y el otro rodal reforestado en el año 1982 con la especie *Cupressus lusitanica* caracterizado como CI-82002. Ambos rodales fueron cosechados en el año 1980 y 1981 respectivamente, habiendo certeza de que el madereo se realizó empleando un skidder de ruedas neumáticas, y para los cuales existen algunos antecedentes de las alteraciones del suelo. En la Figura 3 muestra la evidencia dejada por el *skidder* neumático, una vez finalizada la faena de cosecha en el año 1981.



Figura 3. Rodal CI-81-1 cosechado en el año 1981.

Se recorrió cada rodal, localizando huellas antiguas de madereo, procediéndose a su limpieza. Los sectores se eligieron de tal forma que correspondieran a huellas principales, donde hubo remoción y ahuellamiento y próximas a caminos o canchas,

lo cual asegura que hubo alto nivel de tránsito. Los sectores dentro de estas huellas se eligieron de manera arbitraria, pero de alguna forma visualmente correspondientes a la situación más común.

En cada sector se muestreó la densidad aparente del suelo en cuatro estratos, de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 y 30 a 40 cm de profundidad, tal como lo muestra la Figura 4. Además se tomaron tres muestras para permeabilidad en cada sector y se complementó la toma de muestras con 289 mediciones de la resistencia a la torsión medida con veleta de corte.



Figura 4. Toma de muestras en huellas antiguas de maderero en Rodal CI-82

Igualmente en cada rodal se identificó un lugar que pudiera servir de control, próximo a las quebradas, donde aún hay presencia de bosque nativo y dos situaciones en la misma área alteradas el año 2001. Se tomaron un total de 150 muestras de densidad aparente. El análisis comprende dos rodales, cuatro profundidades y 4 condiciones de alteración.

Además, se levantó la situación inalterado y dos situaciones de vías de saca y cancha operados en el año 2001

3.4 Determinaciones físico hídricas

Para la determinación de las propiedades físicas e hídricas del suelo se realizaron los siguientes análisis:

♣ **Densidad aparente (Da):** Es la relación entre la masa (seca al horno) de las partículas del suelo y el volumen total, incluyendo el espacio poroso que ocupan, expresada en g/cm^3 . Se determinó mediante cilindros de 120 cm^3 de muestras no alteradas. Las muestras se obtuvieron en profundidades de cero a diez y de diez a 20 centímetros, de muestras no alteradas (Forsythe, 1980).

♣ **Densidad real (Dr):** Corresponde a la masa de los sólidos secos por unidad de volumen de suelo, sin el espacio poroso, expresada en g/cm^3 . Se determinó según la norma ASTM D854 y C127 modificadas, método por desplazamiento volumétrico, en agua, temperatura controlada, extracción de aire por vacío.

♣ **Contenido de Humedad (H%):** Expresada como porcentaje, se entiende por ella la masa del agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo. Se determinó según norma de ASTM D2216-17 (Forsythe, 1980).

♣ **Porosidad Total (Pt):** La porosidad indica la relación existente entre los macro y los micro poros y el volumen total de suelo. Se obtuvo de la relación entre la densidad aparente y la densidad real (CONAMA, 1996).

♣ **Granulometría:** La granulometría o distribución de las partículas de suelo, se determinó mediante el análisis mecánico por tamizado y a través de la velocidad de sedimentación de las partículas. Se determinó según la Norma ASTM D422 (Gayoso, 1985).

♣ **Límites de Plasticidad:** Se determinó el Límite Líquido e Índice de Plasticidad de los suelos según norma NCh 1517/I/II siguiendo el método de los puntos múltiples.

♣ **Permeabilidad:** Se midió la conductividad hidráulica de los suelos mediante permeámetro de carga constante sobre muestras inalteradas de 900 cm^3 (Head, 1982).

♣ Ensayo de corte en terreno por veleta de torsión TORVANE.

3.5 Análisis de la información

Toda la información proveniente de las mediciones de terreno y la generada de los análisis de suelos, se sometió a la estadística descriptiva. Mediante análisis de varianza se determinó la existencia de diferencias significativas entre las propiedades del suelo antes de la cosecha con aquellas resultantes en los distintos tipos de

alteración y los niveles de recuperación a través del tiempo. Para el análisis y salidas gráficas se utilizó el software Statgraphics versión 5.0 Plus.

De manera complementaria se estudiaron modelos de regresión lineal para relacionar la densidad aparente y mediciones de corte con veleta TORVANE y densidad aparente y permeabilidad.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Importancia del cambio de la densidad aparente como efecto de la cosecha planificada

4.1.1 Caracterización de los suelos de la unidad de estudio

Los suelos de la unidad de estudio se clasifican de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) como limos arcillosos de alta compresibilidad (Rico y del Castillo, 1988). Esto significa que desde el punto de vista del comportamiento mecánico, presentan baja capacidad de soporte en condiciones de alto contenido de humedad, siendo susceptibles a sufrir alto riesgo de compactación y amasado por tránsito de maquinaria, Cuadro 1 (British Columbia Ministry of Forest, 1995).

Cuadro 1. Clasificación de los suelos de las unidades de estudio

RODAL	ATRIBUTO	UNIDAD	PROFUNDIDAD	
			0 a 10 cm	10 a 20 cm
Predio Los Pinos Sección PR-77 Rodal 1	Arena	%	35	25
	Limo	%	42	45
	Arcilla	%	23	30
	Límite Líquido	%	90	59
	Índice de plasticidad	%	32	21
	Clasificación USCS	-	MH	MH
	Humedad	%	86,43	52,81
	Densidad aparente	g/cm ³	0,475	0,724
	Porosidad	%	79,68	70,00
	Permeabilidad	cm/min	0,13	-
	Resistencia al corte	kPa	43,4	-

Nota: MH: Limos arcillosos de alta compresibilidad

El alto contenido de humedad refleja las condiciones del suelo del mes de octubre de 2002, inmediatamente antes de iniciar las operaciones de cosecha. A pesar que esta área corresponde a un rodal de segunda rotación de *Pinus radiata* que fuera cosechado hace 26 años, transitada por bueyes y tractores, presenta en el estrato superficial una densidad aparente y porosidad que se puede considerar semejante a la condición original (Monrroy, 1981).

La mayor densidad presente del estrato de 10 a 20 cm de profundidad, puede deberse al uso y compactación anterior, al menor contenido de materia orgánica, menor actividad de microorganismos y a diferencias en la textura del suelo.

4.1.2 Cambios atribuibles a la cosecha, sección PR-77 Rodal -1

Los principales resultados muestran un incremento de la densidad aparente y consecuente compactación del suelo en las áreas transitadas por *skidder* en las dos profundidades estudiadas, Cuadro 2.

Cuadro 2. Variación de la densidad aparente por tránsito

CONDICIÓN	Estrato 0 – 10 cm		Estrato 10 – 20 cm	
	g/cm ³	% Variación	g/cm ³	% Variación
Ex antes	0,475	-	0,724	-
Huella Terciaria	0,657	34,3	0,767	5,9
Huella Secundaria	0,619	30,3	0,744	2,8
Huella Principal	0,956	101,3	0,996	37,6

Analizada la variabilidad de la densidad aparente, se pudo comprobar que la condición de alteración como en la de estrato tienen un efecto estadísticamente significativo sobre ella (95% de nivel de confianza), Anexo 11. Sin embargo, no se encontraron diferencias entre las densidades de las huellas secundarias y terciarias. Por medio del test de rangos múltiples de Bonferroni, Cuadro 3, se logra el agrupamiento de la densidad en tres bloques diferenciados, el primero corresponde a la condición inalterada, el segundo agrupa las condiciones de huellas terciarias y secundarias y el tercero comprende a la situación de huellas principales.

Cuadro 3. Agrupamiento de la densidad por tipo de alteración. Test de rangos múltiples de Bonferroni

CONDICIÓN	N	MEDIA	ERROR ESTÁNDAR	GRUPOS HOMOGÉNEOS		
0: inalterado	54	0,599258	0,0157471	A		
1: h. terciaria	20	0,71206	0,0258751		B	
2: h. secundaria	12	0,681864	0,0334046		B	
3: h. principal	22	0,976271	0,0246709			C

Esto significa que el impacto al suelo es dependiente de la intensidad del tránsito, a mayor intensidad mayor es la densidad. Sin embargo, entre la condición 1 y 2 que corresponde a las huellas secundarias y terciarias, no se aprecia diferencias significativas. Esto indicaría que aún cuando el número de pasadas sea bajo (huellas terciarias) se produce un efecto de compactación indiferenciado, en relación ha huellas con tránsito medio. Esto puede deberse, como señala la literatura, que la mayor parte de los cambios en la densidad ocurren con las primeras pasadas (Froehlich, 1978; Yáñez, 1987²; Gayoso e Iroumé 1991). Es así, que este aumento

² Yáñez, G. 1987. Evaluación de las condiciones de transitabilidad de dos suelos forestales. Tesis Ing. Forestal. Valdivia. Facultad de Cs. Forestales, UACH. Sp. No publicado.

en la densidad aparente con la intensificación del tránsito ha sido ampliamente documentado (Adams y Froehlich, 1981; Incerti *et al.*, 1987; Lineros *et al.*, 1997).

Como se aprecia en el Cuadro 2, la densidad aparente bajo la condición de huellas principales llega a ser dos veces la del estrato superficial y 38% mayor en el segundo, lo cual concuerda con lo reportado por otros autores. (Gayoso *et al.*, 1991; Ellies, 1999). La magnitud del cambio es atribuible a la condición de humedad del suelo al momento de la cosecha, en suelos húmedos se espera mayores cambios que en condiciones secas (Ellies, 1999). Este incremento implica un cambio en la distribución y continuidad del sistema poroso, lo cual se puede traducir en una disminución de la productividad del sitio (Ellies, 1999).

Aún cuando el aumento de la densidad aparente puede considerarse drástico, se estima que este valor no sería limitante para el desarrollo de la vegetación arbórea aunque sí afectaría su productividad (Daddow y Warrington, 1983; Ellies, 1999). Daddow y Warrington (1983), establecen que existe una relación entre la densidad aparente que limita el crecimiento y la textura del suelo. Así, con el contenido de limo y arcilla estiman la densidad límite; para un suelo limo arcilloso este límite de densidad aparente estaría comprendido entre 1,45 g/cm³ y 1,55 g/cm³, valores que están muy por encima de los determinados en los sectores compactados del área de estudio.

Un suelo con una densidad aparente sobre este valor límite, implica una condición de alta compactación y donde el crecimiento de las raíces es detenido totalmente. Es decir, si la densidad aparente en la zona de raíces de plántulas en suelos de texturas arcillosas está cerca de 1,40 g/cm³, este sitio podría estar muy cerca del valor umbral que limita el crecimiento. Bajo esta condición, podría ocurrir una reducción severa del crecimiento de las raíces (Daddow y Warrington, 1983).

No obstante este aumento de la densidad aparente puede conducir a una pérdida de productividad de los sitios. Gayoso e Iroumé (1995), para la especie *Pinus radiata*, en suelos alterados por maderero, midieron pérdidas de crecimiento en la altura de los árboles entre un 20 y 50 por ciento. Igualmente, Lineros y Hertz (1999), concluyen que existe una merma significativa en el crecimiento de los árboles, tanto en huella de maderero como en cancha, producto de la compactación del suelo y también por la pérdida del primer horizonte del suelo en la huella.

Para mayor claridad se muestra en la Figura 5 el gráfico de medias y el intervalo para el 95% de confianza.

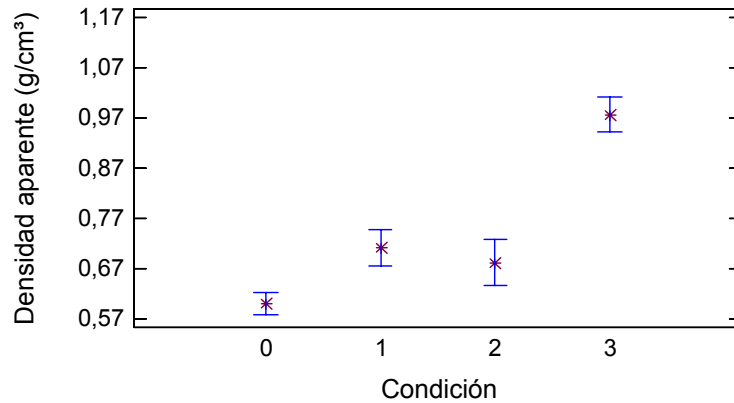


Figura 5. Densidad media y rango para cada condición.

4.1.3 Distancia desde cancha y efecto sobre la densidad aparente del suelo.

Las vías de saca tienen un diseño que se asemeja a una espina de pescado y mientras más alejado el punto de control desde la cancha menor es el volumen tributario que recibe, por lo tanto se puede asumir que el número de pasadas aumenta en la vía mientras más cerca de la cancha, y por lo tanto también debiera aumentar la densidad aparente.

El Cuadro 4 muestra el comportamiento de la densidad aparente a medida que se aleja de cancha, en donde se aprecia que a medida que aumenta la distancia disminuye la densidad, tendiendo hacia el valor control de manera correspondiente a como disminuye el tránsito de los equipos y la correspondiente carga tributaría.

Cuadro 4. Relación entre densidad aparente y distancia de maderero

Distancia desde la cancha (m)	Densidad aparente (g/cm³)
0	1,016
50	0,980
100	0,836
130	1,022
150	0,830

A su vez, lo anterior se ve reforzado mediante el análisis de regresión simple, en donde se determinó una tendencia moderadamente fuerte, la cual se muestra la Figura 6.

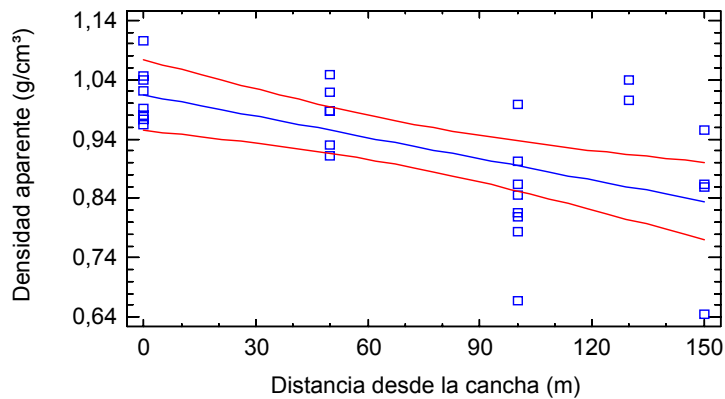


Figura 6. Tendencia entre densidad y distancia desde la cancha

Esto comprueba el mayor efecto de compactación que produce el mayor tránsito del equipo de maderero ($R^2= 33,48\%$; $P=0,0013$) (Ver anexo 12). Practicado el ANOVA se determinó que existe un efecto significativo de la distancia desde cancha sobre la densidad aparente del suelo al 99% de nivel de confianza. La constante del modelo correspondería a la máxima compactación.

El modelo lineal resultante para el rango de distancias analizado es el siguiente:

$$\text{Densidad aparente} = 1,0142 - 0,00119326 \cdot \text{DC} \quad (1)$$

donde:

DC = Distancia desde la cancha (m)

4.1.4 Relaciones entre humedad y densidad aparente del suelo.

La Figura 7 muestra una fuerte correlación entre la densidad aparente y la humedad contenida en el espacio poroso. Esta dependencia puede explicar la susceptibilidad al cambio que puede presentar el suelo cuando se somete al tránsito en altas condiciones de humedad, ($R^2= 61,55$; $P =0,0000$). Esta relación debe analizarse sólo para las condiciones encontradas durante la presente investigación, ya que la relación entre densidad y humedad podrían ser diferentes en condiciones más secas o más humedad. Esto no aísla el efecto del cambio estacional, lo que se ve reflejado igualmente en la disminución de humedad de suelos compactados que contienen menor capacidad de almacenamiento de agua.

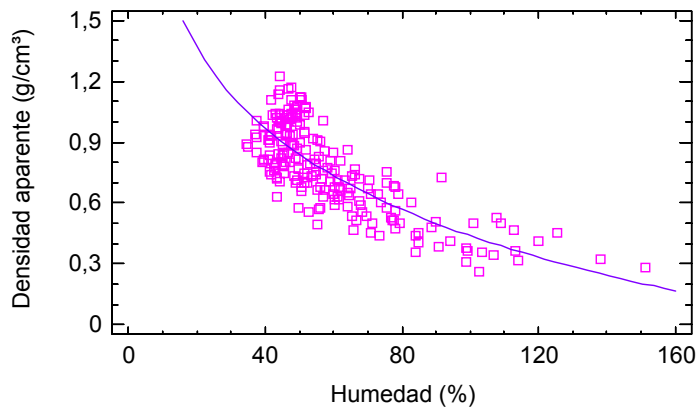


Figura 7. Tendencia entre humedad y densidad.

Tal como se aprecia en el análisis de varianza (Ver anexo 13), la densidad aparente además está asociada a las propiedades del suelo y la intensidad de tránsito.

De lo anterior se desprende que, parte de la variación de la densidad aparente no necesariamente está relacionada con la alteración producida por el madereo sino también por el cambio de las condiciones de humedad, la cual varía a través del año. Esto concuerda con lo observado por Ellies *et al.* (1993), que señala que existen variaciones estacionales de la densidad aparente y espacio poroso bajo bosque nativo, plantaciones y praderas. Una vez realizada la corta a tala rasa, el suelo queda expuesto al viento y sol, produciéndose una contracción volumétrica y un aumento de la densidad aparente. Para disminuir este efecto, las muestras de la condición después de cosecha se tomaron una vez finalizada la faena. No obstante este cuidado, la humedad después de la cosecha (60,28%) medida en el estrato superficial (0 - 10 cm), resultó significativamente menor que la condición antes de cosecha (86,43%), por lo cual parte de las variaciones encontradas en las densidades antes y después de la cosecha pudieren corresponder a este cambio en la humedad.

El modelo no lineal entre humedad y densidad aparente es el siguiente:

$$\text{Densidad aparente} = 3,10108 - 0,578097 \cdot \log(\text{Hum}) \quad (2)$$

donde:

Hum = Humedad (%)

4.1.5 Relaciones entre resistencia al corte condición ex – ante v/s después de la cosecha

La Figura 8 muestra que la condición después de la cosecha presenta una resistencia al corte mucho mayor que aquellos valores antes de la cosecha. Esta diferencia se puede atribuir parcialmente al menor contenido de humedad existente en el sitio en el momento de la toma de muestras, pero especialmente a los cambios provocados por la cosecha, tránsito de la maquinaria, caída de los árboles y arrastre de trozas.

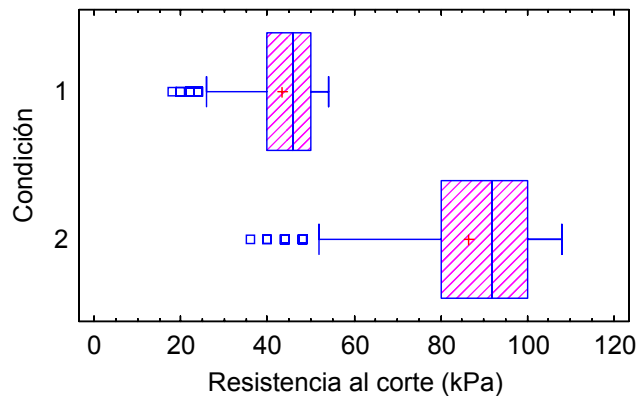


Figura 8. Cuartiles del gráfico de Box y Whisker, donde “+” indica la media, la línea central la mediana y las cajas centrales el 50% de la muestra, para veleta de torsión (kPa) y condiciones ex-ante (1) y después de la cosecha (2).

Comparadas las condiciones antes y después de la cosecha mediante análisis de varianza, se logró determinar diferencias significativas entre la resistencia al corte del suelo (95% de confianza) (Ver anexo 14). Una mayor resistencia del suelo significa mayor oposición al crecimiento de raíces.

4.1.6 Otras propiedades de los suelos estudiados

De manera correspondiente con los cambios ocurridos en la densidad aparente, la porosidad total y la permeabilidad del suelo disminuyen mientras aumenta la intensidad del tránsito, Cuadro 5.

Cuadro 5. Otras propiedades de los suelos estudiados

PROPIEDAD	PROFUNDIDAD	UNIDAD	EX ANTES	HUELLA 1	HUELLA 2	HUELLA 3
Humedad	0 a 10 cm	%	86,43	57,03	64,29	49,13
	10 a 20 cm	%	52,81	52,01	50,73	46,99
Densidad aparente	0 a 10 cm	g/cm ³	0,475	0,765	0,807	0,985
	10 a 20 cm	g/cm ³	0,724	0,870	0,901	1,010
Porosidad	0 a 10 cm	%	79,68	67,16	65,39	57,71
	10 a 20 cm	%	70,00	70,01	62,63	58,11
Permeabilidad	0 a 10 cm	cm/min	0,13	0,12	0,12	0,13

La disminución de la humedad se debe principalmente a que el suelo con huellas fue muestreado en el mes de diciembre, una vez eliminada la cubierta vegetal.

4.1.7 Relaciones entre resistencia al corte, densidad aparente y humedad

Las mediciones con veleta de corte y otros equipos como los penetrómetros, han sido empleados en numerosos estudios para denotar cambios en la densidad del suelo. Estos instrumentos son preferidos porque consumen poco tiempo en las mediciones, son directas y simples. No obstante también existe crítica debido al efecto que la humedad, presencia de rocas y raíces tienen sobre los resultados. En este estudio se empleó la veleta de corte que mide la resistencia del suelo a un esfuerzo de torsión. Por las características del instrumento, las mediciones representan las condiciones a una profundidad de 15 cm. El empleo de la veleta resulta efectivo y simple en suelos inalterados y moderadamente compactados, siendo casi imposible la medición en huellas altamente compactas. Además, resulta poco confiable para comparar situaciones en suelos de diferente textura y condiciones de humedad.

Con la finalidad de poder simplificar mediciones posteriores y predecir la densidad, se estudió un modelo no lineal para relacionar las mediciones con veleta y la densidad aparente de los estratos superficiales. El modelo no lineal estimado entre densidad aparente del estrato 10 a 20 cm, la resistencia al corte y humedad es el siguiente ($R^2 = 72,84$):

$$\text{Densidad aparente} = 0,9758 - 0,0078 \cdot H + 0,0246 \cdot V \cdot 0,4844 \quad (3)$$

donde:

H = humedad en %

V = resistencia medida con veleta de torsión en kPa

El resultado de la regresión muestra que teniendo como variable dependiente la densidad aparente y como independiente la veleta y humedad del suelo, el modelo explica el 72,8% de la variación en la densidad aparente. Siendo el coeficiente de la humedad negativo, a mayor humedad menor será la densidad y lo contrario para la resistencia a la torsión medida con la veleta. Conociendo la humedad promedio del sitio, se estima que las mediciones de la veleta son un adecuado apoyo para

determinar las áreas alteradas y la intensidad de la compactación, cuando se carece de información directa de la densidad. Como se señaló anteriormente, esta medición sirve para comparar un mismo sitio y difícilmente aquellos donde la textura difiera marcadamente.

4.1.8 Relaciones entre permeabilidad y densidad aparente

La Figura 9 muestra la tendencia existente entre la permeabilidad y la densidad aparente, además las mediciones realizadas comprueban dicha tendencia, aunque la alta variabilidad debida a la presencia de residuos y raíces en algunos cilindros no denota con claridad la relación ($R^2 = 19\%$).

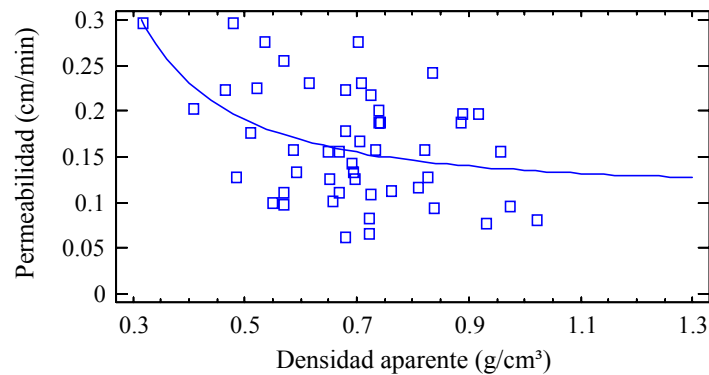


Figura 9. Tendencia entre permeabilidad y densidad aparente

El modelo no lineal estimado para esta relación es el siguiente:

$$K = 0,115173 + 0,0200429 \cdot Da^{(-1,91783)} \quad (4)$$

donde:

Da = densidad aparente (g/cm³)

Considerando que la permeabilidad sobre un cierto nivel de la densidad aparente tiende a ser constante, podría reflejar que una vez reducidos los poros de drenaje, la conductividad hidráulica remanente estaría asociada a los poros finos que se mantienen aún en condiciones de alta compactación. Tal como se mostró en los atributos complementarios del suelo, la porosidad total se mantiene sobre el 58% en las condiciones de huella (Cuadro 3).

Esto se podría ver ratificado por Incerti *et al.* (1987), quien menciona que la permeabilidad está relacionada con los poros gruesos o de drenaje del suelo. Ellies (1999), a su vez menciona que muchas veces un cambio drástico en la reducción de

los poros de drenaje, no se aprecia necesariamente con la misma magnitud en el cambio de la densidad aparente y existiendo factores que influyen como la presencia de residuos y raíces. También ocurre que con el tránsito de la maquinaria, mientras los macro poros se reducen aumenta la porosidad más fina.

4.2 Extensión de las alteraciones bajo cosecha planificada

El sector del rodal con cosecha planificada cubrió 7,26 ha, de las cuales 0,18 ha fueron maderadas con bueyes. Las huellas principales alcanzaron los 900 metros lineales, mientras las secundarias y terciarias midieron 2.801 metros. De acuerdo a sus anchos promedio, vemos que las huellas principales alcanzan valores de 2,73 m, a diferencia de las huellas secundarias y terciarias que alcanzan un ancho promedio de 2,49 m y 2,38 m, respectivamente, siendo en ambos casos menor. Esto se puede deber al alto tráfico que presentan las huellas principales y en las cuales existe un mayor movimiento de volumen que es los otros dos casos. El Cuadro 6 muestra las áreas alteradas bajo cosecha planificada.

Cuadro 6. Superficies alteradas en área planificada

Tipo de alteración	Área (m ²)	Porcentaje (%)
Huella Principal	2.454,19	3,38
Huella Secundaria	2.837,08	3,91
Huella terciaria	3.958,97	5,45
Otras alteraciones	11.201,43	15,43
Área de canchas	3.157,26	4,35
Superficie total alterada	23.608,93	32,53

Dentro de las alteraciones, el área de otras alteraciones considera tanto el área cosecha con bueyes, como aquellas áreas en las que fue difícil establecer claramente a qué tipo de huella pertenecía, o donde múltiples huellas, una al lado de la otra hicieron imposible la medición de longitud prefiriéndose la medición de área.

En la Figura 10 se muestra la importancia relativa de la superficie ocupada por huellas de maderero y superficies de canchas. Algunos estudios realizados en British Columbia (Krag *et al.*, 1998), verifican la evaluación de la extensión del daño producto de alteración sobre el suelo por maderero terrestre, estos muestran valores promedio del 15 a 45%. Estos valores se encontrarían dentro de los rangos obtenidos en este estudio, siendo éstos del 32,5%.

Según Gayoso *et al.* (1991), en estos sectores alterados se puede presentar una fuerte disminución de hasta un 40% de la productividad del sitio.

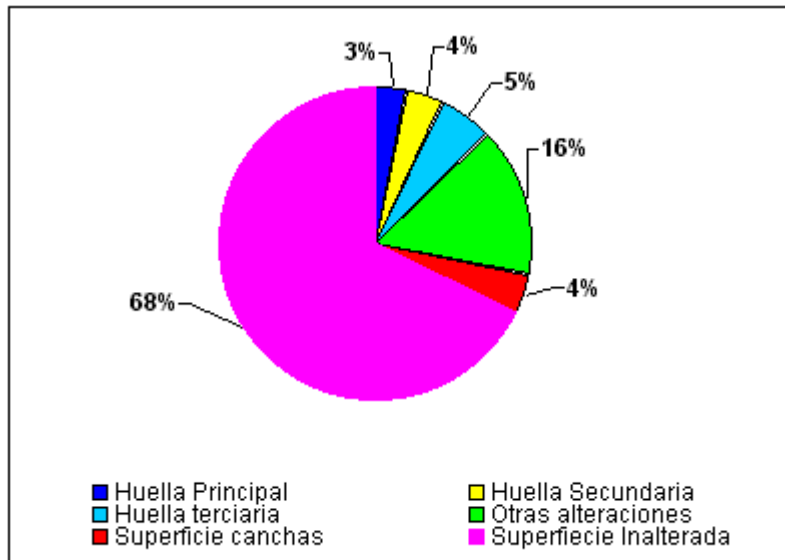


Figura 10. Superficie alterada del área neta a reforestar (ANR)

Una alteración del 32,5% de la superficie puede parecer excesiva y no diferente a situaciones de maderero no planificado, que se presenta en el capítulo siguiente, sin embargo sólo el 7% corresponde a compactación severa de canchas y huellas principales. Este valor, no obstante dentro de los límites de la práctica común, sobrepasa los valores sugeridos por el Manual de Conservación de Suelos del Código de Prácticas Forestales de Canadá, quienes proponen como máximo un 5% del área neta a reforestar (ANR) en terrenos de fragilidad muy alta y 10% para terrenos de fragilidad media a alta (British Columbia Ministry of Forest, 1995).

Desde un punto de vista teórico, las alteraciones por huellas distanciadas cada 50 - 60 metros, no debiera superar el 4 o 5% de la superficie, lo cual significa que el tránsito de los equipos no se ajustó plenamente a lo planificado para el *skidder* equipado con huinche. En el caso de utilizar *skidder* con garra se debiera esperar un mayor porcentaje de área alterada.

4.3 Extensión de las alteraciones bajo cosecha no planificada

Dentro de las 6,16 ha en cosecha no planificada, 2,25 ha fueron cosechadas con tractor forestal, extrayendo el resto del rodal con bueyes. A pesar de tratarse de un área menor al sector planificado, se observa que el suelo alterado por huellas principales y terciarias es mayor que en el caso planificado, alcanzando 15% y 26% respectivamente, tal como lo muestra la Figura 11.

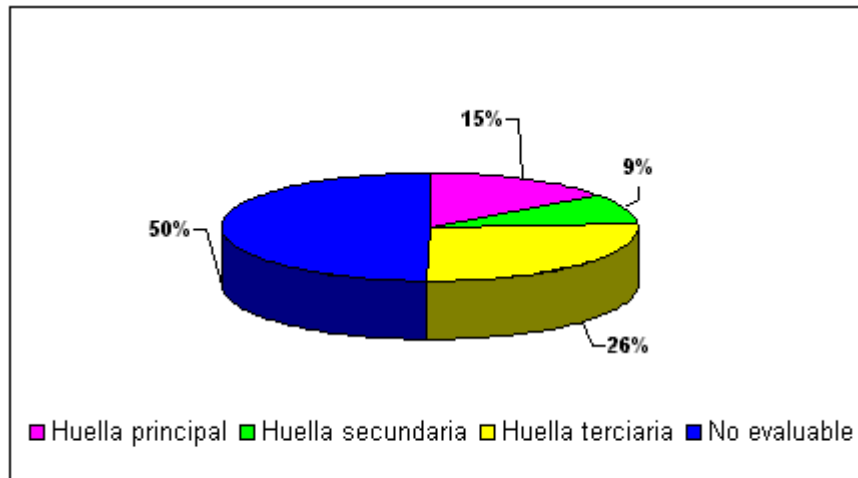


Figura 11. Porcentajes de alteración en el suelo bajo cosecha no planificada.

Importante es destacar que debido a la acumulación de desechos sobre el suelo el 50% de la superficie no pudo ser evaluada, lo cual no significa que no exista daño bajo estas áreas y podría hacer aumentar aún más el porcentaje de superficie alterada en relación a la faena planificada.

Al comparar las alteraciones entre los sectores planificado y no planificado se comprueba que la planificación y trazado de las vías de saca de forma anticipada a la cosecha y se traduce en una reducción de la superficie afectada. Esto ya era mencionado tempranamente por Froehlich *et al.* (1981), quienes determinaron que la cosecha por vías planificadas podría reducir el área compactada en dos tercios. Sin embargo, la planificación de las vías de saca puede llevar a mayores distancias de huincheo, y de manera correspondiente podría afectar la productividad del equipo y costo de producción. Martínez y Moyano (1992) también confirmaron igual tendencia, es decir, bajo condición de madereo estructurado se redujo la superficie alterada de 57,8 a 37,7 % en relación con el sector no planificado.

4.4 Recuperación de la densidad aparente en huellas después de 20 años

El presente estudio muestra la situación de dos rodales que fueron cosechados empleando un *skidder* de neumáticos, generando graves impactos al suelo (Monrroy, 1981; Gayoso e Iroumé, 1984). Uno de ellos caracterizado como CI-82002, fue cosechado en la primavera de 1981 y reforestado con la especie *Cupressus lusitanica* y otro como PR82001, cosechado en el invierno de 1980 y reforestado con *Pinus radiata*. Para el caso de la unidad PR-82001 se reporta que el 77% de la superficie presentaba algún tipo de alteración (Monrroy, 1981).

Según Gayoso e Iroumé (1991), el estudio realizado por Monrroy (1981) demostró una baja capacidad de soporte de los suelos en condiciones de humedad, cambio de las propiedades gravimétricas producto del tránsito de maquinaria y que la densidad

aparente aumenta con las primeras 10 pasadas del equipo hasta 52% en el estrato de 0 a 5 cm, 46% en el estrato de 6 a 11 cm y 43% entre 16 y 20 cm.

En la unidad identificada como PR-77-1, en la primera parte de este estudio, se intentó localizar huellas de la cosecha realizada en el invierno del año 1976 con empleo de bueyes y un pequeño tractor con huinche y rodado de neumáticos (UNIMOG Mercedes Benz Modelo 406). Sin embargo ello no fue posible por la evidente recuperación del estrato superficial del suelo y la hojarasca acumulada a través de los 26 años transcurridos. A pesar de haber registrado un 57% de superficie alterada (Monrroy, 1981) el daño en intensidad debió ser menor que el ejercido por los actuales tractores articulados de mayor peso y capacidad de carga.

Las unidades CI-82002 y PR-82001 veinte años después, muestran una marcada recuperación de la densidad aparente en el estrato superficial, mientras la compactación acumulada permanece en profundidad (Figura 12). Las diferencias resultaron significativas al 95% de confianza.

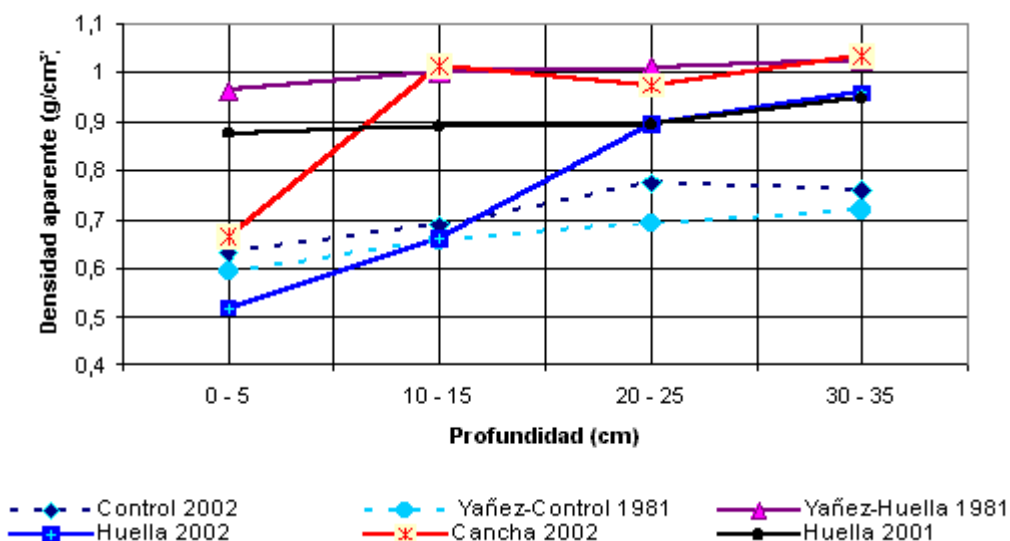


Figura 12. Densidad aparente según alteración y profundidad, en Rodal CI -82002 sector 1.

La recuperación puede deberse a la acción de los microorganismos, ciclos de mojado secado al que se da sometido el suelo y al crecimiento de las raíces. Las capas profundas al no ser afectadas por estos agentes mantienen la compactación histórica, esto se aprecia al ver cómo la línea de la situación “ huella 1981” se aproxima a la línea “huella 2002”. Yañez (1987), reportaba una densidad de 0,591 g/cm³ para la situación inalterada en el estrato 0 a 5 cm. La huella antigua del año 1981 muestra una recuperación casi total en las profundidades 1 y 2 (0-10 y 10-20), mientras la huella reciente (2001) muestra una alta compactación, situación que se puede reafirmar por los estudios realizados por Perry (1964), quien señala que la compactación causada por el tránsito de equipos de cosecha puede recuperarse a

través del tiempo debido a la acción climática y de los microorganismos, aunque pareciera que por ello, esto ocurre principalmente en el estrato superficial.

Yáñez informaba que luego de 10 pasadas del skidder se alcanzaba una densidad aparente en las huellas de $0,964 \text{ g/cm}^3$ en el estrato superficial y $1,026 \text{ g/cm}^3$ de 16 a 20 cm de profundidad. El sector correspondiente a cancha muestra una densidad aparente semejante al control en superficie debido a la mezcla de suelo con residuos orgánicos de la cosecha, lo cual hizo muy difícil la medición de la densidad.

Gayoso et al, (1991), también evidenciaron cierta recuperación de las propiedades físicas en el estrato superficial de suelos compactados. Esta recuperación gradual en el tiempo mostró en suelos metamórficos y graníticos 13 y 10 años después de la cosecha, un remanente de compactación de sólo 10 y 12% respectivamente. Sin embargo, la disminución de la productividad de los sitios sigue siendo evidente en las áreas compactadas, lo que significa que la compactación remanente en profundidad puede estar afectando entre otros la capacidad de almacenaje de agua e intercambio de gases en el suelo.

En los sitios de estudio además, se practicó mediciones de resistencia al corte, las cuales mostraron una tendencia similar a las expuestas para la densidad aparente. Sin embargo, en sectores muy compactados la medición fue difícil y en algunas ocasiones sobrepasó la capacidad de medición del instrumento (Figura 13).

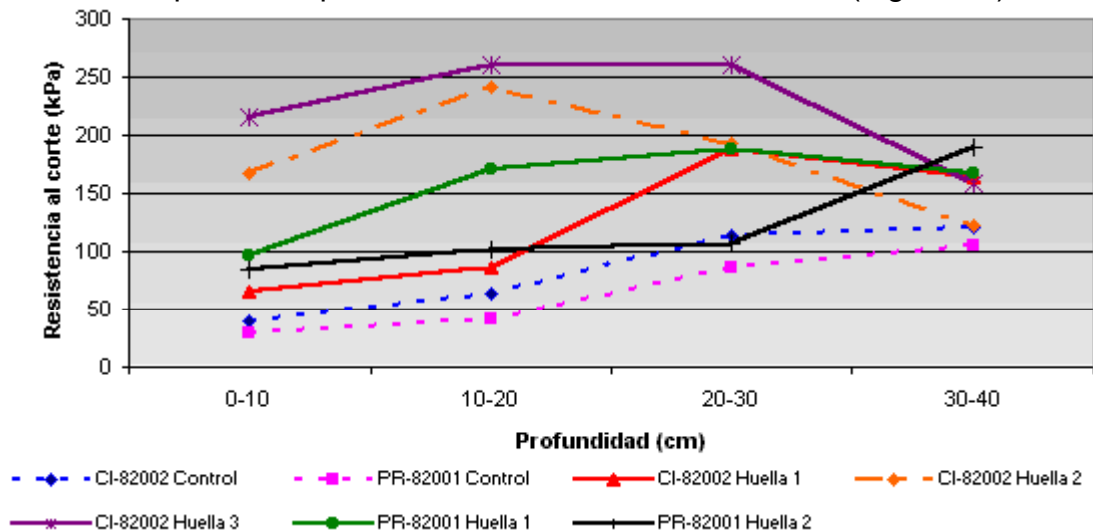


Figura 13. Medición de resistencia al corte

Hoy las tasas de permeabilidad para el estrato 0 a 10 cm alcanzan valores de $0,1705$ y $0,1701 \text{ cm/min}$ para las condiciones inalterado y sobre huella antigua, lo cual indicaría que ha habido una recuperación de los macroporos, por lo que la conductividad hidráulica igualmente ha tenido una recuperación. Gayoso e Iroumé (1991), reportaron tasas de $0,1443 \text{ cm/min}$ para la condición inalterada y hasta

0,0013 cm/min para la condición de suelo compactado en huella el año de la cosecha (1981).

En un segundo sitio (PR-82001) cosechado en el invierno de 1980, madereado con *skidder* neumático equipado con huinche (CAT Modelo 518) y actualmente con una plantación de *Pinus radiata* del año 1982 se ratifica la tendencia de recuperación de la densidad en las huellas en el estrato superficial, mientras permanece la compactación en profundidad, Figura 14.

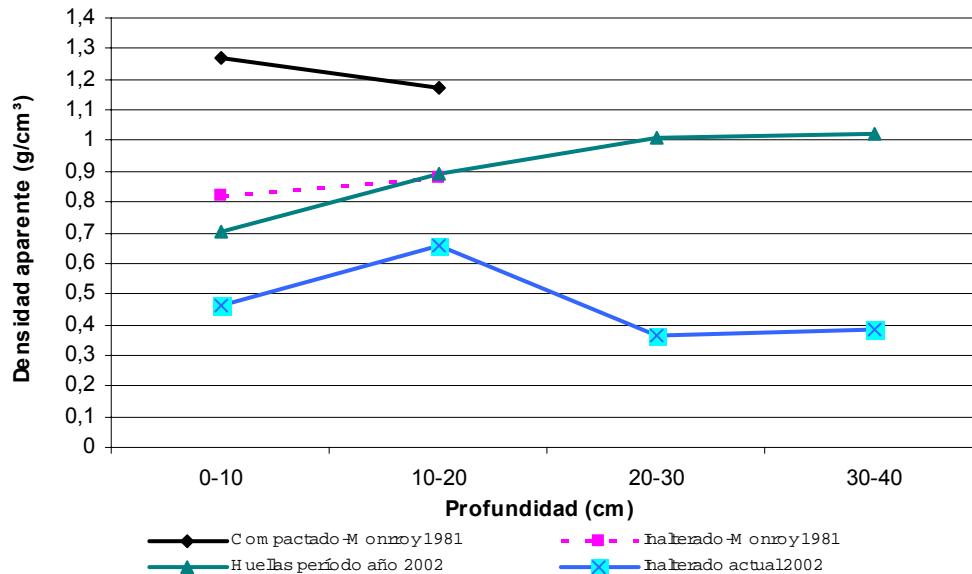


Figura 14. Comportamiento de la densidad a través del tiempo en Rodal PR-82

Aún cuando las muestras se tomaron en el mismo rodal, puede existir marcadas diferencias entre un punto y otro, ello queda de manifiesto al comparar las situaciones “inalterado” medidas por Monroy (1981), y este estudio. No obstante, las tendencias confirman la recuperación de la densidad aparente en el estrato superficial, aunque en este caso parece existir aún un remanente de compactación en el estrato superficial.

Estos resultados revisten importancia para tomar decisiones en cuanto a las estrategias de mejoramiento de los procesos productivos y la conveniencia de realizar medidas correctivas. La recuperación del suelo en superficie es de interés porque ello permite restaurar la capacidad de infiltración del suelo y así permitir entre otros la recarga de la napa freática. Pero la compactación remanente en profundidad es preocupante porque en rotaciones sucesivas se irá acumulando lo cual agravará su efecto en la productividad del sitio y puede terminar en una severa limitante para el crecimiento de las raíces. Lograr recuperar la porosidad y cierto tipo de tamaño poros y asegurar su permanencia, puede ser poco posible mecánicamente, por lo que se hace evidente la necesidad de tomar medidas preventivas en lugar de correctivas.

Entre las medidas preventivas además de la planificación anticipada de las vías de saca, está el elegir adecuadamente el equipo cuando se trata de sitios húmedos empleando neumáticos más anchos (Stokes y Schilling, 1997), o empleando forwarders montados sobre rodados 6x6 y 8x8 que prácticamente no alterarían la densidad del suelo (Seixas y Mc Donald, 1997) o transitando el suelo sobre los desechos o una capa de astillas (McDonald y Seixas,1997).

5. CONCLUSIONES

El tránsito de equipos de madereo en huellas principales muestra una mayor densidad aparente que en huellas secundarias y terciarias. Esta densidad es mayor que la densidad control y aumenta directamente con el tránsito, en condición de cosecha planificada.

En el estrato superficial 0 – 10 cm, la densidad aparente en los sectores más compactados, llegó a ser más del doble respecto de la situación control o suelo no transitado.

La densidad aparente en las huellas disminuye a medida que la distancia desde la cancha aumenta. En el extremo de las huellas, la densidad tiende hacia el valor control de manera correspondiente a como disminuye el tránsito de los equipos y la correspondiente carga tributaria.

La reducción de humedad en el suelo genera por contracción un aumento de la densidad aparente, por lo que parte de su incremento en las áreas alteradas por el madereo pueden ser atribuibles a este fenómeno.

En el sector planificado el área alterada alcanzó al 32,5% de la superficie, de la cual el 7% corresponde a alteración severa en canchas y huellas principales.

Para el caso no planificado, las áreas alteradas por las huellas principales y terciarias son mayores que en el caso planificado, alcanzando porcentajes del 15% y 26% respectivamente.

Por consiguiente, la planificación y diseño anticipado de las vías de saca generan un beneficio ambiental, afectando en menor grado la superficie del suelo.

La densidad aparente de suelos alterados por el madereo con *skidder* neumático muestra una recuperación luego de 20 años de ser cosechado y bajo cubierta de plantaciones. La densidad aparente tiende a valores próximos a la situación inalterada en los estratos de 0 a 5 y de 10 a 15 cm de profundidad.

Sin embargo, la compactación permanece casi inalterada a profundidades de más de 20 cm. Esto significa que es probable una acumulación de este efecto a través de sucesivas rotaciones, lo cual puede afectar gravemente productividad del sitio en el largo plazo. Efecto que puede ser más severo mientras más corta sea la edad de rotación.

Lo anterior permite llegar a la conclusión general que la cosecha genera impactos permanentes en el suelo y la productividad del sitio, y por consiguiente la planificación anticipada de las vías de saca puede ser una forma eficaz para permitir una reducción de los impactos. Pero las alteraciones no se eliminan, sólo disminuyen y por lo tanto se debe implementar medidas complementarias tendientes a mitigar y prevenir los impactos.

Entre las medidas preventivas se puede considerar entre otros; adecuar la temporada de cosecha al tipo de suelo, esto es, en suelos de baja capacidad de soporte cosechar en temporada seca, la selección adecuada de maquinaria de madereo según pendiente del terreno y condiciones de humedad ; proveer equipos sobre neumáticos y zapatas de mayor ancho, mayor flotabilidad y menor presión básica para transitar sobre suelos húmedos, transitar con los equipos sobre los desechos de cosecha y capacitar a los operadores de *skidder*, para evitar que transiten irrestrictamente y generen menores ahuellamientos.

Además, dentro de las principales medidas mitigadoras se puede señalar la restauración de áreas compactadas mediante medidas mecánicas y biológicas. Esto es, labranza o subsolado, para restaurar el sistema poroso de forma que el agua y aire puedan moverse facilitando el crecimiento radicular; arrumar desechos sobre las vías para evitar erosión; favorecer la infiltración y la actividad de microorganismos, incorporar enmiendas y mantillo para favorecer la entrada de materia orgánica.

BIBLIOGRAFIA

- Adams, P.;H. Froehlich 1981. Compaction of forest soils. (PNW Pacific Northwest Extension Publication), 217. 13 p.
- Adams, P.; J. Ringer. 1994. The effects of timber harvesting and forest roads on water quantity & quality in the Pacific Northwest: Summary and annotated bibliography. Forest Engineering Department, Oregon State University. Oregon 147 p.
- Alarcón, C. 2001. ¿Los costos ocultos en el sector forestal, disminuyen la rentabilidad del negocio? www.aldeaforestal.cl/lemu.WebLemu/lemumayo_01/clasicos/Cesar-ALV.PDF (Mayo, 5 del 2002).
- Arocena, J. 2000. Cations in solution from forest soils subjected to forest floor removal and compaction treatments. Forest ecology and management. 133: 71-80
- Arnup, R. 2000. Soil disturbance in forestry operation - A practical field guide. Lake Abitibi Model Forest, Cochrane, Ontario. 26 p.
- Bainbridge, D.; J. Sawyer; M. Gates;I. Delgado 1999. Addressing soil strenght problems on restoration projects. Soil Ecology and Restoration Group. 6 p.
- British Columbia Ministry of Forests 1995 Hazard assessment keys for evaluating site sensitivity to soil degrading processes. Forest practice code. Victoria, BC. 10p.
- Brais, S. 1997. Careful logging and soil compaction on upland sites. Project report to the Lake Abitibi Model Forest. Université du Québec. 26 p.
- Bryan, J.; P. Adams. 1994. Soil compaction from ground-based thinning & effects of subsequent skid trail tillage in Douglas-Fir stand. *En: Seminar Forsitrisk Soil, Tree, Machine Interactions.. Feldafing (Alemania). IUFRO/FAO/ECE/ILO/EU*
- Bulmer, C. 1998. Forest soil rehabilitation in British Columbia: a problem analysis.. (Land Management Book, 44). Resarch Branch B.C. Ministry of Forest. Victoria. BC. 45 p.
- Carter, E.; T. MacDonald.; J. Torbert. 1999. Application of GPS Technology to monitor traffic intensity and soil impacts in a forest harvest operation. www.srs.fs.fed.us/pubs/queryubs.jsp (Mayo, 8 del 2002)
- Center of International Forestry Research (Indonesia). 1998. Reduced – Impact Logging www.cifor.cgiar.org/publications/Html/AR-98/RIL.html (Mayo, 6 del 2002)

- Comisión Nacional del Medio Ambiente (Chile). 1996. Metodologías para la caracterización de la calidad ambiental. 1era , Print Color. Santiago, 242 p.
- Cullen, S.; C. Montagne.; H. Ferguson. 1991. Timber harvest trafficking and soil compactation in Western Montana. *Soil Sci. Soc. Am.* 55:1416-1421
- Daddow, R.; G. Warrington. 1983. Growth-limitting soil bulk densities as influenced by soil texture. www.containment.fsu.edu/cd/content/pdf/392.pdf (Diciembre, 18 del 2002).
- Ellies, A. 1999 Cambios estructurales y distribución de tensiones en suelos sujetos al tránsito de maquinaria. *Bosque* 20(1):37-45
- Ellies, A, C. Ramírez; H. Figueroa 1993. Modificaciones estructurales de un suelo sometido a distintos usos forestales. *Bosque* 14(2): 25-30
- Ellies, A, C. Ramírez; R. Mac Donald; H. Figueroa 1993. Modificaciones estacionales en la distribución del espacio poroso por tamaño en un suelo sometido a variado uso forestal. *Bosque* 14(2): 31-35
- Forsythe, W. 1980. Física de suelos. Manual de laboratorio. San José, (Costa Rica), IICA. 212 p.
- Froehlich, H. 1978. Soil compaction from low ground – pressure, torsion-suspension logging vehicles on three forest soils. Oregon State University. 12 p. (Res. Pap, 36).
- Froehlich, H.; E. Aulerich; R. Curtis 1981. Designing skid trail systems to reduce soil impacts from tractive logging machines. Corvallis (Research Paper 44). Oregon State University. 15 p.
- Froehlich, H.; D. McNabb. 1984. Minimizing soil compaction in Pacific Northwest forest. *En: Forest soils and treatment impacts. Proc. 6th North American Forest Soils Conference, Knoxville, Tenn.* Earl L. Stone. pp 159-184
- Fuenzalida, H. 1971. Climatología de Chile. Santiago. Departamento de Geofísica y Geodesia. Universidad de Chile, 66 p.
- Garland, J. 1983. Designated skid trails minimize soil compactation. Woodland workbook. Oregon State University. 6 p.
- Gayoso, J. 1982. Pérdida de la producción del sitio por efecto del madereo. *In: Actas Reunión de Trabajo sobre Evaluación de la Productividad de sitios Forestales, 22-24 Abril 1982, Valdivia.* pp. 284-299
- Gayoso, J. 1985. Mecánica de suelos en la ingeniería vial. Valdivia, Fac. Cs. Forestales, UACH. 93 p. (Publicación docente 14).

- Gayoso, J.; A. Iroumé.; A. Ellies. 1991. Degradación de la cosecha forestal, Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 10: 98-106
- Gayoso, J. y A. Iroumé 1984 Soil disturbance from logging in Southern Chile. En: Proceedings Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability. Environment and Policy Institute East West Center. University of Hawaii, Honolulu, 203-209
- Gayoso, J.; A. Iroumé.; A. Ellies. 1991. Degradación de la cosecha forestal asociada a operaciones de cosecha. En: Actas III Taller de Producción Forestal Chile. Concepción, 27-29 Noviembre. s.p.
- Gayoso, J.; A. Iroumé. 1993. Impacto al suelo por efecto de la cosecha forestal. En: VIII Simposio de la sociedad chilena de la ciencia del suelo. Valdivia, Abril 8-10 de 1993. Valdivia (Chile), Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. pp. 98-106.
- Gayoso, J.; D. Alarcón. 1999. Guía de conservación de suelos forestales. Proyecto certificación del manejo forestal en las regiones Octava, Décima y Duodécima. Facultad de Cs. Forestales, UACH. 91 p.
- Gayoso, J.; A. Iroumé. 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. Bosque 16(2): 3-12
- Gayoso, J.; A. Iroumé. 1991. Compaction and soil disturbance from logging in Southern Chile. Ann Sci For 48: 63-71
- Gayoso, J.; R. Muñoz. 1995. Evaluación de las prácticas actuales de manejo forestal en algunas empresas de la VIII Región: medición de las alteraciones al suelo causadas por operaciones de cosecha. Universidad Austral de Chile. 44 p. (Informe de convenio, s/n)
- Gayoso, J.; R. Muñoz. 2000. Plan de monitoreo ambiental Proyecto Forestal Río Cóndor, Componente suelo. Información de línea de base Rodales 1 y 3 Sector Vicuña. Informe de Convenio s/n. Universidad Austral de Chile. No publicado.
- Greacen, E.L.; R. Sands. 1980. Compaction of forest soils. A review. Australian Journal of soil rearch. 18: 163-189
- Gessel, S. 1981. Impacts of modern forestry on continuing forest productivity. Proceedings XVII IUFRO World Congress, Japan, pp. 3-19
- Head, K. 1982. Manual of soil laboratory Testing. Pentech, London. 123 p.
- Hatchell, G.; C. Ralston.; R. Foil. 1970. Soil disturbances in logging. Journal of Forestry. 68: p. 772-775

- Incerti, M.; F. Clinnick.; T. Willatt. 1987. Changes in the physical properties of forest soil following logging. *Aust. Forestry Research*, 17, 91-98
- Instituto Forestal. (Chile). 1999. Evaluación de Prácticas Actuales de Manejo Forestal en algunas empresas de la VIII Región. 44 p.
- Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (Chile). 1978. Estudio de suelos de la provincia de Valdivia. Santiago. s.e. 178 p.
- Jordan, D.; F. Li; F. Ponder; E. Berry; V. Hubbard ; K.Kim 1999. The effects of forest practices on earthworm populations and soil microbial biomass in a hardwood forest in Missouri. *Applied Soil Ecology*. Vol 13:31-38
- Krag, R.; J. Mansell.; W. Watt. 1998. Planning and operational strategies for reducing soil disturbance on steep Slopes in the cariboo forest region, British Columbia. (Technical Report, TR-103). Canada. Forest Engineering Research Institute of Canada. 26 p.
- Krag, R.; K. Higginbotham; R. Rothwell. 1986. Logging and soil disturbance in southeast British Columbia. *Canadian Journal Forestry Research*. 16: 1345-1354
- Kay, E. 1997. Manejo forestal: planificación de caminos forestales, Disminución del impacto ambiental y control de costos mediante el manejo de suelos y sedimentos en operaciones forestales. *En: Simposio Internacional Posibilidades de Manejo Forestal Sostenible en América Tropical*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 15-20 de Julio de 1997. s.l., s.e. pp. 1-4
- Kockx, G; R. Krag. 1993. Trials of ground-skidding methods on steep slopes in the East Kootenays, British Columbia: productivities and impacts. Vancouver. 23 p.
- Lacey, S.; P. Ryan 2000. Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management* Vol. 138 (1-3) pp. 321-333.
- Linerós, M.; E. Hetz.; A. Jara. 1997. Compactación de suelos bajo uso forestal por madereo mecanizado terrestre. *Agro-Ciencia* 13(3): 365-370
- Lewis, T; The Timber Harvesting Subcommittee. 1991. Developing timber harvesting prescriptions to minimize site degradation. B.C. Min. For., Victoria, B.C. Land Manage. Handbook, 62. 64 p.
- Martínez, M.; C. Moyano. 1982. Evaluación de un sistema piloto estructurado de huella de madereo en faena tradicional de cosecha forestal mecanizada, en un predio de la VIII región. www.iufro.boku.ac.at/iufro/iufro.net/d6/wu60304/ponencias/tema1/martinezm.html (Abril, 18 de 2002)

- MacDonald, A.J. 1999. Harvesting Systems and Equipment in British Columbia. British Columbia, Crown publication. 197 p.
- McDonald, T.; T. Way, B; Löfgren, F; Seixas; M. Landström. 1996. Load and inflation pressure effects on soil compaction of forwarder tires. (WSI 3423 FDC) 742: E67-E70
- McDonald T.; F. Seixas. 1997. Effect of slash on forwarder soil compaction. Journal of Forest Engineering : 8 (2): 15-26
- Ministry of Forests, (Canada). 1995. Soil Conservation Guidebook. Forest Practices Code of British Columbia Act. 17 p.
- Monrroy, M. 1981. Cambios físicos-mecánicos de los suelos de textura fina por efecto de madereo con tracción animal y mecanizada. Tesis Ing. Forestal. Valdivia (Chile), UACH, Facultad de Cs. Forestales. 126 p.
- Pinard, M.; M. Baker.; J. Tay. 2000. Soil disturbance and post-logging forest recovery on bulldozer paths in Sabah, Malaysia. Forest Ecology and Management. 130: 213-225
- Perry, T. 1964. Soil compaction and Loblolly pine growth. USDA for Serv Tree Planters Notes 69, 9
- Rico, A.; H. del Castillo 1988. La ingeniería de suelos en las vías terrestres. México, . Limusa. V.1, 1458 p.
- Routledge, R.D. 1987. The impact of soil degradation on the expected present net worth of future timber harvests. For Sci 33, 823-834
- Seixas, F.; T. McDonald 1997. Soil compaction effects of forwarding and its relationship with 6- and 8- wheel drive machines. Forest Products Journal 47: (11/12): 46-52
- Senyk, J.P.; D. Craigdallie. 1997. Effects of harvesting methods on soil properties and forest productivity in interior British Columbia. Victoria. Pacific Forestry Center. Canadian Forest Service (Information Report BC-X-365). 37 p.
- Schlegel, F; O. Martinez. 1987. Flora de los predios forestales Los Pinos y Las Palmas, Cayumapu, Valdivia. Bosque 8(1): 31-47.
- Toro, J. 1991. La mecanización de faenas forestales y su relación con la degradación de suelos. *En: Actas III Taller Producción Forestal*. Grupo de producción Forestal, Fundación Chile. (Concepción)
- Unites States Department of Agriculture (U.S.D.A). 2001. Rangeland Soil Quality – Compaction. <http://soils.usda.gov/sqi> (Diciembre, 18 de 2002)

- Uyttendaele, G. 2000. Evaluación del flujo de nutrientes en la cuenca "Los Pinos" Valdivia. X Región. Tesis de Magister. Valdivia Fac. Cs. Forestales, UACH. 102 p.
- Wästerlund, I. 1994. Forest responses to soil disturbance due to machine traffic. *En:* Actas Seminar Forsitrisk Soil, Tree, Machine Internations. Feldafing, Germany. (IUFRO/FAO/ECE/ILO/EU).
- Went, S.; B. Thomas. 1981. Effects of skid roads on diameter, height and volume growth in Douglas fir. *Soil Sci Soc Am J* 45: 629-632.

ANEXOS

Anexo 1
Abstract

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate soil disturbances generated during ground-based logging using a track *skidder*, in a final harvest of a 25 year-old *Pinus radiata* stand. The study area of 13.42 hectares is located in the Tenth Region of Chile, on clayed loam soils and harvesting occurred during the spring of 2002.

The extent of disturbed area used as skid trails and landings and the changes in soil bulk density for both planned and un-planned harvesting operations were measured. The quantification of disturbed area was done surveying all the footprints in the planned condition and visual observation of the alterations through transects in the un-planned situation.

To determine changes in physical and hydraulic soil properties, samples from both planned and un-planned harvesting operation areas were collected. Samples were taken in two stages, one before logging as control and one on the skid trails after completing harvesting operations.

Results show that trails and landings under the planned condition occupied the 32.5% of total surface. From this percentage, skid trails with deep cuts and mineral soil exposure occupied the 12%, landings covered the 4% and the remainders were areas trafficked by the *skidder* and with visual damage. In contrast, in the un-planned sector, where the *skidder* operator could freely select the trails, the 50% of the surface showed some level of damage and the 24% corresponded to main and secondary skid trails.

The physical, mechanic and hydraulic determinations showed an increase in bulk density and in shear strength, and a light decrease of the hydraulic conductivity, in the sectors trafficked as compared with the control condition. This is more evident in the evaluated layers of 0 to 10 cm and 10 to 20 cm of depth. For the condition of main roads under planned logging condition, the bulk density came to be the double of the unaffected situation and a 38% higher than in the case of secondary roads. In the unplanned sector, shear strength increased from 43 kPa for the control condition to up 86 kPa after the clear cutting. However, the hydraulic conductivity under main skid trails showed a reduction of only the 8% when compared to the undisturbed condition. Designed skidding trails generate an environmental benefit because of a lower percentage of disturbed soil surfaces.

Also, a complementary objective was carried on. Through the evaluation of historic and reliable new information, soil recovery capacity on skid trails abandoned 20 years ago was analyzed. Twenty years ago the soil under skid trails showed severe compaction up to 40 cm depth, and the new outputs show a recovery of the bulk density in the first 20 cm, while soil compaction persists at deeper layers. Twenty years ago, superficial bulk density was 0,591 g/cm³ in undisturbed areas and 0,964 g/cm³ under main skid trails. Today, bulk density in this superficial layer on the old skid trails reaches 0,520 g/cm³, which is similar to the undisturbed condition. At these

old skid trails and below 20 cm deep, bulk density indicates that the 64 to 72% of soil compaction generated by traffic still remains.

As conclusions of the study, it is possible to mention that planned skid trails generate an environmental benefit, because a lower percentage of the soils are affected by logging operations. Also, that soil compaction tend to recover with time specially at the superficial layer although high bulk densities are still found below 20 cm deep at skid trails abandoned 20 years ago which might negatively affect site productivity. Plantations with species of shorter rotation age could generate highest impacts, since more frequent logging operations could reduce the possibility of soil recovery as it occurs in the superficial layers with rotations of 20 years.

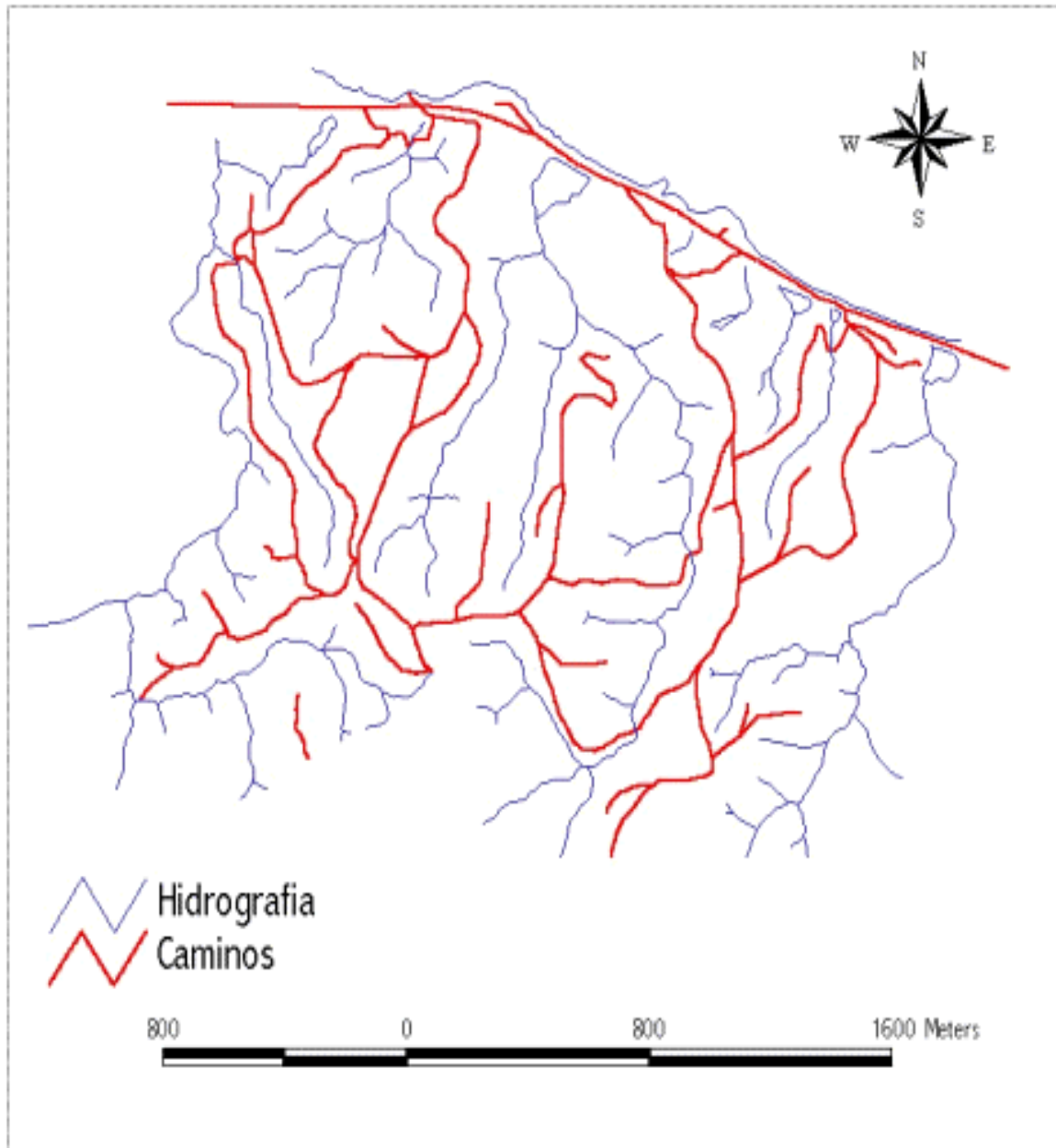
Keywords: soil compaction, ground-based logging , soil recovery

Anexo 2

Predio Los Pinos Accesibilidad e Hidrología

Predio Los Pinos

Accesibilidad e Hidrología



Anexo 3

Predio Los Pinos Cobertura de Plantaciones y Carta Predial

PREDIO LOS PINOS
Cobertura de Plantaciones



Legenda

- Am
- Cl
- Cs
- Ec
- Eg
- Eg_Ad
- Eg_Am
- En
- Na
- Nd_No
- Pm
- Pmu
- Pr
- Pr_Eg_Ad
- Sa
- Vsp



900 0 900 Meters

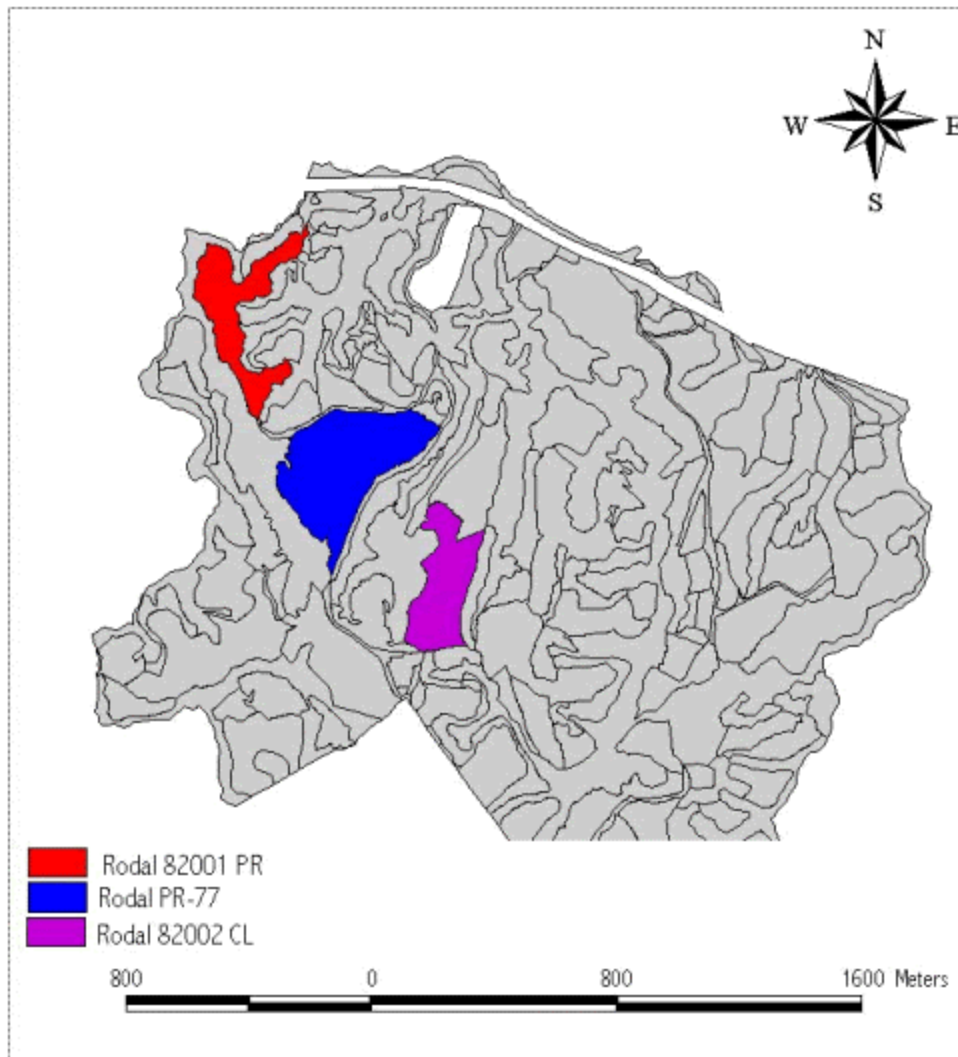
Anexo 4

Foto área rodal en estudio de *Pinus radiata* de 1977, Predio Los Pinos



Pr-77

Predio Los Pinos



Anexo 5

Superficie según uso actual del suelo Predio Los Pinos y la relación de factores de sitio con cuadro procesos de degradación

Relación de factores de sitio con cuatro procesos de degradación

	Compactación	Erosión	Deslizamiento	Remoción
Clima	1	3	3	-
Humedad del suelo	3	2	3	-
Pendiente	2	3	3	3
Textura	3	3	3	2
Fragmentos mayores	3	3	2	2
Hojasca	2	3	-	-
Vegetación	2	2	-	-
Profundidad del suelo	-	2	3	3
Elementos químicos	-	-	-	2
Napa freática	3	2	3	2
Cursos de agua	-	3	2	-
Cárcavas	-	2	3	3
Deslizamientos anteriores	-	-	3	-

1 = menos determinante; 3 = más determinante.

Superficie según uso actual del suelo Predio Los Pinos (Fuente: Trincado y Soto, 2000)

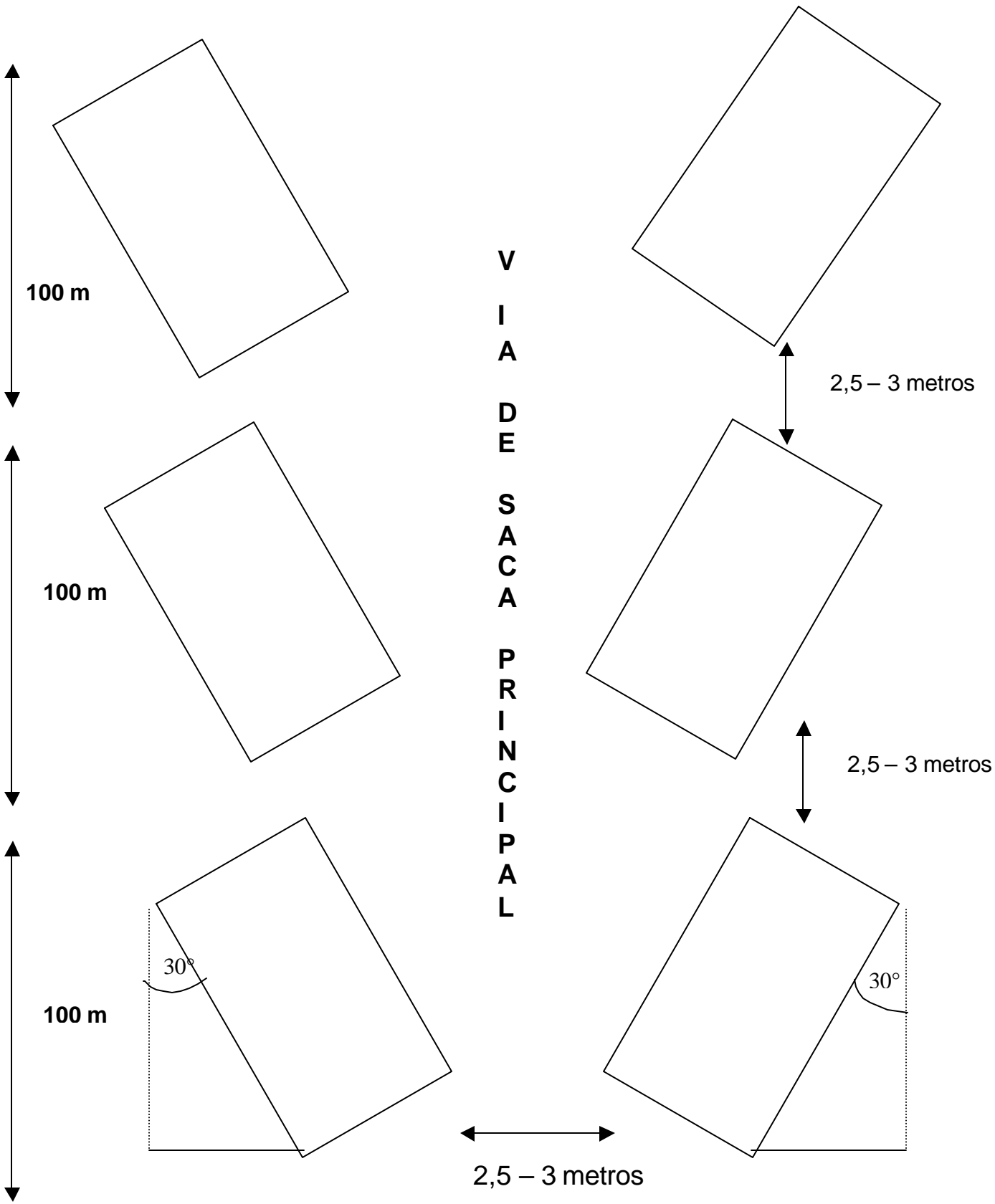
Uso actual del suelo	Superficie según uso Actual de suelo (ha)
Matorral	19,95
Plantación	224,9
Renoval	47,58
Terrenos de protección	128,67
Terrenos Administrativos	3,57
Otros ¹	11,02
Superficie total (ha)	435,69

¹ Incluye terrenos inundados, terrenos limpios y caminos

Anexo 6

Esquema de planificación de Vías de Saca y de Arrastre

Esquema de planificación de Vías de Saca y de arrastre



Nota: Dibujo no a escala

Anexo 7
Daño Tipo 1



Daño tipo 1



Daño tipo 1

Anexo 8
Daño Tipo 2



Daño tipo 2



Daño tipo 2

Anexo 9
Sin Daño



Sin daño

Anexo 10

Equipo utilizado para el maderero terrestre y especificaciones técnicas



Skidder D4H Serie II

Especificaciones técnicas:

- Modelo del motor 3204
- RPM del motor 2200
- Número de cilindros 4
- Área de contacto con el suelo 2,05 m²
- Entrevía 1,68 m
- Tipo de hoja recta 2,59 m
- Ancho de hoja PAT 2,54 m
- Capacidad de llenado del estanque de combustible 200 L

Anexo 11

Análisis de varianza para densidad y agrupamiento de la densidad por profundidad

Análisis de varianza para densidad

Fuente efectos principales	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrados	F	P-valor
A: Huella	2,23001	3	0,743337	55,51	0,0000
B: profundidad	0,751384	1	0,751384	56,11	0,0000
Residual	1,37921	103	0,0133904		
TOTAL	4,36061	107			

Agrupamiento de la densidad por profundidad. Método 95% Bonferroni

CONDICIÓN	N	MEDIA	ERROR ESTÁNDAR	GRUPOS HOMOGÉNEOS	
1: 0 a 10 cm	54	0,658953	0,0170033	A	
2: 10 a 20 cm	54	0,825773	0,0170033		B

Anexo 12

Análisis de regresión para densidad

Fuente efectos principales	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrados	F	P-valor
Densidad aparente	0,116256	1	0,116256	13,08	0,0013
Residual	0,23103	26	0,00888578		
TOTAL	0,347286	27			

Anexo 13

Análisis de regresión para humedad

PARÁMETRO	COEFICIENTE	ERROR ESTÁNDAR	T	P- VALOR
Constante	3,101084	0,128274	24,17539	0,0000
Humedad	-0,578097	0,031679	-18,24843	0,0000
R ² (%)	61,55			
F	0,0000			

Anexo 14

Agrupamiento de la resistencia al corte bajo condición ex – ante y después de la cosecha y análisis de Varianza

Agrupamiento de la resistencia al corte bajo condición ex – ante y después de la cosecha.

CONDICIÓN	N	MEDIA	ERROR ESTÁNDAR
1: ex - ante	135	43,3481	1,21386
2: después	130	86,4615	1,23698

Análisis de Varianza

Fuente efectos principales	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrados	F	P-valor
Entre grupos	123099,0	1	123099,0	618,85	0,0000
Dentro de grupos	52314,9	263	198,916		
TOTAL	175414,0	264			

Anexo 15
Muestreo por transectos



Muestreo por transectos