

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente

**EVALUACION DE LA COMPACTACION CAUSADA POR
HARVESTER Y FORWARDER SOBRE UN SUELO ARENOSO
EN RALEO COMERCIAL DE Pinus radiata D. Don**

Por

CHRISTIAN MANUEL MOYA LEON

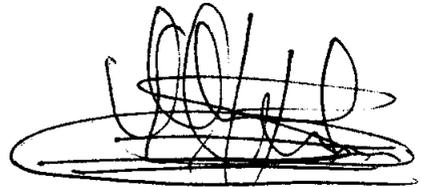
MEMORIA DE TITULO PRESENTADA
A LA FACULTAD DE CIENCIAS
FORESTALES DE LA UNIVERSIDAD
DE CONCEPCION PARA OPTAR AL
TITULO DE INGENIERO FORESTAL.

CONCEPCION - CHILE

1996

**EVALUACION DE LA COMPACTACION CAUSADA POR
HARVESTER Y FORWARDER SOBRE UN SUELO ARENOSO
EN RALEO COMERCIAL DE *Pinus radiata* D. Don**

Profesor Asesor



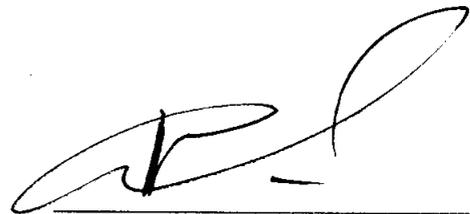
Manuel Lineros Parra
Profesor Asistente
Ingeniero Forestal Mg. Sc.

Profesor Asesor



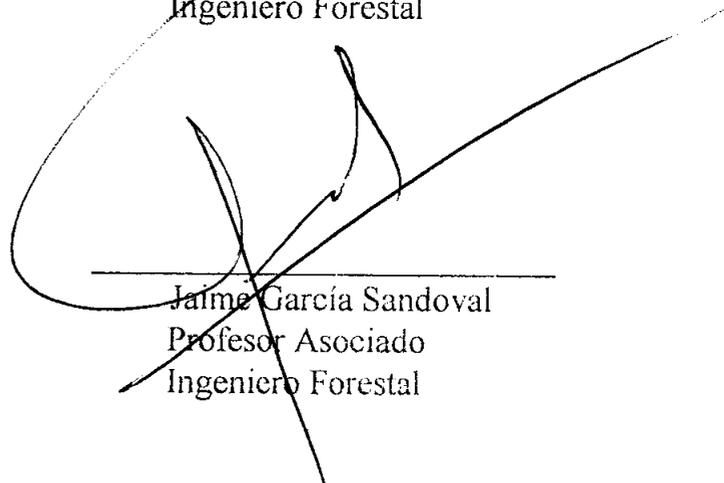
Miguel Espinosa Bancalari
Profesor Asociado
Ingeniero Forestal Ph. D.

Director Departamento Manejo
de Bosques y Medio Ambiente



Fernando Drake Aranda
Profesor Asociado
Ingeniero Forestal

Decano Facultad de Ciencias
Forestales



Jaime García Sandoval
Profesor Asociado
Ingeniero Forestal

DEDICATORIAS

A Dios.

A mi esposa Giovanna e hijo Nicolás, por su constante apoyo, cariño, dedicación y paciencia.

A mis padres Ana y Manuel y hermanos Boris y Karina, por la formación y sabios consejos que me dieron.

A mi abuelita Q.E.P.D., quien no pudo ver la conclusión de esta etapa.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Forestal Mininco S.A., quien me facilito la ayuda necesaria para realizar el estudio que dio origen a mi tesis.

A mi profesor asesor Don Manuel Lineros Parra, quien me orientó y apoyo durante todo el proceso de titulación.

A mi amigo y colega Don Alfredo Fuentes Sepúlveda, por su cooperación y ayuda en el análisis de los antecedentes.



INDICE DE MATERIAS

Capítulos	Página
I INTRODUCCION.....	1
II REVISION BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1 Generalidades	3
2.2 Variables del suelo.....	5
2.2.1 Densidad aparente.....	5
2.2.2 Resistencia a la penetración.....	11
2.2.3 Contenido de agua.....	16
2.3 Efecto de la compactación sobre las variables del suelo y crecimiento de las plantas.....	19
2.4 Disminución de la compactación.....	27
III MATERIAL Y METODO.....	29
3.1 Material y equipo.....	29
3.2 Metodología.....	30
3.2.1 Características del área de estudio.....	30
3.2.2 Características de las máquinas.....	31
3.2.3 Método de muestreo.....	33

3.2.4	Definición y medición de variables.....	33
3.2.5	Análisis estadístico.....	35
IV	RESULTADOS Y DISCUSION.....	36
4.1	Densidad aparente.....	36
4.2	Resistencia a la penetración.....	40
4.3	Contenido de humedad.....	45
V	CONCLUSIONES.....	49
VI	RESUMEN.....	51
	SUMMARY.....	52
VII	BIBLIOGRAFIA.....	53



INDICE DE TABLAS

Tabla N°	Página
<u>En el texto</u>	
1. Contenido de humedad para diferentes clases texturales.....	19
2. Valores prueba bondad de ajuste, Chi-cuadrado, para densidad aparente.....	36
3. Valores prueba homogeneidad de varianza, test de Cochran, para densidad aparente.....	37
4. Valores prueba análisis de varianza para densidad aparente.....	37
5. Valores prueba bondad de ajuste, Chi-cuadrado, para índice de cono.....	40
6. Valores prueba homogeneidad de varianza, test de Cochran, para índice de cono.....	41
7. Valores prueba análisis de varianza para índice de cono.....	41
8. Comparaciones múltiples, test de Tuckey, para índice de cono.....	42
9. Valores prueba bondad de ajuste, Chi-cuadrado, para contenido de humedad.....	45
10. Valores prueba homogeneidad de varianzas, test de Cochran, para contenido de humedad.....	45
11. Valores prueba análisis de varianza para contenido de humedad.....	46

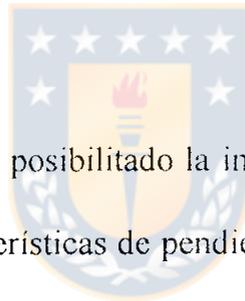
INDICE DE FIGURAS

Figura N°		Página
	<u>En el texto</u>	
1.	Máquina Harvester Nokka 6 WD.....	31
2.	Máquina Forwarder Timberjack 1010.....	32
3.	Densidad aparente en el perfil del suelo.....	38
4.	Indice de cono en el perfil del suelo.....	43
5.	Humedad en el perfil del suelo.....	47



I. INTRODUCCION

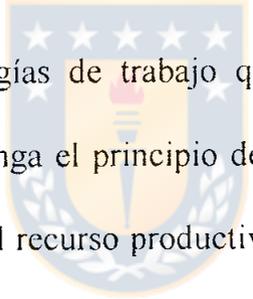
Los altos niveles de producción obtenidos por el sector forestal se han debido, principalmente, al personal especializado y uso de nueva tecnología. Dentro de esta última, la mecanización ocupa un rol importante, ya que ha logrado mejorar diversos componentes o etapas del sistema productivo, tales como: planificación, construcción de caminos, preparación de la madera, maderero o extracción y transporte.



El uso de nueva tecnología ha posibilitado la incorporación de nuevas áreas a la producción que por sus características de pendiente, clima y suelo no podían ser utilizadas, por los altos costos o por el gran daño ocasionado al recurso (Largo, 1985, citado por Lineros, 1994).

Sin duda, que una de las etapas que causa mayor estrago sobre el suelo, es la extracción forestal con maquinaria terrestre, utilizada en faenas de cosecha e intervenciones silvícolas intermedias, ya que el tráfico de vehículos se concentra en un breve período de tiempo y sobre una superficie determinada, causando un impacto inmediato.

La recuperación del suelo, luego de sometido a estos impactos, puede resultar irreversible y en el mejor de los casos tardar años en volver a su estado original (Donnelly y Shane, 1986). Su retorno a estos niveles depende de la severidad de las alteraciones provocadas al suelo, y éstas, del uso de maquinaria adecuada, planificación de la faena y época en que se realizó la intervención (Murphy, 1982). Una planificación anticipada y selección de equipos apropiados, permitirán reducir el deterioro causado al suelo (Gayoso et al., 1991).



La incorporación de metodologías de trabajo que minimicen las alteraciones provocadas al suelo y se mantenga el principio de rendimiento sostenido, son la base para conservar y mejorar el recurso productivo, manteniendo los niveles de producción exigidos para satisfacer las demandas en el largo plazo (Fuentes, 1993).

Para la elaboración de estas metodologías o pautas de trabajo, se hace necesario realizar estudios que permitan cuantificar las alteraciones que provocan los equipos de extracción forestal. Es así, como el objetivo del presente estudio fue evaluar la compactación sobre un suelo arenoso, producido por un sistema de extracción mecanizado, harvester - forwarder, en una faena de raleo comercial de *Pinus radiata* D. Don.

II. REVISION BIBLIOGRAFICA

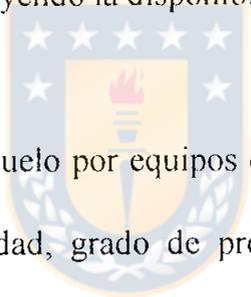
2.1 Generalidades.

Los avances en las técnicas de cosecha y utilización de productos madereros , han resultado en métodos y equipos capaces de remover gran cantidad de biomasa del bosque. Estos métodos son eficientes, pero requieren el uso de máquinas pesadas, las cuales pueden reducir la productividad del sitio por compactación del suelo y/o alteración de los estratos superiores de éste (Steinbrenner y Gessel, 1955, citados por Donnelly et al. ,1991).

Un suelo es compactado, cuando el conjunto de partículas y poros que lo conforman, son forzadas a entrar en contacto; a medida que esto ocurre, el suelo se acerca al límite plástico, causando un cambio proporcional en la tensión volumétrica (Bailey et al.,1984).

El daño que la compactación provoca a los suelos por la utilización de maquinaria , puede ser clasificada, según Murphy (1982), en:

1. Compresión del suelo, debido al peso de la máquina, que conduce a un incremento de la densidad aparente dificultando el crecimiento radicular de las plantas, reduciendo la aireación e infiltración y el crecimiento de micorrizas.
2. Deformación de la estructura del suelo, debido al paso del vehículo, reduciendo la infiltración y facilitando la formación de zonas anegadas.
3. Remoción del suelo, disminuyendo la disponibilidad de nutrientes.



El grado de compactación del suelo por equipos de cosecha, varía con la textura del suelo, contenido de humedad, grado de presión y vibración del vehículo (Shoulder y Terry, 1978; Heij y Leek, 1981, citados por Ole-Meludie y Njau, 1989).

Cuando el contenido de humedad es el óptimo y el suelo es de textura gruesa o no cohesivo, los procedimientos recomendados para producir la máxima compactación son: vibración, mojado y rodamiento. A medida que aumenta la cohesión, disminuye rápidamente la eficacia de las vibraciones como medio de compactación, pues por pequeña que sea la adherencia entre partículas, ésta interfiere con su tendencia a desplazarse a posiciones más estables. En estos

suelos más finos o cohesivos la compactación por capas utilizando rodillos neumáticos son los recomendados (Terzaghi et al., 1955).

El fenómeno de compactación reduce los espacios porosos, incrementando los niveles de densidad aparente; este incremento se asocia con un lento movimiento del agua, pobre aireación y aumento de la resistencia mecánica a la penetración radicular (Hatchell et al., 1970; Moehring, 1970; Wackentin, 1971 y Dickerson, 1976, citados por Ole-Meiludie y Njau, 1989).



2.2 Variables del suelo.

2.2.1 Densidad aparente. La densidad de un suelo, es una forma de expresar el peso de éste, y para ello se usan dos métodos. El primero llamado densidad de partículas, es el peso de una unidad de volumen de partículas sólidas de suelo, expresado en gramos por centímetro cúbico; comúnmente no se le atribuye mucha importancia como característica física del suelo, porque su rango de variación es muy estrecho, fluctuando, para aquellos suelos sin materia orgánica, entre 2.6 y 2.7 g/cm³ (Donoso, 1981).

El segundo método se conoce como densidad aparente y se define como el peso seco que ocupa una unidad de volumen de suelo; su importancia radica en que no es afectada por el ordenamiento de las partículas ni tamaño de los poros, pero si, por la porosidad total, la cual cuando el suelo es comprimido decrece, aumentando la densidad aparente (Erbach, 1987).

La magnitud de la densidad aparente para suelos agrícolas varía comúnmente entre 0.9 y 1.8 g/cm³ (Erbach, 1987); mientras que para suelos forestales el rango es de 0.6 a 1.9 g/cm³ (Wilde, 1958, citado por Donoso , 1981).

Normalmente, los factores del suelo que afectan la densidad aparente son la estructura y textura. Es así, como las texturas finas de suelos arcillosos tienden a tener valores bajos, en tanto que los suelos arenosos tienen en general densidades altas. La presencia de materia orgánica la afecta en forma considerable, contribuyendo a rebajar sus valores, debido a que ella facilita la granulación de los suelos, haciéndolos más sueltos y porosos (Donoso, 1981).

La densidad aparente de un suelo influye en la resistencia de éste para proyectos estructurales, traficabilidad de vehículos, animales y humanos. Afecta el crecimiento de las plantas, infiltración de agua y drenaje del suelo, potencia

requerida para arar el suelo y rendimiento de las herramientas de labranza. La densidad aparente es comúnmente usada para evaluar la eficiencia de las operaciones de labranza y el daño causado por la pasada del vehículo (Erbach, 1987).

La compactación reduce la porosidad total del suelo, limitando el crecimiento radicular, debido a una disminución en el oxígeno disponible (Graces y Sands, 1980); valores de porosidad de un 10% son generalmente considerados restrictivos para la proliferación de raíces (Bayer et al., 1972; Vocimil y Flocker, 1961; Grable , 1971, citados por Gent et al., 1984).

Respecto a los valores de densidad aparente que son perjudiciales para el crecimiento radicular, la literatura indica que para aquellos suelos de textura fina, ésta no debe exceder 1.4 g/cm^3 y en suelos de textura gruesa 1.6 g/cm^3 (Lull, 1959, citado por Gent et al., 1984). Mitchell et al. (1982), citados por Gent et al. (1984), determinaron reducciones significativas en el crecimiento de la raíz, para suelos con densidades entre 1.4 y 1.6 g/cm^3 , y además este crecimiento se detuvo cuando la densidad aparente alcanzaba valores de 1.8 g/cm^3 .

Veinhmeyer y Hendrickson (1948), citados por Cullen *et al.* (1991), concluyeron que varias especies de plantas de diferentes lugares climáticos fueron incapaces de penetrar la parte superior de los suelos, cuando la densidad aparente era mayor o igual a 1.9 g/cm^3 .

Fox y Page-Hanify (1958), plantearon que todos los métodos para medir la densidad aparente podrían ser divididos en dos grandes grupos: (1) los que consideran parte o porción del suelo en el laboratorio, y (2) los que consideran parte o porción del suelo en estado natural del terreno. Estos métodos se clasifican en directos e indirectos. Los primeros requieren remover una muestra del suelo de volumen conocido, barrenando o excavando éste. En cambio los segundos consideran la relación existente entre otras variables del suelo con la densidad aparente, de acuerdo a un patrón previamente establecido (Erbach, 1987).

Los métodos directos más usados son: (1) del terrón, y (2) del cilindro. El primero considera la toma de una muestra de suelo, de la cual se obtiene un terrón de tamaño suficiente para que quepa en el vaso del equipo, se amarra con una pequeña hebra muy fina y se pesa. Se toma una muestra de suelo adicional que es colocada al horno por 24 a 48 horas a $105 \text{ }^\circ\text{C}$, para la determinación del

porcentaje de humedad. El terrón ya pesado se sumerge por algunos segundos en parafina sólida calentada a 70 °C, tratando que la muestra quede cubierta por una delgadísima capa de parafina y totalmente impermeabilizada. Una vez frío el terrón, se sumerge en un vaso precipitado con agua destilada ubicado sobre una balanza de precisión previamente tarada y se determina el peso del líquido desplazado. De acuerdo con el principio de Arquímedes y considerando que la densidad del agua es 1 g/cm³, el peso del líquido desplazado corresponde al volumen del terrón. Para obtener la corrección del contenido de agua del suelo, se debe pesar la submuestra ubicada en el horno de secado (Vidal, 1995).

El segundo método directo - del cilindro - considera el uso de un cilindro de metal, hueco, que es introducido verticalmente en el suelo a una profundidad determinada y luego retirado con un volumen conocido de éste. Existen diversos tipos de cilindros, que pueden ser empujados, atornillados o golpeados en el suelo, pero el desarrollo o diseño de éstos, debe considerar el esfuerzo a que son sometidos al introducirlos continuamente en el suelo, causando la mínima alteración de la muestra (Erbach, 1987). Una vez seleccionado el lugar donde se tomará la muestra, suelo no alterado, se elimina cuidadosamente la vegetación, se introduce el cilindro en la estrata deseada, si es necesario colocar un segundo cilindro y sobre él un trozo de tabla para golpear con una fuerza uniforme de tal

forma que se introduzca el primer cilindro. Luego con una pala se saca el cilindro nivelando los extremos con espátula, posteriormente, son llevadas al laboratorio para ser secadas en horno a 105 °C por 48 horas. Luego se pesa el suelo contenido en el cilindro y se mide la altura y diámetro interno de éste. La densidad aparente será calculada al dividir el peso del suelo seco ocupado en el cilindro por el volumen del mismo (Vidal, 1995).

Dentro de los métodos indirectos, los más comunes son: (1) por radiación, y (2) de resistencia del suelo. El primero considera que hay una razón constante masa-electrón para la mayoría de los elementos en el suelo, ésta es la base física en el uso de rayo gamma para medir la densidad aparente (Freitag, 1971). Vocimil (1954), propuso el uso de la absorción de rayo gamma para medir la densidad del suelo. La transmisión de radiación gamma a través del suelo o irradiación dentro del suelo varía con las propiedades de éste, incluyendo la densidad, la cual puede ser relacionada con el cambio en la atenuación de radiación gamma en el suelo comparado con la atenuación en el aire (Ravut y Rode, 1969), citados por Erbach (1987).

El segundo método - resistencia del suelo - se basa en una medición indirecta de la densidad aparente, relacionando matemáticamente esta variable con la

compactación de un suelo, expresado por el índice de cono, ya que, está afectada por varios factores, tales como: densidad aparente, contenido de humedad y tipo de suelo (Ayers y Perumpral, 1982). Varios investigadores utilizan este método para estimar la densidad del suelo, para lo cual han desarrollado y validado diferentes modelos matemáticos tendientes a relacionar la densidad aparente con otras variables, tales como: índice de cono, contenido de humedad, textura del suelo, volumen inicial y final, esfuerzo de corte, presión aplicada y otras (Ayers y Perumpral, 1982; Bailey et al., 1984 y Ohu et al., 1988).

2.2.2 Resistencia a la penetración. En la mecánica de suelos agrícolas, las propiedades más relevantes del suelo son las relacionadas con las fuerzas aplicadas a éste. Estas propiedades son denominadas de resistencia, las que varían en el tiempo por la influencia del clima, manejo del suelo y crecimiento de las plantas. La determinación de estas propiedades es a través de predicciones de resistencia al corte y resistencia a la penetración, cuyos valores dependen en gran medida de la densidad aparente y contenido de humedad (Ohu et al., 1988).

La importancia de la resistencia al corte de los suelos, ha sido ampliamente estudiada en trabajos de ingeniería de suelo. El problema es fundamental en la remoción de caminos, movimiento de tierra y labranza de suelos, lo que implica

conocer los parámetros de tensión de corte en los suelos. Estos pueden ser exactamente medidos por medios teóricos o trabajos prácticos. Algunos de estos medios utilizados para medirla son : herramientas torsionales, aparatos triaxiales, caja de corte y también fórmulas empíricas (Bailey y Weber, 1965).

La resistencia a la penetración se define como la fuerza de reacción, producto del elemento cortante en el suelo; los instrumentos utilizados para medirla son los denominados penetrómetros, los cuales pueden ser introducidos en el suelo mediante dos formas básicas: (1) tipo de empuje en el cual la punta del instrumento es presionada lentamente dentro del suelo, y (2) tipo de impacto, en el cual el instrumento es soltado o impulsado dentro del suelo por un martillo. El primero proporciona una forma conveniente de asegurar una curva continua de resistencia en profundidad, y el segundo permite la penetración de un suelo en condiciones firmes (Gill, 1968).

Un penetrómetro consiste en una delgada varilla de 19 a 80 mm de diámetro, la cual es empujada a través del suelo, registrando en un sensor la fuerza de reacción del suelo que se opone al empuje. La idea de empujar la varilla dentro del suelo, es muy antigua, y se remonta al año 1846, cuando en Francia, Collin usó una

varilla de un milímetro de diámetro y un kilogramo de peso, para determinar la cohesión de diferentes tipos de arcilla de variada consistencia (Sanglerat, 1972). En la actualidad se diseñan penetrómetros que utilizan un cono con cierto ángulo de punta, el cual puede variar dependiendo del objetivo de la investigación y de las características del suelo (Sanglerat, 1972).

Uno de los penetrómetros que ha tenido más aplicaciones es el penetrómetro de cono, desarrollado por la United States Army Corps of Engineers Waterway Experiment Station (WES, 1948), usado para determinar la traficabilidad de un suelo. El penetrómetro de cono consiste en un cono circular de 30° con un área basal de 3.2 cm². El índice de cono mide la fuerza por área basal requerida para penetrar este cono dentro del suelo a una velocidad de 1829 mm/min (Ayers y Perumpral, 1982).

El penetrómetro de cono ha sido empleado para varias aplicaciones, incluyendo la predicción de la capacidad de tracción de un vehículo en un camino (Freitag y Richardson, 1968; Wismer y Luth, 1972), caracterización de los suelos en términos de capacidad de crecimiento de cultivos (Raghavan y McKyes, 1977), determinación de la resistencia a la penetración de las raíces y emergencia de plantas (Bowen, 1976; Taylor y Gardner, 1963; Morton y Buchete, 1960),

predicción en el diseño de fuerzas (Johnson et al., 1978), y evaluar la compactación causada por el tráfico vehicular (Sloane, 1973, Chesness et al., 1972); todos los autores citados por Ayers y Perumpral (1982).

Una de las aplicaciones del penetrómetro de cono más importantes para los forestales, es aquella relacionada con la penetrabilidad de las raíces en el suelo, ya que influye directamente en el crecimiento de las plantas. Bowen (1981), citado por Ohu et al. (1988), afirma que el crecimiento radicular en suelos alterados, se dificulta por la mayor resistencia a la penetración, y que ésta se desarrolla porque (1) el suelo ha sido compactado por la aplicación de fuerzas durante la tracción o labranza de éste; (2) por la agregación de partículas por una excesiva aradura y pérdida de materia orgánica; y (3) por aumento de la cohesión del suelo por pérdida de agua en él.

Cuando los valores de resistencia a la penetración fluctúan entre 250 y 300 N/cm², producen serios problemas de crecimiento radicular en plantas de algodón; mientras que con resistencias menores a 158 N/cm², las raíces penetran sin dificultad (Taylor y Burnett, 1963). Sin embargo, la habilidad de una planta para que sus raíces penetren el suelo, depende de la rigidez de ésta, tipo de

planta y densidad del sustrato (Taylor y Gardner, 1964, citados por Henry y McKibben, 1967).

Sower et al. (1965), citados por Henry y McKibben (1967), determinaron que la resistencia a la penetración medida con un penetrómetro de cono, depende de las fuerzas cohesivas del suelo; sin embargo, la cohesión es afectada por el contenido de humedad del suelo y otros factores (textura y fricción interna del suelo).

La cohesión se produce por la tensión de agua existente en los poros y más recientemente se le ha atribuido a las fuerzas capilares y a la estructura de las partículas, por lo tanto, tiene gran implicancia en las fuerzas de resistencia a la penetración (Sanglerat, 1972).

Los suelos arcillosos se diferencian de los arenosos por su alta cohesión, lo que les permite gran plasticidad dentro de un amplio rango de humedad, pero, cuando éste límite se aproxima al nivel inferior de la zona plástica, pierden humedad, aumentando su resistencia y compactabilidad (Terzaghi et al., 1955). Lo anterior fue observado por Ayers y Perumpral (1982), donde el máximo índice de cono depende de un contenido de humedad específico y los incrementos del porcentaje de arcilla en el suelo.

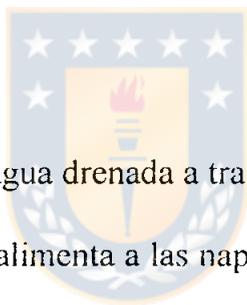
Sands et al. (1979), citados por Erbach (1987), determinaron que en suelos arenosos la resistencia a la penetración es independiente del contenido de humedad y está directamente relacionado con la densidad aparente.

2.2.3 Contenido de agua. El contenido de humedad del suelo, es el agua que circula por éste y que puede ser removida a través de un secado del suelo en un horno a 105 °C, hasta que el peso de la muestra se hace constante. El contenido de agua se basa en el peso seco y se expresa generalmente en unidad de masa por unidad de volumen (Vidal, 1995).

Los métodos desarrollados para determinar el contenido de agua del suelo son innumerables, pudiendo agruparse en dos tipos, directos e indirectos. En los métodos directos es necesario separarla físicamente del suelo, generalmente por secado o evaporación; la cantidad de agua removida se determina midiendo la pérdida de peso de la muestra; éste método depende de las características texturales y estructurales de la muestra, variando significativamente el tiempo de secado necesario para llegar a un peso constante. Los métodos indirectos se aprovechan de alguna propiedad física y físico-química del suelo, que sea función del contenido de agua; cuando puede calibrarse la variación, estas

propiedades resultan útiles para caracterizar el suelo respecto a su contenido de agua (Gurovich, 1985).

La cantidad de agua medida por los métodos anteriores, depende principalmente del agua que se infiltra en el suelo y es retenida durante mayor o menor tiempo en él por fuerzas de cohesión, adhesión y tensión superficial, que permiten clasificarla desde el punto de vista físico en tres formas diferentes (Donoso, 1981):



a.-) **Agua gravitacional**, es el agua drenada a través de los macroporos por efecto de la fuerza de gravedad y que alimenta a las napas freáticas; este tipo de agua es la principal responsable de la lixiviación o translocación de coloides y nutrientes hacia horizontes inferiores del suelo. El aprovechamiento del agua gravitacional será mejor en suelos de texturas finas, porque en ellos el agua demora más en percolar que en los suelos de texturas gruesas.

b.-) **Agua capilar**, es la porción de agua que ha infiltrado en el suelo y queda retenida alrededor de las partículas del suelo y en los microporos o poros capilares después que el agua gravitacional ha descendido; este tipo es retenida por atracción entre las moléculas del agua y las del suelo, adhesión, y por atracción

entre las moléculas de agua, cohesión. El movimiento del agua capilar se efectúa gracias a la tensión superficial, de tal modo que se mueve a través de un gradiente capilar desde las áreas de más baja tensión a las de mayor tensión, es decir, desde las zonas húmedas a las secas; este tipo de agua constituye la fuente de casi toda la que ocupan las plantas.

c.-) **Agua higroscópica**, es aquella capa muy delgada de agua que queda retenida fuertemente por fuerzas de adhesión a las partículas de suelo, una vez que el suelo ha perdido toda su agua capilar; es decir, este tipo de agua no puede ser movido por la gravedad ni por la tensión superficial. La mayor parte de esta agua se mantiene fuertemente unida a las partículas coloidales e inorgánicas del suelo; se estima que en las arcillas finas un 20% del agua es higroscópica, en tanto que en las arenas es hasta menos de un 1% (Luz y Chandler, 1959, citados por Donoso, 1981).

Si bien estas tres formas de agua determinan el contenido de humedad existente en el suelo, éstas dependen del tamaño y naturaleza de las partículas que lo conforman, determinando así su grado de cohesión y adhesión entre el agua y las partículas. Akram y Kemper (1979) determinaron distintos niveles de humedad para cinco clases texturales (tabla I).

TABLA 1. CONTENIDO DE HUMEDAD PARA DIFERENTES CLASES TEXTURALES.

Clase textural	Porcentaje			Contenido humedad (%) BPS
	Arena	Arcilla	Limo	
Areno francoso	83	7	10	11.1
Franco arenoso	70	10	20	18.6
Franco arenoso	60	10	30	17.6
Franco arcilloso	39	32	29	23.8
Arcillo limoso	16	44	40	24.9

La humedad de un suelo influye en el crecimiento de las plantas, época de plantación, equipos de aplicación química, traficabilidad de los equipos y cambios en la densidad aparente causado por uso y paso de animales (Erbach, 1987).

2.3 Efecto de la compactación sobre las variables del suelo y crecimiento de las plantas.

Prácticas de manejo intensivo en los suelos forestales, han incrementado el uso de máquinas pesadas, pero el tráfico de estas máquinas altera las propiedades físicas del suelo y disminuye la productividad del sitio (Perry, 1964, citado por Gent *et al.*, 1984).

El uso de equipos pesados ha sido la causa fundamental en la compactación del suelo, el cual persiste por más de cinco años dependiendo del contenido de arcilla en el suelo (Hakansson *et al.*, 1987, citados por Lowery y Schuler, 1991).

Las zonas no compactadas poseen alta porosidad y baja densidad aparente, variables que son alteradas por la compactación, reduciendo la tasa de crecimiento de los árboles por un largo tiempo (Froehlich et al., 1985).

Little y Mohr (1979), detectaron reducciones significativas en la densidad aparente después de 3 años de compactado el suelo; Troud y Frissel (1976), reportaron que luego de cesar la compactación, la densidad aparente decrece hasta alcanzar niveles de precompactación en 8 años; Legg y Schneider (1977), obtuvieron que la densidad aparente no retornó a los niveles iniciales, cuando la cosecha se realizó en período de invierno (todos los autores citados por Donnelly y Shane, 1986).

Dickerson (1976), citado por Froehlich et al. (1985), determinó que la recuperación de la densidad aparente en suelos arenosos, compactados por la cosecha, ocurrió después de 12 años. En un suelo granítico, retorna a valores semejantes a los iniciales, 23 años después de la cosecha (Froehlich et al., 1985).

La recuperación de la densidad aparente a niveles iniciales, se explica porque el crecimiento radicular rompe, cuando es posible, las estratas compactadas e

incorpora nuevamente la actividad microbiana (Holman et al., 1978, citados por Donnelly et al., 1986).

La intensidad de daño medida como incremento de la densidad aparente, muestra que las mayores compactaciones ocurren en la capa superficial del suelo. Por ejemplo, Gayoso et al. (1991), obtuvieron incrementos del 85% en los primeros centímetros; Fuentes (1993), determinó un aumento cercano al 22% en la superficie y un 10% a los 20.0 cm de profundidad; Froehlich (1979), obtuvo un aumento del 18% entre los 8.0 y 15.0 cm de profundidad y un 9% entre los 20.0 y 30.0 cm de profundidad; y Taylor y Burnett (1963), determinaron un incremento de 9% hasta los primeros 10.0 cm de profundidad.

Gent et al. (1984), observaron que los máximos incrementos de densidad aparente ocurren bajo la huella de madereo hasta los 30.0 cm de profundidad; Lineros (1994), presentó los mayores aumentos hasta los 20.0 cm de profundidad; y Cullen et al. (1991), obtuvieron diferencias significativas hasta los 15.0 cm de profundidad.

Blake et al. (1976), citados por Lowery y Schuller (1991), determinaron que la densidad aparente y la resistencia a la penetración en un suelo compactado fueron

mayores durante diez años después de aplicadas las fuerzas de compactación. Mientras estos últimos, concluyeron que la resistencia a la penetración es mayor en suelos compactados, perdurando su efecto por más de 4 años.

Los valores de índice de cono para suelos arenosos son significativamente menores que los obtenidos para suelos que contienen un cierto porcentaje de arcilla (Ayers y Perumpral, 1982). Según Lineros (1994), el índice de cono en un suelo arcilloso puede incrementarse un 720% a nivel superficial y un 43% a los 40.0 cm de profundidad.

La compactación puede alterar la capacidad de retención de agua de los suelos, reduciéndola cuando las texturas son finas, mientras que esta disponibilidad de agua puede aumentarse cuando son de texturas gruesas (Myder y Sneva, 1956; Rashid y Sheikh, 1977, citados por Cullen *et al.*, 1991).

El contenido de humedad de un suelo arenoso sometido a compactación fue incrementado en un 25%, por una reducción de los macroporos, aumentando los espacios porosos pequeños o microporos (Donnelly y Shane, 1986).

En general, los suelos con altas densidades aparentes tienen bajas tasas de infiltración; las mayores disminuciones se producen en suelos arcillosos, a su vez, las más rápidas recuperaciones ocurren en estos mismos suelos, producto de los ciclos de humedecimiento y secado del suelo (Akram y Kemper, 1979).

Donnelly y Shane (1986) , determinaron que la velocidad de infiltración se redujo seis veces cuando el suelo fue compactado, mientras que Fuentes (1993), obtuvo una reducción de diez veces la velocidad de infiltración en suelo compactado.

Ole-Meiludie y Njau (1989), obtuvieron que la compactación reduce sustancialmente la velocidad de infiltración, remueve la materia orgánica, puede resultar en un riesgo de erosión potencial y alteran la productividad del sitio.

Wert y Thomas (1981), obtuvieron que después de 32 años el volumen de *Pseudotsuga mensiezii* creciendo en vías de saca es 74% menor que el volumen en zonas no compactadas. Estos resultados son altos, al compararlos con los obtenidos por Power (1974) y Perry (1964), ambos citados por Wert y Thomas (1981), donde el primero obtuvo que el volumen de *Pseudotsuga mensiezii* creciendo en vías de saca es un 40% menor que el volumen creciendo fuera de éstas; mientras que el segundo reportó una reducción de 50% del volumen de *Pinus taeda* creciendo en suelos compactados, 26 años después de la cosecha.

Froehlich (1979), obtuvo una reducción del crecimiento en *Pinus ponderosa*, de un 6% en áreas moderadamente compactadas y un 12% en aquellas áreas altamente compactadas, en un período de 16 años.

Firth y Murphy (1989), obtuvieron que el crecimiento en altura de *Pinus radiata* en huellas de madereo es menor 1.0 m respecto al control después de 4 años, aumentando esta diferencia a 1.5 m luego de 6 años y sólo empezó a disminuir al séptimo año cuando la diferencia en altura se redujo a 1.1 m. Concluyeron también que a 4 años de realizada la plantación, el 49% de los árboles en la huella de madereo presentaba malformaciones (doble flecha y doblados), contra un 38% de los árboles creciendo fuera de la huella de madereo.

Lowery y Schuler (1991), en un estudio realizado sobre la duración de los efectos de la compactación, concluyeron que la aplicación de fuerzas de compactación de 8 y 13 toneladas, reducen durante el primer año de crecimiento, la altura de las plantas entre un 13 y 26%, respectivamente; tres años después de la compactación la reducción del crecimiento en altura con relación al control fue de 3.1 y 4.3%.

La reducción del crecimiento en altura de *Pinus radiata* creciendo en suelos graníticos compactados, alcanza aproximadamente un 36% en el primer año,

aumentando esta diferencia hasta el cuarto año, donde alcanza un 50%, para luego comenzar a decrecer hasta un 38% en el noveno año; estas reducciones son mayores que las obtenidas en suelos trumaos compactados, donde se aprecia una reducción máxima de un 30% en altura al cuarto año y un 20% en el octavo (Gayoso et al., 1991).

Respecto al número de pasadas necesarias para producir compactación, la Santee Experimental Forest, determinó que la máxima compactación ocurre en la superficie del suelo después de la primera o segunda pasada del equipo, y un incremento gradual hasta que el número de pasadas se incrementa a nueve (Hatchell et al., 1970, citados por Gent et al., 1984).

Gayoso et al. (1991), obtuvieron que durante la primera aplicación de carga, correspondiente a las primeras pasadas del vehículo, ocurre la mayor parte de la compactación. Esta es mayor mientras aumenta la intensidad de carga aplicada y mayor es la saturación en el suelo.

Según los resultados obtenidos por Cullen et al. (1991) la máxima compactación ocurre durante la primera o segunda pasada del equipo. Mientras que Campbell (1974), citado por Gent et al. (1984), fundamenta que la máxima compactación

ocurre después de diez pasadas del equipo, aunque luego de la tercera pasada la compactación es un 7% menor que el máximo obtenido.

Murphy (1982), estudiando el daño causado al suelo por cinco máquinas de extracción, usadas en raleos comerciales, en zonas pobladas con *Pseudotsuga mensiezii*, determino que: (1) la extensión de área dañada por compactación, decrece a medida que la densidad post-raleo aumenta; y (2) la severidad del daño causado al suelo, depende exclusivamente del tipo de máquina, número de pasadas y condiciones del suelo.

La extensión de las alteraciones del suelo provocadas por la cosecha forestal, dependen del sistema de extracción, y en éste las vías de saca. Por ejemplo, en madereo con skidder las huellas ocupan el 40% de la superficie cosechada, en madereo con bueyes ocupan un 16% de la superficie y con torres ocupan sólo un 3% de la superficie cosechada (Gayoso et al., 1991).

Murphy (1984), citado por Firth y Murphy (1989), coincide en que el uso extensivo de las vías de saca en madereo con skidder puede cubrir hasta el 50% del área cosechada, pero que esto depende de las máquinas usadas, plan de cosecha y factores del sitio.

Otro efecto de la compactación es la disminución del contenido de nutrientes absorbidos por las plantas, principalmente nitrógeno y potasio, en cambio aumenta la absorción de hierro, aluminio y manganeso (Lowery y Schuller, 1991).

2.4 Disminución de la compactación.

Si bien es cierto que los procesos naturales, tales como la meteorización mecánica y biológica, tienden a disminuir las pérdidas producidas por la compactación, haciendo que este efecto no persista en el largo plazo (Froehlich et al., 1985; Gayoso et al., 1991), es necesario buscar alternativas de manejo, tendientes a prevenir o disminuir la compactación de los suelos.

Una medida eficiente es la planificación anticipada de la cosecha, minimizando principalmente el área de las vías de madereo (Gent et al., 1984). El diseño de una red de vías de saca para skidder sobre las áreas de cosecha permitió estimar que la superficie alterada no debiera superar el 10% del área total (Gayoso et al., 1991).

La aplicación sobre el suelo, de mulch de corteza, previo al desplazamiento vehicular, se considera un método efectivo para disminuir la compactación; sin

embargo, ésta cubierta aplicada en los senderos de parques, como método para minimizar la alteración del suelo, aún no ha sido estudiada (Donnelly y Shane, 1986).

El uso de equipos de cosecha más livianos, o que distribuyen su peso en más puntos de apoyo, puede particularmente reducir los efectos de la compactación (Ole-Meiludie y Njau, 1989). Malmer y Grip (1990), citados por Lineros (1994), recomiendan sistemas de madereo por cables o de extracción manual.

El subsolado puede ser usado como un sistema de conservación de cultivo, ya que rompe las estratas compactadas del subsuelo, aumentando la porosidad y sus beneficios hasta el segundo año después de aplicado. Sin embargo, dos pasadas de tractor recompactan nuevamente el suelo; por ello, es esencial considerar un control de tráfico para aumentar los beneficios del subsolado en el largo plazo (Reeder et al., 1993).

III. MATERIAL Y METODO

3.1 Material y equipo.

Para la ejecución del estudio se utilizó el siguiente material y equipo:

- Penetrómetro, manómetro marca Skokie graduado cada 5 lb con un diámetro de cono de 13 mm.
- Cilindros de densidad aparente, de cobre con una altura de 35 mm y diámetro de 51 mm.
- Balanza electrónica, marca Precisa modelo 900C - 3000D precisión 0.001 g capacidad de 3000 g.
- Horno de secado, eléctrico marca Kottermann modelo 2711, precisión 5 °C con capacidad de 250 °C.
- Palas rectas, de 20 x 30 cm y azahachas.
- Espátula, con lámina acerada de 7 x 15 cm.
- Bolsas plásticas de material transparente de 15 x 25 cm.
- Otros materiales de medición y marcación, regla graduada de 30 cm, huincha de distancia de 50 m, etiquetas adhesivas y spray blanco.

3.2 Metodología.

3.2.1 Características del área de estudio. El área de estudio forma parte del predio Lomas Coloradas, ubicada en la comuna de Coronel , a 12 km del camino que une Concepción - Coronel, VIII Región, de propiedad de la empresa Forestal Mininco S.A.

El área presenta una serie de suelos Arenales, de textura principalmente arenosa a excepción de los primeros centímetros donde existe un bajo porcentaje de arcilla producto del escurrimiento de suelos mas altos; su geomorfología y topografía corresponde a un suelo de posición baja, de lomajes suaves y erosión incipiente.

Para el desarrollo del estudio, se consideró un área de 8.75 ha, que forma parte de un rodal de *Pinus radiata* D. Don de 10 años de edad, y en el cual se realizó un raleo comercial en la temporada estival de 1996, con equipo mecanizado harvester - forwarder, identificándose en el suelo las huellas que fueron generadas por las ruedas de los vehículos. El rodal fue raleado y podado a los 7 y 10 años, dejando densidades residuales de 600 y 260 árb/ha; respectivamente. Las actuales características dasométricas del rodal son un DAP de 20.0 cm, altura total de 14 m y altura de poda de 6.3 m.

3.2.2 Características de las máquinas. La **Harvester Nokka 6WD**, es una cosechadora articulada de ruedas neumáticas, cuyas funciones son voltear, desramar y trozar los árboles. Sus principales características técnicas son: dirección hidráulica con radio de giro de 4.2 m, potencia de 113 HP, peso operacional 9570 kg, tracción en las seis ruedas y transmisión hidrostática; además posee un brazo cargador extendible de 8.0 m, que termina con un cabezal Keto 100 y cuya espada permite un diámetro de corte inferior a 40.0 cm. La cabina esta equipada con todos los instrumentos de medición (tacómetro, horómetro, temperatura, voltímetro) y un computador que registra el volumen de los árboles trozados. Las dimensiones de esta máquina se presentan en la figura 1.

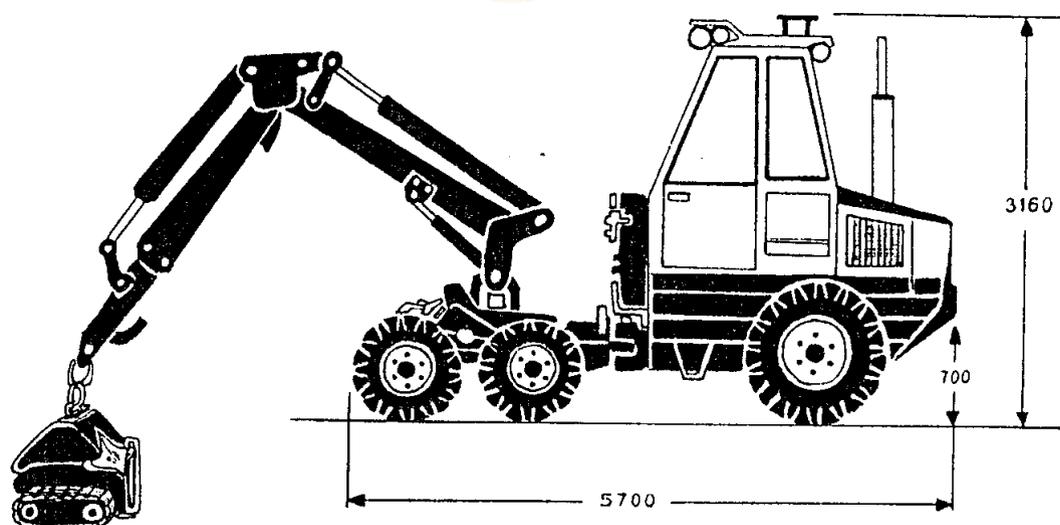


FIGURA 1. Máquina harvester Nokka 6WD.

El **Forwarder Timberjack 1010**, es un autocargador articulado, cuya función es transportar los trozos dispersos en el bosque. Algunas de sus características son: dirección hidráulica que puede oscilar en ángulo de 40°, potencia de 110 HP, peso operacional de 13330 kg (49% eje delantero y 51% eje trasero), tres velocidades bajas, tres altas y una reversa, velocidad máxima 34 Km/hr, tracción en las seis ruedas, suspensión balanceada FMG Full, telescopio de 6.8 m de extensión; además posee instrumentos esenciales de medición, tales como, horómetro, tacómetro, voltímetro y marcador de temperatura. La cabina esta equipada con aire acondicionado, asiento ajustable, controles manuales y radio cassette AM/FM. Las dimensiones de esta máquina se presentan en la figura 2.

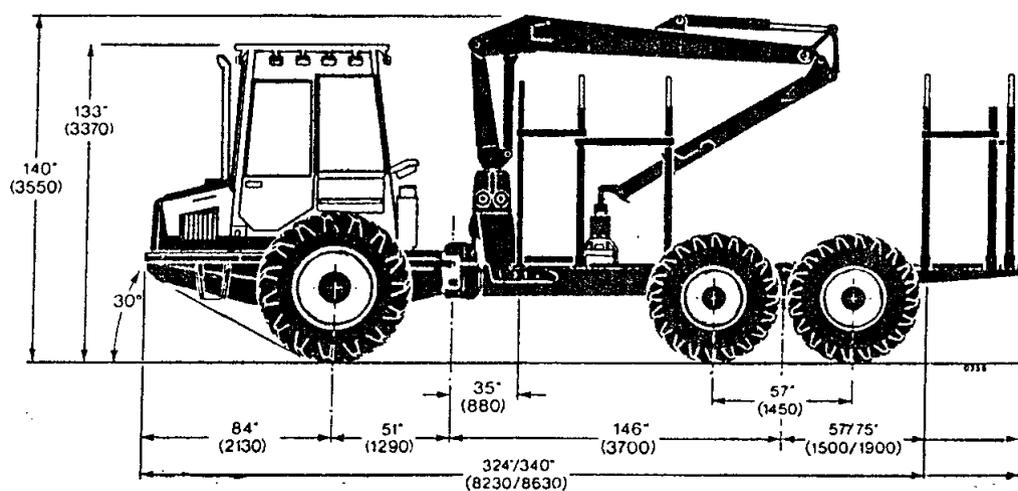


FIGURA 2. Máquina forwarder Timberjack 1010.

3.2.3 Método de muestreo. Se realizó un muestreo completamente aleatorio, seleccionándose dos huellas de 100 m de longitud claramente identificadas, una de ellas producto del paso del harvester y la otra producto del paso del harvester más el forwarder. Cada huella, fue seccionada cada un metro, estableciéndose un número finito de unidades muestrales. En cada una, en forma aleatoria e independiente, fueron seleccionadas 10 unidades muestrales. Paralelo a una de estas huellas y a una distancia de 5 m en suelo no alterado, se establecieron diez unidades de control.



3.2.4 Definición y medición de variables. En cada unidad muestral se realizó una calicata en forma escalonada, definiéndose siete niveles de profundidad: 0.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0 y 60.0 cm, con el objeto de medir el comportamiento en profundidad de las variables en estudio. Los análisis de laboratorio fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción.

Densidad aparente, con cilindros de volumen conocido, fueron extraídas las muestras de suelo y depositadas en bolsas plásticas. Luego fueron llevadas al laboratorio donde se efectuó su pesaje inicial en suelo húmedo, posteriormente fueron secadas a 105 ° C hasta alcanzar su estado anhidro y finalmente pesadas.

Para la cuantificación de ésta variable se consideraron cuatro niveles de profundidad: 0.0, 20.0, 40.0 y 60.0 cm. La densidad aparente se obtuvo de la siguiente relación:

$$D_a = M_s / V$$

donde:

D_a = Densidad aparente, g/cm³.

M_s = Masa seca muestra de suelo, g.

V = Volumen del cilindro, cm³.

Contenido de Humedad, con los valores de masa húmeda y masa seca, de las muestras de suelo mencionadas anteriormente, se estimó la cantidad de agua utilizando la siguiente relación:

$$W_{ss} = ((M_h / M_s) - 1) \times 100$$

donde:

W_{ss} = Contenido de agua base peso seco, %.

M_h = Masa húmeda muestra de suelo, g.

M_s = Masa seca muestra de suelo, g.

Resistencia a la penetración, en cada unidad muestral y nivel de profundidad se realizaron tres mediciones con el penetrómetro, de las cuales se obtuvo un promedio; el cociente entre éste valor y el área del cono determina la resistencia a la penetración, expresada como **índice de cono** en N/cm².

3.2.5 Análisis estadístico. Este análisis se realizó con un nivel de significancia del 95% y consideró una dosificación de los supuestos básicos de normalidad, utilizando la prueba Chi-cuadrado y homogeneidad de varianza, utilizando para ello el Test de Cochran. Una vez verificado los supuestos, se procedió a establecer los análisis de varianza que indican si las variables en estudio presentan diferencias significativas entre las dos huellas y el control, para los distintos niveles de profundidad. Cuando los análisis de varianza fueron significativos se realizó un test de comparaciones múltiples - Test de Tuckey - el cual permite comparar cada una de las huellas con el control y ambas huellas a la vez, determinando así, las diferencias significativas existentes para cada variable en los niveles de profundidad identificados en el estudio (Cochran y Cox, 1983).

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Densidad aparente.

Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste, Chi-cuadrado, para probar la normalidad de esta variable, tanto en las huellas y el control, indican que la densidad aparente posee distribución normal (tabla 2).

TABLA 2. VALORES PRUEBA BONDAD DE AJUSTE, CHI-CUADRADO, PARA DENSIDAD APARENTE.

Profundidad (cm)	X ² calculado			X ² tabulado
	Control	H	H + F	
00.0	1.901	0.505	1.655	5.990
20.0	0.478	2.555	1.454	5.990
40.0	2.555	1.087	1.635	5.990
60.0	0.285	0.501	1.669	5.990

($\alpha \leq 0.05$; H = harvester; H + F = harvester más forwarder)

Los valores de la prueba de homogeneidad de varianza - test de Cochran - entre las poblaciones de las huellas y el control para los niveles de profundidad considerados se presentan en la tabla 3.

TABLA 3. VALORES PRUEBA HOMOGENEIDAD DE VARIANZA, TEST DE COCHRAN, PARA DENSIDAD APARENTE.

Profundidad (cm)	R calculado	R tabulado
00.0	0.480	0.616
20.0	0.377	0.616
40.0	0.551	0.616
60.0	0.431	0.616

($\alpha \leq 0.05$)

El análisis estadístico indica que las varianzas son homogéneas entre las poblaciones de las huellas y el control para los niveles de profundidad indicados.

Los análisis de varianza para determinar diferencias significativas en las huellas y el control para cada nivel de profundidad, se presentan en la tabla 4.

TABLA 4. VALORES PRUEBA ANALISIS DE VARIANZA PARA DENSIDAD APARENTE.

Profundidad (cm)	F calculado	F tabulado
00.0	3.168	3.544
20.0	0.744	3.544
40.0	0.140	3.544
60.0	3.148	3.544

($\alpha \leq 0.05$)

La densidad aparente, en las huellas y control, son significativamente iguales en todos los niveles de profundidad (figura 3).

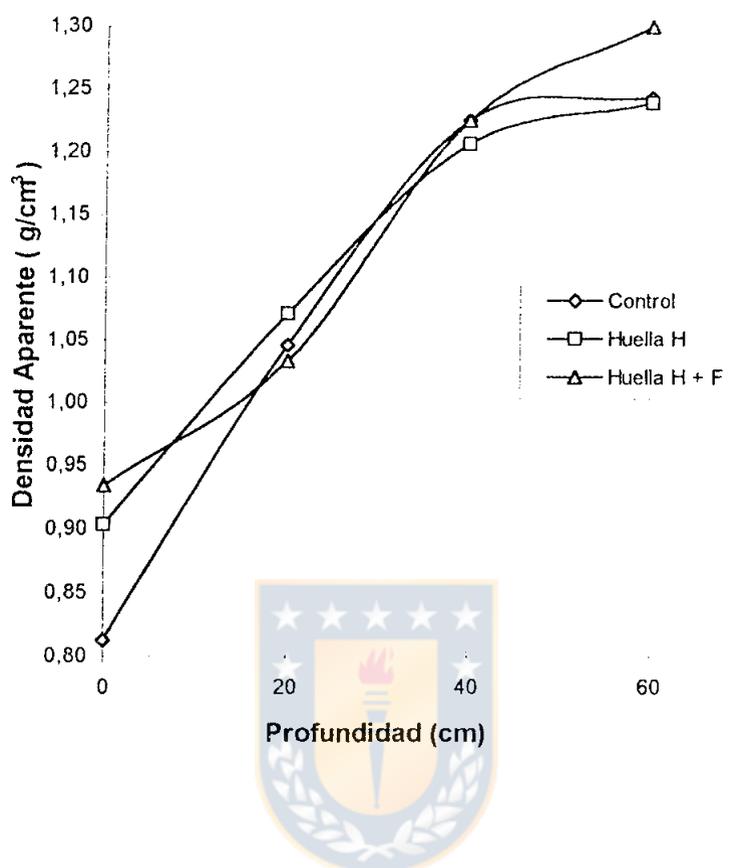


FIGURA 3. Densidad aparente en el perfil del suelo.

A pesar de no existir diferencias significativas, la densidad aparente aumenta un 11% para la huella de harvester y un 14% para la del harvester más forwarder, con respecto al control para el nivel superficial del suelo, disminuyendo esta diferencia hasta los 20.0 cm de profundidad, punto en el cual las curvas de densidad aparente de las huellas se comportan de forma similar que el control (figura 3). Esto se explica por el paso del vehículo que provoca una agregación de las partículas del suelo, disminuyendo la porosidad e incrementando la

densidad aparente (Bowen, 1981, citado por Ohu *et al.*, 1988). Este proceso decrece en profundidad ya que el punto de choque entre la fuerza normal del vehículo y la fuerza de reacción del suelo se encuentra en los primeros centímetros, generándose menor fuerza de compactación en los niveles inferiores (Fuentes, 1993). Se aprecia también que ésta variable para las dos huellas y el control, siempre va en aumento hasta los 40.0 cm, profundidad en la cual se estabiliza , con la sólo excepción de la huella harvester más forwarder que sigue aumentando hasta los 60.0 cm. Este comportamiento, se debería a la mayor actividad biológica y química en la superficie, la cual provoca una disgregación del suelo, incrementando la porosidad y a su vez disminuyendo la densidad aparente, luego a mayor profundidad ésta actividad decrece y se suma a ello el peso del propio suelo, provocando una compactación natural y aumentando su densidad aparente (Donoso, 1981).

El máximo valor que alcanzan las curvas de densidad aparente en las huellas y el control no superan los 1.3 g/cm^3 (figura 3). Este valor es inferior a los obtenidos por Gent *et al.* (1984) y Cullen *et al.* (1991), donde ambos coinciden que densidades entre 1.4 y 1.6 g/cm^3 provocan reducciones significativas en el crecimiento de la raíz. Con lo cual, se puede inferir, que no existe una condición desfavorable para un adecuado desarrollo radicular.

4.2 Resistencia a la penetración.

Las pruebas Chi-cuadrado, realizadas para probar la normalidad de esta variable en ambas huellas y el control, se presentan en la tabla 5.

TABLA 5. VALORES PRUEBA BONDAD DE AJUSTE, CHI-CUADRADO, PARA INDICE DE CONO.

Profundidad (cm)	X ² calculado			X ² tabulado
	Control	H	H + F	
00.0	1.796	0.450	2.189	5.990
10.0	1.625	4.183	1.123	5.990
20.0	1.071	1.454	6.741 *	5.990
30.0	0.365	1.868	0.823	5.990
40.0	0.993	1.619	0.288	5.990
50.0	1.815	1.588	2.591	5.990
60.0	3.643	1.438	0.070	5.990

(*: $\alpha \leq 0.05$; H =harvester; H + F =harvester más forwarder).

Las pruebas realizadas sobre las poblaciones de índice de cono, indican que en general existe una distribución normal de esta variable para el control y las huellas, con la sólo excepción de la huella harvester más forwarder, donde el valor calculado superó levemente al tabulado a los 20.0 cm de profundidad.

La prueba de homogeneidad de varianzas - Test de Cochran - entre las poblaciones de las huellas y el control, para los niveles de profundidad estudiados, se presentan en la tabla 6.

TABLA 6. VALORES PRUEBA HOMOGENEIDAD DE VARIANZA, TEST DE COCHRAN, PARA INDICE DE CONO.

Profundidad (cm)	R calculado	R tabulado
00.0	0.690 *	0.616
10.0	0.689 *	0.616
20.0	0.740 *	0.616
30.0	0.501	0.616
40.0	0.761 *	0.616
50.0	0.776 *	0.616
60.0	0.601	0.616

(* : $\alpha \leq 0.05$).

El test de Cochran, indica que en la mayoría de los niveles de profundidad no existe homogeneidad de varianza entre las poblaciones de las huellas y el control, con la excepción de 30.0 y 60.0 cm donde el estadístico calculado es menor que el tabulado. A pesar de estos resultados y por ser estrechas estas diferencias se considerarán como homogéneas sus varianzas. Los resultados del análisis de varianza , se presentan en la tabla 7.

TABLA 7. VALORES PRUEBA ANALISIS DE VARIANZA PARA INDICE DE CONO.

Profundidad (cm)	F calculado	F tabulado
00.0	4.366 *	3.354
10.0	4.495 *	3.354
20.0	25.120 *	3.354
30.0	22.025 *	3.354
40.0	11.888 *	3.354
50.0	10.907 *	3.354
60.0	5.102 *	3.354

(* : $\alpha \leq 0.05$).

Los análisis de varianza de la resistencia a la penetración, expresada como índice de cono, indican que existen diferencias significativas entre las varianzas de las huellas y el control en todos los niveles de profundidad estudiados. Estas diferencias hacen necesario aplicar el test de Tuckey en todos los niveles de profundidad presentándose estos valores en la tabla 8.

TABLA 8. COMPARACIONES MULTIPLES, TEST DE TUCKEY, PARA INDICE DE CONO.

Profundidad (cm)	Tratamiento	Diferencia de medias		Valor tabulado
		control	harvester	
00.0	H + F	9.55 *	4.96	8.02
	H	4.59	-----	
10.0	H + F	23.09 *	0.47	22.29
	H	23.56 *	-----	
20.0	H + F	30.06 *	3.55	11.50
	H	26.51 *	-----	
30.0	H + F	27.08 *	14.61 *	10.14
	H	12.47 *	-----	
40.0	H + F	25.67 *	23.53 *	14.50
	H	2.14	-----	
50.0	H + F	23.70 *	11.50	12.59
	H	12.20	-----	
60.0	H + F	11.63 *	6.47	9.05
	H	5.16	-----	

(*: $\alpha \leq 0.05$; H = harvester; H + F = harvester más forwarder).

Los resultados obtenidos por el test de Tuckey, indican que la huella harvester más forwarder presenta diferencias significativas en todo el perfil del suelo respecto al control, mientras que al compararla con la huella de harvester, sólo presenta diferencias a los 30.0 y 40.0 cm. La huella de harvester presentó sólo

diferencias con el control en los niveles 10.0, 20.0 y 30.0 cm de profundidad (figura 4).

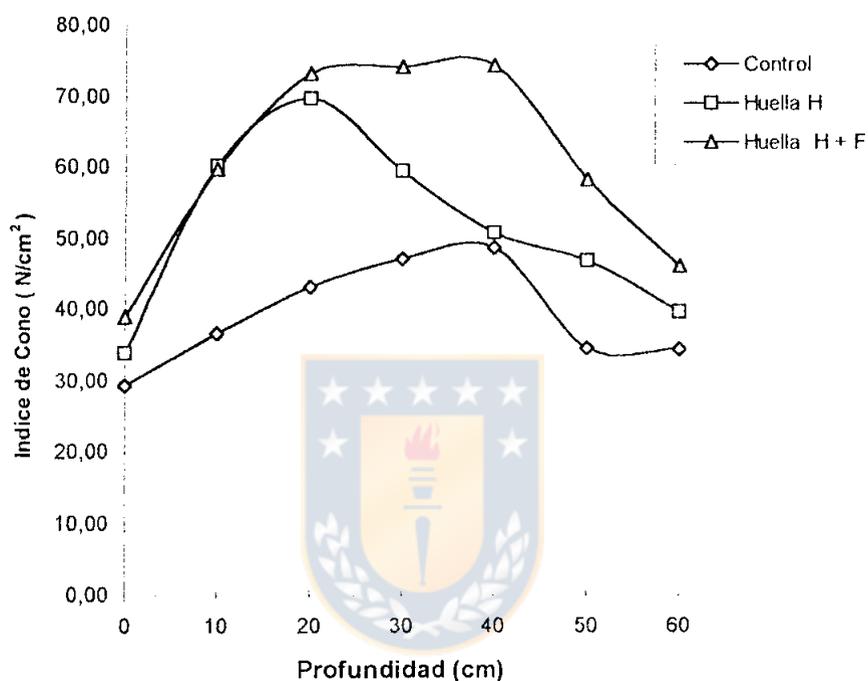


FIGURA 4. Índice de cono en el perfil del suelo.

Los mayores valores de índice de cono se presentaron para ambas huellas a los 20.0 cm, siendo la huella harvester más forwarder un 70% mayor que el control y la huella de harvester un 61% mayor que el control; estos altos valores registrados en las huellas se deben básicamente a un aumento en la densidad aparente, generado por el paso de los vehículos (Ayers y Perumpral, 1982).

El paso de un penetrómetro en el suelo se encuentra condicionado por la cohesión, y ésta, por el contenido de humedad y textura (Sower et al., 1965, citados por Henry y McKibben, 1967). Los suelos finos se diferencian de los gruesos por su alta cohesión, lo que les permite gran plasticidad dentro de un amplio rango de humedad, pero cuando éstos suelos pierden agua, aumenta su cohesión y por lo tanto su resistencia (Terzaghi et al., 1955). El fenómeno señalado, ocurre de manera contraria en los 20.0 primeros centímetros, ya que al tratarse de un suelo arenoso, el cual posee poca o nula cohesión y al contener mayor humedad, sus partículas se agrupan disminuyendo el volumen de espacios vacíos y por ende aumentando la resistencia a la penetración. Luego el índice de cono de la huella harvester más forwarder permanece constante hasta los 40.0 cm y decrece hasta los 60.0 cm, mientras que la huella de harvester decrece de los 20.0 hasta los 60.0 cm.

Los valores de índice de cono graficados anteriormente no superan los 75 N/cm², y son inferiores a los niveles que según Taylor y Burnett (1963) dificultan el desarrollo radicular de las plantas. A pesar de ello es importante considerar que los mayores registros de ésta variable se presentan entre los 20.0 y 40.0 cm, profundidad en la cual se distribuye gran parte del sistema radicular de *Pinus radiata* (Will, 1966, citado por Murphy, 1982).

4.3 Contenido de humedad.

Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste, Chi-cuadrado, para probar la normalidad, tanto en las huellas y el control, indican que las poblaciones de contenido de humedad, tanto para las huellas y el control, poseen una distribución normal (tabla 9).

TABLA 9. VALORES PRUEBA BONDAD DE AJUSTE, CHI-CUADRADO, PARA CONTENIDO DE HUMEDAD.

Profundidad (cm)	X ² calculado			X ² tabulado
	control	H	H + F	
00.0	2.206	0.098	2.803	5.990
20.0	0.978	0.276	0.942	5.990
40.0	0.154	1.666	2.135	5.990
60.0	0.348	2.330	1.004	5.990

($\alpha \leq 0.05$; H = harvester; H + F = harvester más forwarder).

La prueba de Cochran para determinar homogeneidad de varianzas entre las poblaciones de las huellas y el control, se presenta en la tabla 10.

TABLA 10. VALORES PRUEBA HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS, TEST DE COCHRAN, PARA CONTENIDO DE HUMEDAD.

Profundidad (cm)	R calculado	R tabulado
00.0	0.764 *	0.616
20.0	0.721 *	0.616
40.0	0.364	0.616
60.0	0.493	0.616

(* : $\alpha \leq 0.05$).

El test de Cochran, indica que existe homogeneidad de varianzas para la mayoría de los niveles de profundidad exceptuando los niveles 0.0 y 20.0 cm. Pero como los valores calculados superan levemente los valores tabulados, se consideran como variables homogéneas.

Los valores de los análisis de varianza, para establecer diferencias significativas entre las huellas y el control para los niveles de profundidad, se presentan en la tabla 11.

TABLA 11. VALORES PRUEBA ANÁLISIS DE VARIANZA PARA CONTENIDO DE HUMEDAD.

Profundidad (cm)	F calculado	F tabulado
00.0	0.385	3.354
20.0	0.443	3.354
40.0	0.102	3.354
60.0	0.205	3.354

($\alpha \leq 0.05$).

Los resultados de los análisis de varianza indican que no existen diferencias significativas de contenido de humedad entre las huellas y el control para todos los niveles de profundidad estudiados (figura 5).

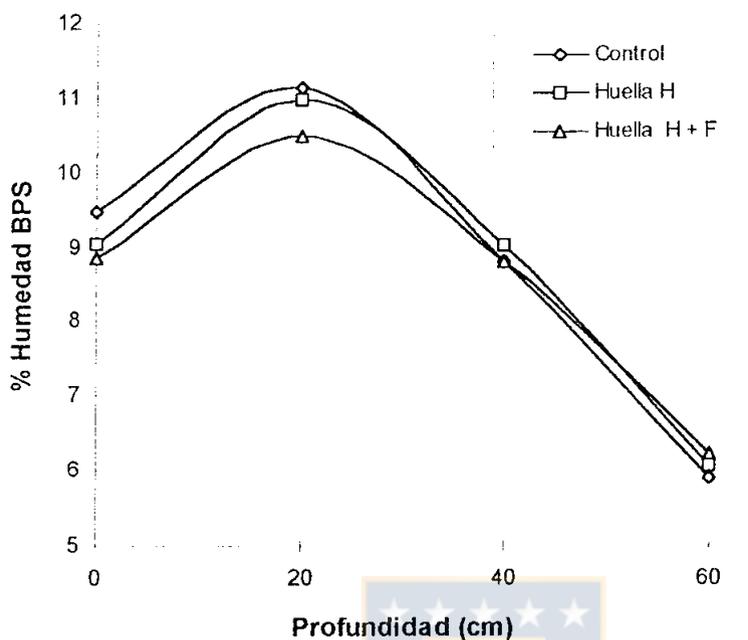


FIGURA 5. Humedad en el perfil del suelo.

A nivel superficial el paso de los vehículos comprime el suelo y esparce el agua hacia los lados, lo que provoca una reducción del contenido de humedad de las huellas respecto al control, así la huella harvester más forwarder disminuyó un 6.8% y la huella harvester un 4.8%; a los 20.0 cm estas diferencias se estrecharon en 5.7% y 1.3% respectivamente (figura 5). Esta disminución de humedad en la superficie, se debe según Donoso (1981), a que estos horizontes estan mas expuestos a la evaporación por acción del sol y viento.

Los mayores contenidos de humedad para las huellas y el control se presentan a los 20.0 cm de profundidad, esto se explica, porque al percolar el agua, arrastra minerales y arcillas sueltas de la superficie, las cuales sellan algunos espacios porosos, aumentando el contenido de humedad a ese nivel e impidiendo el descenso de agua a profundidades inferiores, lo que provoca una disminución de los registros de humedad a niveles inferiores que los superficiales, para ambas huellas y el control luego de los 20.0 cm.



V. CONCLUSIONES

1. Los raleos comerciales con sistemas mecanizados de extracción, en suelos arenosos, no afectan significativamente la densidad aparente. Sin embargo, existe un aumento de dicha variable en ambas huellas hasta una profundidad de 20.0 cm. Los mayores aumentos se obtuvieron a nivel superficial, donde alcanzaron incrementos de 14% y 11% respecto al control, para las huellas harvester más forwarder y huella harvester, respectivamente.

2. El contenido de humedad no presentó diferencias significativas entre las huellas y el control; sin embargo, se observó una disminución a nivel superficial que alcanzó un 6.8% para la huella harvester más forwarder y un 4.8% para la huella harvester, reduciéndose esta diferencia a los 20.0 cm donde alcanza valores de 5.7% y 1.3%, respectivamente.

3. La resistencia a la penetración para la huella harvester más forwarder fue significativa en todo el perfil estudiado, presentando un mayor aumento entre los 20.0 y 40.0 cm, alcanzando incrementos de 70% y 53%, respectivamente. Mientras en la huella harvester, sólo fue significativa entre los 10.0 y 30.0 cm, donde obtuvo un incremento de 64% y 27%, respectivamente, presentando su

máximo valor a los 20.0 cm, donde alcanzó 61%. Esto indica que el paso de un segundo vehículo (forwarder) compacta más el suelo.

4. La resistencia a la penetración por si sola, no es un buen indicador de la compactación del suelo, esta debe ser analizada en conjunto con otras variables como la densidad aparente y contenido de humedad.



VI. RESUMEN

En una plantación de 10 años de *Pinus radiata* D. Don, realizada sobre un suelo arenoso ubicado en la provincia de Concepción de la VIII Región, se llevó a cabo un estudio cuyo objetivo fue evaluar la compactación que provocan los equipos mecanizados, harvester - forwarder, en una faena de raleo comercial . Para ello, se seleccionaron al azar dos huellas de 100 m claramente identificadas, una de ellas producto del paso del harvester y la otra producto del paso del harvester más el forwarder. En ambas huellas y hasta una profundidad de 60.0 cm, se midió y analizó la densidad aparente, índice de cono y contenido de humedad, las cuales fueron comparadas con un control.

Los resultados, indican que las máquinas utilizadas para esta faena, en suelos arenosos, no provocan alteraciones significativas en la densidad aparente y contenido de humedad, pero sí, modifican significativamente el índice de cono. Esta última variable presenta sus niveles de alteración entre los 10.0 y 30.0 cm, para la huella harvester, alcanzando su máximo incremento de 61% a los 20.0 cm; mientras que la huella harvester más forwarder, presentó alteraciones en todo el perfil estudiado, alcanzando su máximo valor de 70% a los 20.0 cm. Esto permite concluir que el paso de un segundo vehículo (forwarder) compacta más el suelo.

SUMMARY

In a ten year plantation of *Pinus radiata* D. Don, done on a sandy soil located in the Province of Concepción in the VIII Region, a study whose objective was to evaluate the compactness caused by the logging equipments: harvester - forwarder was done in a commercial thinning work. For this, two tracks of 100 m clearly identified were selected at random, one of them as a result of the harvester track and other one as a result of harvester track plus the forwarder track. In both tracks, to a depth of 60.0 cm the bulk density, cone index and moisture content were analysed and measured being, at the same time, compared with a control.

The results show that the machinery used for this work on sandy soils doesn't produce significant changes in the bulk density and moisture content but the index cone is significantly modified. This last variable presents its maximum increase of 61% at 20.0 cm while the harvester track plus forwarder one presented alterations in all parts of the study reaching its maximum value of 70% at 20.0 cm. This brings as a conclusion that a second vehicle track (forwarder) compacts the soil more.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Akram, M. and W.D. Kemper. 1979. Infiltration of soils affected by the pressure and water content at the time of compaction. Soil Sci. Soc. Am. J.43:1080 - 1086.
2. Ayers, P.D. and J.V. Perumpral. 1982. Moisture and density affect on cone index. Trans ASAE. 25(5): 1169-1172.
3. Bailey, A. C., C. E. Johnson and R.L. Shafer. 1984. Hydrostatic compaction of agricultural soils. Trans ASAE . 27(4): 952-955.
4. Bailey, A. C. and J.A. Weber. 1965. Comparison of methods of measuring soil shear strength using artificial soils. Trans. ASAE. 8(2): 153-156/160.
5. Cochran, W. y G. Cox. 1983. Diseños experimentales. Editorial Trillas. 8ª reimpresión de la 1ª edición. México.
6. Cullen, S. J., C. Montagne and H. Ferguson. 1991. Timber harvest trafficking and soil compaction in western Montana. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 1416 - 1420.

7. Donnelly, J. R. and J. B., Shane. 1986. Forest ecosystem responses to artificially induced soil compaction. *Can. J. For. Res.* 16(4): 750-754.
8. Donnelly, J. R., J.B. Shane and H. W. Yawney. 1991. Harvesting causes only minor changes in physical proprieties of an upland vermont soil. *J. For.* 8(1):28-31.
9. Donoso, Z. C. 1981. *Ecología Forestal: el bosque y su medioambiente.* Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
10. Erbach, D. C. 1987. Measurement of soil bulk density and moisture. *Trans. ASAE.* 30(4): 922-930.
11. Firth, J. and G. Murphy. 1989. Skidtrails and their effect on the growth and management of young *Pinus radiata*. *N. Z. J. Fores. Sci.* 19 (1): 22-28.
12. Fox, W. E. and D. S. Page-Hanify. 1958. A method of determining bulk density of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 88: 168-171.
13. Froehlich, H.A. 1979. Soil compaction from logging equipment: Effects on growth of young ponderosa pine. *J. Soil Water Conserv.* 34(6): 276-278.

14. Froehlich, H. A., D. W. R. Miles and R. W. Robbins. 1985. Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. Soil Sci. Soc. Am. J. 1015-1017.
15. Fuentes, A. 1993. Compactación de suelo por equipos mecanizados terrestres en la cosecha forestal. Memoria de Título. Universidad de Concepción. Fac. de Cs. Forestales. Chillán, Chile.
16. Gayoso, J., A. Iroumé y A. Ellies. 1991. Degradación de suelos forestales asociada a operaciones de cosecha. En: Actas III taller de producción forestal. Nov. 1991. Fundación Chile. Concepción, Chile.
17. Gent, J. A., J. R. Ballard, A. E. Hassan and D. K. Cassel. 1984. Impact of harvesting and site preparation on physical properties of piedmont forest soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 173-177.
18. Gill, W. R. 1968. Influence of compaction hardening of soil on penetration resistance. Trans. ASAE. 11: 741-745.
19. Gurovich, L. A. 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. IICA. San José, Costa Rica.

20. Henry, J. E. and J. S. McKibben. 1967. Effect of soil strength on corn root penetration. *Trans. ASAE*. 10(2): 281-283/288.
21. Lineros, M. A. 1994. Efectos de la cosecha mecanizada en la compactación de suelos forestales. Tesis de Postgrado. Univ. de Concepción. Fac. de Ing. Agrícola. Chillán, Chile.
22. Lowery, B. and R. T. Schuler. 1991. Temporal effects of subsoil compaction on soil strength and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 216-223.
23. Murphy, G. 1982. Soil damage associated with production thinning. *N. Z. J. For. Sci.* 12(2): 281-292.
24. Ohu, J. O., G. S. Raghavan and E. McKeyes. 1988. Cone index prediction of compacted soils. *Trans. ASAE*. 31(2): 306-310.
25. Ole-Meiludie, R. E. and W. L. Njau. 1989. Impact of logging equipment on water infiltration capacity at Olmotonyi, Tanzania. *For. Ecol. Manage.* 26: 207-213.

26. Reeder, R. C., R. K. Wood and C.L. Finck. 1993. Five subsoiler designs and their effects on soil properties and crop yields. *Trans. ASAE*. 36(6):1525-1531.
27. Sanglerat, G. 1972. *The penetrometer and soil exploration*. Elsevier Publ. Company. Amsterdam.
28. Taylor, H. and E. Burnett. 1964. Influence of soil strength on the root-growth habits of plants. *Soil Sci. Soc. Am J.* 98: 174-180.
29. Terzaghi, K. y R. B. Peck. 1955. *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Librería El ateneo editorial. Buenos Aires, Argentina.
30. Vidal, I.P. 1995. *Naturaleza y propiedades del suelo. Manual de prácticas*. Univ. de Concepción. Facultad de Agronomía. Chillán, Chile.
31. Wert, S. and B. R. Thomas. 1981. Effects of skid roads on diameter, height, and volume growth in Douglas-fir. *Soil Sci. Soc. Am J.* 45: 629-632.

