

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Departamento Silvicultura

**EVALUACION DE LA COMPACTACION
DE SUELO CAUSADA CON
SISTEMA DE COSECHA HARVESTER - FORWARDER**



PATRICIO ANTONIO VILLA MILLAR

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

CONCEPCION - CHILE

1995

**EVALUACION DE LA COMPACTACION
DE SUELO CAUSADA CON
SISTEMA DE COSECHA HARVESTER - FORWARDER**

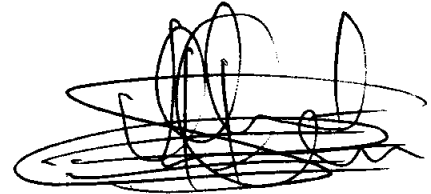
Profesor Asesor




Miguel Espinosa Bancalari
Profesor Asociado
Ingeniero Forestal, Ph. D.



Profesor Asesor

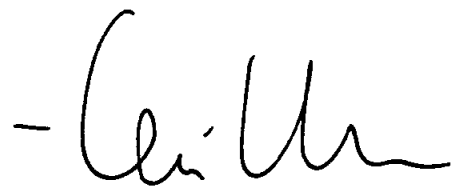


Manuel Lineros Parra
Profesor Asistente
Ingeniero Forestal, Mg. Sc.



Miguel Espinosa Bancalari
Profesor Asociado
Ingeniero Forestal, Ph. D.

**Director Departamento
Silvicultura.**



Jaime Millán Herrera
Profesor Titular
Ingeniero Forestal, Dr.

**Decano Facultad de
Ciencias Forestales.**

Dedicado con mucho cariño a:

Mis queridos padres, por el amor que me han brindado desde siempre, por su incondicional apoyo y estímulo en cada etapa de mi vida.

Mi tío Cucho, por su preocupación por mi formación profesional.



Mi abuela Pepa, como un homenaje póstumo a su alegría de vivir.

Lorena, la mujer que ha estado a mi lado desde el comienzo de ésta etapa que hoy culmino.

Mis Agradecimientos a:

La empresa Forestal Mininco S.A. por el respaldo y financiamiento entregado para la realización de este estudio, en forma especial al señor Ricardo Landeros Burgos Jefe del Departamento de Programación y Control.

El profesor de la Facultad de Ingeniería Forestal señor Manuel Lineros Parra, por su constante apoyo y tiempo otorgado para el desarrollo y culminación de esta memoria.

Don Miguel Espinosa Bancalari docente de la Facultad de Ingeniería Forestal, por su asesoría en esta tesis, sus acertados consejos e invaluable disposición para el desarrollo de éste estudio.

Cesar Retamal Valdés Ing. Civil Informático por su desinteresada cooperación en la impresión del documento final.

Y a todas las personas que de una u otra forma hicieron posible llevar a buen término este estudio.

INDICE DE MATERIAS

CAPITULOS	PAGINA
I INTRODUCCION.....	1
II REVISION BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1 Generalidades.....	3
2.2 Compactación.....	6
2.3 Densidad aparente.....	11
2.4 Infiltración.....	15
2.5 Resistencia a la penetración.....	19
III MATERIALES Y METODOS.....	21
3.1 Material y equipo.....	21
3.2 Metodología.....	22
3.2.1 Método de muestreo.....	22
3.2.2 Medición de las variables.....	23
3.2.2.1 Densidad aparente.....	23
3.2.2.2 Resistencia a la penetración.....	24
3.2.2.3 Velocidad de infiltración.....	24
3.2.2.4 Porosidad (macroporos y microporos).....	24
3.3 Análisis estadístico.....	25
IV RESULTADOS.....	28
4.1 Densidad aparente.....	28
4.2 Porosidad del suelo.....	31
4.3 Resistencia a la penetración.....	39
4.4 Velocidad de infiltración.....	41

V DISCUSION.....	45
5.1 Densidad aparente.....	45
5.2 Porosidad del suelo.....	47
5.3 Resistencia a la penetración	49
5.4 Velocidad de infiltración.....	50
VI CONCLUSIONES.....	51
VII RESUMEN	52
SUMMARY	53
VIII BIBLIOGRAFIA.....	54



INDICE DE TABLAS

TABLA N°		PAGINA
1	Valores de compactación en faena de cosecha final, modificación de la densidad aparente.....	15
2	Valor F del análisis de varianza, densidad aparente huella v/s control, para cada nivel de profundidad y sector.....	28
3	Valor F del análisis de varianza, porosidad huella v/s control, para cada nivel de profundidad en los tres sectores.....	32
4	Valor F del análisis de varianza, resistencia a la penetración huella v/s control, para cada nivel de profundidad en los tres sectores.....	39
5	Prueba de comparación de medias para la velocidad de infiltración estabilizada, entre huella y control en los tres sectores.....	42

INDICE DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
1	Efecto del número de pasadas en la densidad aparente del suelo.....	13
2	Densidad aparente en el perfil del suelo, en sector harvester.....	29
3	Densidad aparente en el perfil del suelo, en sector forwarder.....	30
4	Densidad aparente en el perfil del suelo, en sector harvester más forwarder.....	31
5	Macroporosidad en el perfil del suelo, en sector harvester.....	33
6	Macroporosidad en el perfil del suelo, en sector forwarder.....	34
7	Macroporosidad en el perfil del suelo, en sector harvester más forwarder.....	34
8	Microporosidad en el perfil del suelo, en sector harvester.....	35
9	Microporosidad en el perfil del suelo, en sector forwarder.....	36
10	Microporosidad en el perfil del suelo, en sector harvester más forwarder.....	36
11	Porosidad total en el perfil del suelo, en sector harvester.....	37
12	Porosidad total en el perfil del suelo, en sector forwarder.....	38

13	Porosidad total en el perfil del suelo, en sector harvester más forwarder	38
14	Indice de cono en el perfil del suelo, en sector harvester	40
15	Indice de cono en el perfil de suelo, en sector forwarder	40
16	Indice de cono en el perfil del suelo, en sector harvester más forwarder	41
17	Velocidad de infiltración sector harvester	43
18	Velocidad de infiltración sector forwarder.....	43
19	Velocidad de infiltración sector harvester más forwarder	44



I INTRODUCCION

La consolidación del sector forestal en Chile, marcada especialmente por el aumento sustancial de las superficies plantadas en las dos últimas décadas y por el notable incremento del volumen de producción, ha hecho que las empresas forestales optimicen sus procesos productivos.

Uno de los pasos dados para lograr dicho objetivo ha sido la introducción de nueva tecnología en las distintas etapas del ciclo forestal a través de la mecanización.

El mayor grado de mecanización de las operaciones forestales, consecuencia del incremento de los volúmenes de producción, la incorporación de terrenos con mayor grado de pendiente, el hecho de reutilizar sitios en segundas y terceras rotaciones, la disminución de las edades de rotación, el mayor número de faenas de temporada húmeda y la expansión de las actividades hacia suelos de menor capacidad de soporte, generan sin duda modificaciones en las propiedades físicas del suelo con una consecuente disminución de la productividad de los sitios (Gayoso e Iroumé, 1989).

Por ser el suelo un recurso básico y principal para el desarrollo de un bosque, es importante que mantenga sus características y propiedades, para que de ese modo sea utilizado en varias rotaciones sin alterar sustancialmente el nivel de producción original o primario.

El madereo o extracción forestal con equipos mecanizados terrestres, es una de las etapas que causa mayor daño sobre el suelo, debido a que el tránsito de maquinaria se concentra en un corto período de tiempo sobre una superficie, provocando una inmediata alteración (Fuentes, 1993).

El presente estudio tiene por objetivo medir las alteraciones provocadas por el sistema mecanizado de cosecha Harvester-Forwarder, referido a la compactación que este genera, analizando el comportamiento en el perfil del suelo de cuatro variables directamente relacionadas con el fenómeno de compactación: densidad aparente, infiltrabilidad, porosidad del suelo y resistencia a la penetración.



II REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Generalidades

La compactación, erosión y alteración de las propiedades del suelo como resultado de los procesos de la cosecha forestal han merecido el interés de numerosos estudios en el extranjero, mientras en Chile recién se comienza a hacer conciencia sobre las consecuencias y posibilidades de control (Gayoso e Iroumé, 1989).

Un suelo forestal productivo es típicamente una mezcla de partículas minerales, plantas y materia animal, aire, agua y nutrientes asociados. Menos de la mitad de un cierto volumen de suelos en condiciones físicas favorables para gran parte de las plantas es el material sólido, siendo lo restante espacios de poros que contienen cantidades variables de aire y agua (Adams y Froehlich, 1981).

Las actividades del hombre en el bosque, especialmente con el empleo de material pesado, como camiones y tractores de maderero, producen compactación del suelo, lo que reduce enormemente la posibilidad y capacidad de infiltración debido a la reducción de la porosidad, y aumenta la densidad aparente del suelo. Estos efectos son particularmente intensos si el maderero y transporte se realiza en períodos cuando el suelo está húmedo (Spurr y Barnes, 1973 citados por Donoso, 1981; Hodek y Lovell, 1979 citados por Froehlich y Mc Nabb, 1983).

Para analizar las alteraciones del suelo por efecto de la cosecha mecanizada causadas esencialmente por la transmisión de energía de la máquina al suelo (Froehlich, 1991), debe considerarse la fuerte interdependencia entre el suelo, el bosque y la maquinaria, como partes de un sistema; cualquier efecto directo o indirecto que se desarrolle sobre

uno de ellos afectará a los restantes elementos y sucesivamente al primer elemento alterado de éstos tres (Gayoso e Iroumé, 1989).

Froehlich (1979) e Incerti et al. (1987) citados por Toro (1991), señalan que de acuerdo a lo aseverado por muchos investigadores, el uso de maquinaria pesada altera un conjunto de propiedades físicas del suelo, las cuales controlan el desarrollo de los árboles. Alteración del suelo, es un cambio brusco de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Standish et al., 1988 citados por Gayoso e Iroumé, 1989).

La extracción mecanizada provoca algunas alteraciones, como presiones al suelo originando sobrecompactación, desplazamiento, amasado y erosión; modifica sustancialmente las relaciones gravimétricas, su estructura y potencialidad de producción (Dyrness, 1965 citado por Froehlich y Mc Nabb, 1983; Moehring y Rawls, 1970, Gessel, 1981, Beekman, 1987 citados por Gayoso e Iroumé, 1989). Estas variaciones dependerán de las propiedades intrínsecas del suelo, condiciones ambientales y manejo, las que determinan la capacidad de soporte del mismo (Maeda et al., 1978, Warkentin, 1978 citados por Gayoso e Iroumé, 1989). Esta capacidad de soporte es la resistencia de la estructura del suelo contra la acción de fuerzas y está determinada por la cohesión, fricción, densidad y estructura (Hartge, 1978, Hildebrandt y Wiebel, 1981, Horn y Hartge, 1981 citados por Gayoso e Iroumé, 1989).

A lo anterior hay que agregar que el impacto del madereo será más o menos intensivo según sea el equipo de extracción y el sistema de cosecha (Gessel, 1981 citado por Gayoso, 1982). Según Gayoso et al. (1991), la intensidad de las alteraciones varía con el tipo de suelo; también con la humedad de éste y el número de pasadas de los equipos mecanizados (Steinbrenner, 1955, Amir et al., 1976, Froehlich et al., 1980 citados por Froehlich y Mc Nabb, 1983). En consecuencia la severidad del daño producido se

relaciona no solo con el tipo de maquinaria que se utiliza, sino que también con las características del sitio (Toro, 1991).

Skinner et al. (1990) citados por Toro (1991), determinaron que alguno de los efectos negativos que es capaz de generar la maquinaria forestal, especialmente los skidder, es la mezcla de los horizontes del suelo, el descabezamiento de ellos o bien la destrucción de las estructuras de los horizontes.

Si bien no ha sido aún suficientemente cuantificado, es posible especular que suelos severamente alterados afectarán negativamente el crecimiento en altura de la especie Pinus radiata (Gayoso e Iroumé, 1989).

Por otra parte el impacto de las faenas de cosecha forestal puede disminuirse por una adecuada planificación de caminos, canchas y vías de maderero, una buena selección de equipos, época de cosecha y contenido de humedad consecuente con el tipo de suelo y pendiente del terreno (Froehlich et al., 1981, Murphy, 1982 citados por Gayoso, 1983; Gayoso e Iroumé, 1989).

Según Wingate-Hill y Jakobsen (1982) citados por Gayoso e Iroumé (1989) y Froehlich (1991), la planificación del maderero ladera abajo produce una menor alteración al suelo, especialmente en suelos húmedos.

Todos los fenómenos citados precedentemente alteran el sistema suelo-agua-planta, a través de la reducción del volumen útil del suelo, de la capacidad de arraigamiento y del almacenamiento de agua y nutrientes, lo que conduce finalmente a una pérdida de la productividad del bosque (Toro, 1991).

2.2 Compactación

Para compactar un suelo, las solicitaciones deben ser tan grandes que el suelo se deforme hasta un estado irreversible. Además de las solicitaciones, el grado de compactación de un suelo varía con el tipo de uso, resistencia al esfuerzo cortante y capacidad de soporte. Estas últimas por su parte dependen del contenido de humedad en el suelo, el número y superficie de los puntos de contacto, densidad aparente y granulometría (Gayoso, 1982).

La compactación del suelo ocurre entonces por un acomodamiento o reordenamiento de las partículas y disminución del volumen de poros, principalmente de macroporos. Esta compactación está asociada comúnmente a un amasado, esto es la destrucción mecánica de la estructura y reorientación de las partículas del suelo (Froehlich y Mc Nabb, 1983; Gayoso e Iroumé, 1989).

Según Standish et al. (1988) citados por Gayoso e Iroumé (1989), la compactación además afecta la aireación del suelo, la porosidad y distribución de poros; movimiento de agua, capacidad de infiltración, conductividad hidráulica, y capacidad de almacenamiento de agua; capacidad calórica, conductividad térmica y difusividad térmica.

Para Gayoso et al. (1991), la compactación trae consigo un aumento de la cohesión y consecuente aumento de la resistencia al corte.

Según Toro (1991), el escurrimiento superficial se ve favorecido por una mayor compactación, especialmente en terrenos con pendientes superiores a 20%, lo que influye en una menor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

En general, los suelos con una fina textura (greda y arcillas limosas) son más propensos a la compactación que los de textura gruesa (suelos arenosos). Los suelos con una amplia gama de tamaños de partículas son más susceptibles que aquellos con una gama limitada o con un tamaño de partículas único (Vaughan, 1993).

Según Vaughan (1993), la presión vertical sobre el suelo no indica necesariamente el grado de compactación que puede esperarse. Las diferencias en la vibración, las presiones dinámicas cuando se carga y el área total de contacto con el suelo pueden producir niveles de compactación que no corresponden a la presión sobre el suelo (Adams, 1981 citado por Vaughan, 1993).

La mayor alteración de la compactación es causada principalmente por la presión dinámica la que puede ser varias veces mayor que la presión estática producida sobre el suelo, lo que se traduce en desplazamiento, tracción y vibración de las máquinas (Gayoso, 1982; Froehlich, 1991). La pendiente de la vía, el volumen de la carga transportada y la duración de las fuerzas aplicadas también son factores determinantes de la compactación (Froehlich y Mc Nabb; 1983; Gayoso e Iroumé, 1989).

Según Moehring (1970) citado por Gayoso e Iroumé (1991) y, Jakobsen (1983) citado por Toro (1991), la compactación del suelo puede extenderse a una profundidad considerable en el perfil del suelo. En cambio, Gent et al. (1984) citados por Toro (1991) han señalado que el efecto de la compactación afecta sólo el volumen más superficial del suelo. Para Adams y Froehlich (1981), y Froehlich (1991), la profundidad de la compactación es variable entre los distintos tipos de terrenos, pero la compactación más severa se encuentra generalmente apenas a unos cuantos centímetros de la superficie del suelo.

Cuanto menor es la profundidad del suelo mayor va a ser el área en la zona radicular que es afectada por la compactación. Efectos adversos en el crecimiento de la planta es más probable que ocurran en suelos delgados que en suelos profundos (Smith, 1991).

La mayor o menor susceptibilidad a la compresión también está dada por las condiciones de humedad del suelo. La resistencia a la dislocación de las partículas depende del rozamiento interno dado por la forma, tamaño, superficie, número y tipo de puntos de contacto entre las partículas (Rico y Castillo, 1978 citados por Gayoso, 1983; Ellies et al., 1982, Gayoso, 1982 citados por Gayoso e Iroumé, 1989).

Para Smith (1991), la mayoría de los suelos son susceptibles a compactación durante la época de lluvias o después de 1 ó 2 días de precipitación fuerte. Porque a medida que aumenta el contenido de humedad en el suelo, la compactación se hace mayor, incluso cuando el suelo húmedo se encuentra bajo un suelo seco. Como el agua no puede comprimirse, la compactación de suelos húmedos produce destrucción de la estructura (Donoso, 1981).

En general, mientras más bajo sea el contenido de humedad mayor es la resistencia a la compactación debido a la mayor fricción de las partículas. La humedad del suelo puede entregar cohesión, flotabilidad o lubricación a las partículas adyacentes (Vaughan, 1993). La compactación por tráfico es generalmente máxima con contenidos de humedad próximos a la capacidad de campo cuando la estructura del suelo esta más propensa a sufrir cambios (Froehlich y Mc Nabb, 1983; Moehring y Rawls, 1970 citados por Gayoso e Iroumé, 1991; Smith, 1991).

Según Froehlich y Mc Nabb (1983) y Gayoso et al. (1991), durante la primera aplicación de carga, correspondiente a las primeras pasadas del equipo de madereo, ocurre la mayor parte de la compactación. Esta es más alta a mayor intensidad de la carga aplicada y mayor saturación en el suelo. (Froehlich, 1979, Gayoso e Iroumé, 1984 citados por Gayoso e Iroumé, 1989).

Un importante factor relacionado con las máquinas utilizadas en la cosecha que influye en el grado de compactación del suelo es el número de viajes hechos en una misma área (Adams y Froehlich, 1981). Cuanto mayor es el número de pasadas que un equipo hace más compactación causará en el suelo (Amir et al., 1976, Soane et al., 1981 citados por Smith, 1991). La profundidad a la cual la compactación ocurre también depende del número de pasadas (Smith, 1991).

El efecto de un número grande de pasadas en la compactación también va a depender de si el vehículo está subiendo o bajando una cuesta (Smith, 1991). Por ejemplo, pasadas múltiples de un skidder que viaja hacia arriba causa considerablemente más compactación que ese mismo vehículo haciendo el mismo número de pasadas hacia abajo (Sidle y Drlica, 1981 citados por Smith, 1991). Al aumentar la carga o la pendiente toma importancia el arrastre longitudinal, situación que es explicable por el patinaje del equipo (Gayoso, 1983).

Un modelo diseñado por Blackwell y Soane (1981) citados por Smith (1991), sugiere que la compactación aumenta debido a que el incremento en peso del vehículo no puede ser totalmente compensado por un aumento del área de contacto.

En algunos casos la compactación ocurre sin la aplicación de pesos o fuerzas externas. Por ejemplo, suelos que pueden ser inestables en presencia de agua y sensibles al stress mecánico pueden alterarse por labranza y lluvias (Mullins et al., 1987 citados por Smith, 1991).

Es muy probable que la compactación persista por períodos de hasta 10 a 25 años (Sands et al., 1979, citados por Smith, 1991; Froehlich y Mc Nabb, 1983). Minore y Weatherly (1988) y Went y Thomas (1981) citados por Gayoso e Iroumé (1991), afirman que la compactación puede ser severa aún después de tres décadas. Según Cochran y Brock (1985), la duración del efecto negativo de la compactación es desconocido. Estudios de Dickerson (1976) citado por Vaughan (1993), confirman que la recuperación de la compactación puede producirse dentro de unos pocos años o puede durar varias décadas.

Los factores que promueven una rápida recuperación incluyen un activo crecimiento de las raíces, un alto nivel de actividad de los organismos en el suelo, ciclos regulares de congelamientos y deshielos y un frecuente humedecimiento y secado del suelo (Froehlich y Mc Nabb, 1983; Vaughan, 1993).

Según Smith (1991), es necesario reconocer que es muy poco probable que no exista compactación durante la cosecha, pero si puede ser minimizada. La manera más efectiva de reducir la compactación requiere de un peso mínimo y de un área de contacto máxima (Blackwell y Soane, 1981 citados por Smith, 1991).

Cualquier operación de cosecha o silvicultural que preserve el horizonte superior del suelo y la materia orgánica previene la compactación (Smith, 1991).

2.3 Densidad aparente

Para expresar el peso de un suelo se usan dos métodos: el primero consiste en lo que se denomina "densidad de las partículas" o gravedad específica de un suelo, y consiste en el peso de una unidad de volumen de partículas sólidas de suelo, expresado en gramos por centímetro cúbico. No se le atribuye comúnmente mucha importancia como característica física del suelo porque, salvo casos muy especiales, el rango de variación es muy estrecho. Se estima que la densidad de partículas en la mayor parte de los suelos minerales que no poseen materia orgánica varía entre 2,6 y 2,75 g/cm³ (Donoso, 1981; Pritchett, 1991), y se usa normalmente como promedio el valor de 2,65 g/cm³ (Donoso, 1981).

El segundo método se conoce como "densidad aparente" de un suelo y es de mucha mayor importancia práctica que el anterior. Se define como el peso seco de una unidad de volumen de suelo (Froehlich y Mc Nabb, 1983). La diferencia con la densidad de las partículas es que la densidad aparente considera los espacios o poros existentes en el suelo (Donoso, 1981).

La densidad aparente depende en gran medida de la estructura del suelo, por esta razón debe medirse en muestras no alteradas (Donoso, 1981; Pritchett, 1991). La densidad de partículas en cambio, no es afectada por la estructura. Por esta razón los suelos sueltos y porosos tienen bajas densidades aparentes, en tanto que los suelos compactados tienen altos valores (Donoso, 1981; Pritchett, 1991).

Según Donoso (1981), Froehlich y Mc Nabb (1983) y Pritchett (1991), la presencia de materia orgánica afecta en forma considerable a la densidad aparente, contribuyendo a disminuir sus valores en el suelo, debido a que la materia orgánica facilita la granulación de los suelos, haciéndolos más sueltos y porosos.

Otro factor relacionado con la densidad aparente es la textura. Las texturas finas, como las de arcillas, tienden a tener valores bajos, en tanto que los suelos arenosos y con rocas tienen, en general, densidades aparentes altas (Donoso, 1981).

La densidad aparente es también un buen indicador de ciertas importantes características del suelo, a saber: porosidad, grado de aireación, y capacidad de infiltración (Donoso, 1981; Froehlich y Mc Nabb, 1983).

En los suelos forestales el rango de densidad aparente oscila, generalmente, entre 0,6 a 1,9 g/cm³ y en horizontes muy orgánicos se puede encontrar valores de hasta 0,2 g/cm³ (Wilde, 1958 citado por Donoso, 1981; Pritchett, 1991). Pero las densidades más frecuentes en estos suelos son del orden de 0,9 g/cm³ (Donoso, 1981).

La densidad aparente es una medida común de la compactación de suelos y está determinada por numerosos factores físicos, tales como granulometría, tamaño de partículas, rugosidad, contenido de materia orgánica, mineralogía de fracción arcilla y estructura (Howard et al., 1981, De Kimpe et al., 1981 citados por Froehlich y Mc Nabb, 1983; Heij y Leek, 1981, Wingate-Hill y Jakobsen, 1982, Beekman, 1987 citados por Gayoso e Iroumé, 1989).

Minore y Weartherly (1988); Greacen y Sands (1980) citados por Toro (1991) y Meurisse (1991), han señalado que uno de los impactos más relevantes que sufre el suelo, es el aumento de la densidad aparente, la cual incrementa la resistencia a la penetración de las raíces, reduce la tasa de infiltración de agua, altera el intercambio gaseoso y afecta la eficiencia del sistema radicular para absorber agua y nutrientes.

Generalmente los mayores cambios de densidad ocurren en las primeras pasadas del equipo (Adams y Froehlich, 1981) (Figura 1).

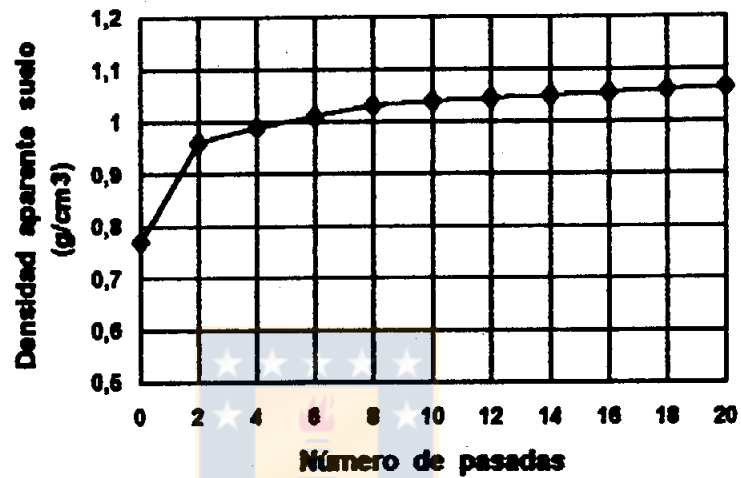


FIGURA 1. Efecto del número de pasadas en la densidad aparente del suelo. Mt. Hood National Forest, EE.UU. (Fuente Adams y Froehlich, 1981).

Corrientemente la densidad aparente de un suelo aumenta con la profundidad. Esto se debe, aparentemente, al menor contenido de materia orgánica, menor agregación, menor penetración de raíces y mayor compactación causada por el peso de suelo (Donoso, 1981).

A un aumento de ésta variable corresponde una consecuente disminución de la porosidad total con mayor incidencia en los macroporos (Elies y Gayoso, 1984, Gayoso y Elies, 1984, Incerti et al., 1987 citados por Gayoso e Iroumé, 1989).

El incremento de la densidad aparente del suelo durante el madereo puede alcanzar hasta aproximadamente un 52%, dependiendo de la capacidad de soporte del suelo, contenido de humedad, materia orgánica y variables de sollicitación tales como la presión unitaria básica y la vibración (Hatchell et al., 1970, Heij y Leek, 1981, Jurgensen et al., 1979 citados por Gayoso, 1982).

Diversos trabajos de investigación determinaron tasas de disminución del crecimiento en altura, para diferentes coníferas, asociada con el aumento de densidad aparente del suelo (Froehlich, 1979; Younberg, 1959, Firth y Murphy, 1989 citados por Gayoso et al., 1991; Meurisse, 1991). En forma aproximada se puede decir que por cada uno por ciento de aumento de la densidad se espera una reducción de 0,67 por ciento en el crecimiento en altura (Foil y Ralston, 1967 citados por Gayoso et al., 1991).

Foil y Ralston (1967) citados por Gayoso e Iroumé (1989), encontraron una correlación negativa y lineal entre densidad aparente y el crecimiento radicular de plantas de Pinus taeda.

El límite de la densidad aparente para la especie Pinus radiata se estima en 1,4 g/cm³ para suelos arcillosos y 1,6 g/cm³ en suelos arenosos (Schlatter y Grez, 1978 citados por Gayoso e Iroumé, 1989).

Diferentes autores señalan que bajo las huellas de saca y canchas de madereo se encuentran densidades mayores que en terrenos adyacentes (Tabla 1). Esta compactación es mayor en cosechas de invierno, donde el suelo permanece muy húmedo por precipitaciones, lo que lleva a la disminución de la capacidad de soporte (Gayoso e Iroumé, 1989).

Hatchell et al. (1970) citados por Gayoso e Iroumé (1989), estimaron por regresión que se puede esperar una recuperación de la densidad aparente a niveles originales en un período de 18 años. Resultados más recientes indicarían una recuperación parcial de la densidad aparente en la capa superficial de los suelos compactados, en un período de seis años, debido a una intensa actividad microbiológica y meteorización (Gayoso e Iroumé, 1989).

**TABLA 1. COMPACTACION EN FAENAS DE COSECHA
MODIFICACION DE LA DENSIDAD APARENTE.**

SECTOR	CAMBIO RELATIVO DE DENSIDAD APARENTE(%) - capa superficial 0 a 10 cm -		
	(1)	(2)	(3)
No disturbado	0	0	0
Bajo huella	27,1	34,2	44,3
Canches	38,5	52,6	71,6

(1) Incerti et al. (1987) Tractor oruga, verano, suelo arcillo-limoso.

(2) Monroy (1981) Tractor forestal neumáticos, invierno, suelo limo-arcilloso.

(3) Gayoso (1989) Tractor forestal neumáticos, invierno, suelo limo-arenoso.

(Fuente Gayoso e Iroumé, 1989)

2.4 Infiltración

La capacidad de infiltración de suelo, también conocida como infiltrabilidad, se define como el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie, cuando se mantiene en contacto con el agua a presión del suelo; esta última es la que determina la velocidad real de infiltración, de este modo el proceso es controlado por las características del perfil (Gurovich, 1985 citado por Fuentes, 1993). En otras palabras la capacidad de infiltración de un suelo, es la permeabilidad al agua que éste tiene, o facilidad del suelo para aceptar agua y permitir el paso de ella a través de él.

La infiltrabilidad en el suelo y su variación en el tiempo depende del contenido de humedad inicial, de la succión, de la textura, la estructura y uniformidad del perfil del suelo. En general, la infiltrabilidad es alta en los primeros estados, especialmente cuando el suelo está relativamente seco; tiende a decrecer en forma estable y asintótica a una velocidad constante, denominada generalmente capacidad de infiltración final (final en el sentido que ha alcanzado una velocidad constante que parece no disminuir más en el tiempo). Esta velocidad se conoce también como infiltrabilidad estable o de equilibrio (Fuentes, 1993).

La disminución de la infiltrabilidad desde una alta velocidad puede explicarse, en parte, por: el deterioro gradual de la estructura del suelo y el sellamiento parcial del perfil; formación de una costra superficial densa o por la separación y migración de partículas de suelo, que bloquean los poros de éste; la expansión de las arcillas, el atrapamiento de burbujas de aire o por la compresión del aire en el suelo (Donoso, 1981). Mientras menor sea ésta capacidad de infiltración, mayor será el escurrimiento superficial (Fuentes, 1993).

En los suelos arenosos y con grava o piedras, el agua infiltra rápidamente y no tiene oportunidad de escurrir, aún en fuertes pendientes y con intensas lluvias. Los suelos muy arcillosos tienden a expandirse con los primeros milímetros de agua calda, los que tapan los microporos y el agua solo puede escurrir por la superficie. Por otra parte, la materia orgánica es tan porosa como la arena gruesa, de modo que la infiltración en suelos con alto contenido de materia orgánica, aumenta considerablemente (Donoso, 1981).

El proceso de infiltración puede estar afectado por diferentes factores tales como:

a) Sellamiento superficial; la formación de una capa fina y compacta sobre la superficie del suelo reduce rápidamente la penetración de agua a través de la superficie (Gurovich, 1985 citado por Fuentes, 1993).

b) Compactación del suelo; las labores de preparación de suelos especialmente las araduras que se realizan en suelos húmedos, pueden producir compactación (Pritchett, 1991) y formación de capas impermeables denominadas "pie de arado" exactamente debajo de la profundidad que penetra el instrumento (Fuentes, 1993).

c) Densidad aparente y contenido inicial de agua; la tasa de infiltración depende de la permeabilidad, cambios en la densidad aparente y un contenido inicial de agua en el suelo (Pritchett, 1991). Ole-Meillidie (1989) citado por Fuentes (1993), determinó un incremento exponencial en la permeabilidad con un incremento en la porosidad. En general los suelos con grandes densidades aparentes tienen baja tasa de infiltración (Akram y Kemper, 1979 citados por Fuentes, 1993).

d) Materia orgánica; la tasa de infiltración se incrementa linealmente con la profundidad de la litera, manteniendo ésta la porosidad del suelo durante largos períodos (Pritchett, 1991; Ole-Meilludie, 1989 citado por Fuentes, 1993).

En general la capacidad de infiltración de un suelo depende básicamente de la porosidad y del contenido de humedad del suelo. La porosidad es el porcentaje de espacio poroso que existe en un suelo, o el espacio de suelo que no está ocupado por sólidos. Se define

también como la porción de suelo que está ocupada por aire y/o agua (Donoso, 1981). Según Wilde (1959) citado por Donoso (1981), la porosidad de los suelos forestales fluctúa entre 30 y 65% .

La porosidad depende entonces, de la cantidad de poros existentes en el suelo, la cual a su vez está determinada por la distribución y arreglo de las partículas sólidas del suelo (Donoso, 1981).

Lo más importante es el tamaño de los poros y no el volumen de macroporos (mayor a 50 micrones) más microporos (menor a 50 micrones), por lo tanto, dos suelos con la misma porosidad total pueden ser muy diferentes en cuanto a su comportamiento frente al agua y al aire (Donoso, 1981).

Como norma general, la porosidad disminuye con la profundidad del suelo, a partir aproximadamente de los 23 cm (Zinke, 1974 citado por Donoso, 1981). Estudios de Gayoso e Iroumé (1989), muestran que la macroporosidad se reduce bajo huellas y canchas en aproximadamente 20%, llegando a valores residuales inferiores al 10% .

Di Gleria et al. (1969) citados por Gayoso (1982) y Baver et al. (1972) citados por Gayoso e Iroumé (1989), señalan que porcentajes de macroporosidad inferiores a 10%, se consideran restrictivos para el crecimiento de las plantas debido a que no es posible satisfacer las necesidades mínimas de aireación y a la disminución de la disponibilidad de agua.

La microporosidad intermedia tiende a aumentar como consecuencia de la transformación de la macroporosidad (Gayoso e Iroumé, 1989). El aumento de los poros finos significa una destrucción de la estructura del suelo (Gayoso, 1982).

Según Gayoso (1983), en relación a la porosidad en la compactación, hay un mayor efecto de la variable "pendiente" en comparación con el "tamaño de la carga". A igual pendiente una duplicación de la carga conduce a un aumento de la pérdida de poros en la capa superficial de hasta un 3,7% según sea el número de pasadas, disipándose con la profundidad. Sin embargo, a carga constante una duplicación de la pendiente (de +10 a +20 %) trae consigo una pérdida de porosidad del 4,3 al 8,0%, diferencia que persiste a más de 20 cm de profundidad.

2.5 Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración se define como una fuerza de reacción, producto de la introducción de un elemento en el suelo (Fuentes, 1993). Froehlich y Mc Nabb (1983), la denominan también como fuerza del suelo.

En la mecánica de los suelos agrícolas, las propiedades más relevantes del suelo son aquellas relacionadas con las fuerzas aplicadas, denominándose propiedades de fuerza, variando en el tiempo por influencia climática, manejo del suelo y crecimiento de las plantas. Estas propiedades y sus cambios, pueden ser determinadas a través de la medición de las fuerzas de corte y resistencia a la penetración, valores que dependen en gran medida de la densidad aparente y contenido de humedad del suelo (Olu et al., 1988 citados por Fuentes, 1993).

La resistencia a la penetración o fuerza del suelo puede ser expresada por el índice de cono el cual varía según la densidad del suelo, contenido de humedad y tipo de suelo (Froehlich y Mc Nabb, 1983; Fuentes, 1993).

Una prueba de penetración consiste básicamente en introducir un penetrómetro en el suelo a una velocidad preestablecida y registrar las fuerzas de reacción ejercidas por el suelo sobre el instrumento (Ayers y Perumpral, 1982 citados por Fuentes, 1993).

La cohesión de los suelos es importante en las fuerzas de resistencia a la penetración (Sanglerant, 1972 citado por Fuentes, 1993). La cohesión es explicada, en parte, por la tensión del agua en los poros; pero en estudios recientes se la ha atribuido a las fuerzas capilares y a la estructura de las partículas. La cohesión en si, está constituida por una unión de dos cohesiones, una es la cohesión básica y la otra la cohesión molecular (Fuentes, 1993).



III MATERIALES Y METODO

3.1 Material y equipo

La información requerida para éste estudio fue recolectada desde el predio Escuadrón, de propiedad de la empresa Forestal Mininco S.A., el cual se encuentra ubicado en la comuna de Coronel en el kilómetro 18 de la ruta que une Concepción y la mencionada comuna.

Según estación meteorológica ubicada en el predio, la precipitación media anual del área es de 1223,5 mm, siendo los meses con mayor precipitación mayo y junio con 309,1 mm y 251,6 mm respectivamente, y el mes más seco enero con 3,9 mm (Formin, 1993).

La temperatura media anual alcanza los 12,8° C, siendo la media máxima 17,7° C en enero y la media mínima 8,8° C en agosto (Formin, 1993).

El suelo del área de estudio corresponde a la serie de suelo Nahuelbuta, con una fisiografía de lomajes y cerros costeros. Este es de una profundidad variable, su textura varía de franco-arcillosa a arcillosa, con una erosión moderada a fuerte (Vásquez, 1994).

Para el desarrollo del estudio se consideró un sector en el predio en el cual se realizó una cosecha a tala rasa con un sistema mecanizado, Harvester (cosechador forestal FMG Timberjack 2618) y Forwarder (autocargador FMG Timberjack 933). En el sector en cuestión se identificaron las vías de extracción y en ellas las huellas que generan los sistemas de rodado de los vehículos.

Para la realización de este estudio se utilizaron los siguientes materiales:

- Penetrómetro: tester de compactación de suelos DICKEY-john (DICKEY-john Corporation) que mide la fuerza que ofrece el suelo a la penetración de un cono, la que es expresada en libras por pulgada cuadrada.
- Cilindros infiltrómetros: tubo de acero de longitud 30 cm y diámetro interno 14,3 cm.
- Cilindros para densidad aparente: tubo de cobre de 3,48 cm de altura y 5,06 cm de diámetro interno.
- Bidón de plástico, con capacidad 50 litros, para transportar agua.
- Otros materiales:
 - * martillo de tres kilogramos
 - * regla graduada de 30 centímetros
 - * cronómetro
 - * huincha para distancia de 50 metros
 - * bolsas de plástico
 - * pala recta
 - * balanza electrónica
 - * estufa de secado

3.2 Metodología

3.2.1 Método de muestreo

Para la toma de la información en terreno se aplicó un muestreo completamente al azar seleccionando tres vías de saca de 50 m de longitud cada una, identificando claramente las huellas de las máquinas; la primera de ellas en donde sólo había pasado el Harvester (cosechador), la segunda en donde sólo había pasado el Forwarder (autocargador) y una última en donde habían pasado ambas máquinas; todas éstas vías se seccionaron cada

un metro, estableciendo un número finito de unidades muestrales. En las huellas, en forma independiente y completamente aleatoria, se seleccionaron cinco unidades muestrales. En forma paralela a la mencionada vía de seca, frente a cada unidad de muestreo y a una distancia aproximada de dos metros, donde el suelo no estaba alterado, se establecieron las unidades de control.

Los terrenos en que se muestreó presentaban similares condiciones de pendiente y exposición (menos de 15% y norponiente respectivamente).

3.2.2 Medición de las variables

En cada unidad muestral (huella y control) se realizó una calicata en forma escalonada de 60,0 cm de profundidad estableciéndose los niveles de: 0,0, 10,0, 20,0, 40,0 y 60,0 cm.

La densidad aparente, porosidad (macro y microporos) y resistencia a la penetración fueron medidas en todos los niveles. En cambio, la velocidad de infiltración se midió a nivel superficial sobre cada unidad muestral seleccionada.

3.2.2.1 Densidad aparente

En cada unidad muestral y nivel de profundidad, por medio de un cilindro de volumen conocido, fueron extraídas las muestras de suelo para ser llevadas en bolsas de plástico al laboratorio, donde se efectuó su pesaje (suelo húmedo) para luego ser secada a 105° C hasta su estado anhidro; posteriormente se determinó la densidad aparente por la relación siguiente:

$$D_a = M_s / V$$

donde: D_a = densidad aparente, g/cm³
 M_s = masa seca de la muestra de suelo, g
 V = volumen de la muestra de suelo, cm³

3.2.2.2 Resistencia a la penetración

En cada unidad muestral y nivel de profundidad se efectuaron cinco mediciones de las que se obtuvo un promedio para determinar la resistencia a la penetración, expresada por el índice de cono en KN/m².

3.2.2.3 Velocidad de Infiltración

La velocidad de infiltración fue medida sobre cada unidad muestral utilizando para ello cilindros infiltrómetros; midiéndose la altura de la columna de agua en el cilindro a intervalos regulares de tiempo.

3.2.2.4 Porosidad (macroporos y microporos)

En cada unidad muestral y nivel de profundidad se sacaron muestras de suelo por medio de pala, para ser llevadas al laboratorio en bolsas de plástico lugar en donde las muestras se saturaron en agua y se introdujeron a una olla a presión, sometiéndolas a una presión de 1/3 de atmósfera con la cual se eliminó el agua retenida en los macroporos (agua gravitante) que corresponde al volumen de éstos. Posteriormente las muestras se pesaron y fueron secadas en estufa a 105° C para eliminar el agua de los microporos; para finalizar

el proceso se volvieron a pesar las muestras obteniendo el volumen de microporos por diferencia de peso.

3.3 Análisis estadístico

El análisis estadístico comprendió una docimación de los supuestos básicos necesarios para realizar un análisis de varianza, a través de pruebas de bondad de ajuste para la normalidad de las variables (Chi-cuadrado) y Test de Cochran para la homogeneidad de varianza entre poblaciones (Snedecor y Cochran, 1981; Royo, 1983; Murray, 1989).

En el test de Cochran el estadígrafo calculado corresponde a:

$$R_c = \frac{\text{mayor } S_j^2}{\sum S_j^2}$$

donde:

R_c = estadígrafo test de Cochran calculado, relación de varianzas.

S_j^2 = varianza muestra j.

El estadígrafo tabulado se obtiene de la tabla de contrastes de Cochran con $n-1$ grados de libertad:

$$R_t = (n-1, k)$$

donde:

R_t = estadígrafo test de Cochran tabulado

k = nº de tratamientos.

n = tamaño de la muestra.

Una vez verificado los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, se procedió con los análisis de varianza que determinaron si las variables en estudio presentan diferencias significativas entre la huella y el control, para los distintos niveles de profundidad de suelo establecidos.

El análisis de la velocidad de infiltración se realizó de diferente manera puesto que se dispone sólo de poblaciones a nivel superficial (huella y control); éste análisis centra su atención en la velocidad de infiltración básica o estabilizada, que corresponde a los valores que se registran en los tiempos finales de las pruebas de infiltración, o sea, aquellos que se encuentra en la región en que la curva se torna asintótica con respecto al eje del tiempo (abcisa). Estas velocidades fueron comparadas a través de medias usando la prueba t de Student, analizando previamente el comportamiento de las varianzas con la prueba de Bartlett, para homogeneidad de varianzas (Snedecor y Cochran, 1981; Royo, 1983; Murray, 1989). El estadígrafo calculado para esta prueba es:

$$X^2 = (2.3026/c) * [(N-k) * \log Sp^2 - \sum (nj-1) \log Sf^2]$$

$$c = 1 + 1/(3(k-1)) * [\sum 1/(n-1) - 1/(N-k)]$$

$$Sp^2 = \frac{\sum (nj-1) * Sf^2}{N-k}$$

donde:

$$N = n_1 + \dots + n_j$$

$$k = n^{\circ} \text{ de tratamientos}$$

$$n_j = \text{tamaño muestra } j$$

$$Sf^2 = \text{varianza muestra } j$$

El estadígrafo t fue determinado por la siguiente expresión:

$$t = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{[(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)]}}$$

con β grados de libertad

$$\beta = \frac{[(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)]}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{(n_1-1)} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{(n_2-1)}}$$

donde:

t = estadígrafo t Student calculado.

μ_1 = media control.

μ_2 = media huella.

S_1^2 = varianza muestra control.

S_2^2 = varianza muestra huella.

n_1 = tamaño muestra control.

n_2 = tamaño muestra huella

IV RESULTADOS

4.1 Densidad aparente

El análisis estadístico del comportamiento de la densidad aparente, en el perfil del suelo, indicó que existen diferencias significativas entre huella y control en todos los niveles de profundidad de los tres sectores estudiados (Tabla 2).

TABLA 2. VALOR F DEL ANALISIS DE VARIANZA, PARA CADA NIVEL DE PROFUNDIDAD.

Sector	Profundidad (cm)	F
Harvester	0,0	12,69*
	10,0	15,08*
	20,0	27,86*
	40,0	15,54*
	60,0	11,02*
Forwarder	0,0	26,54*
	10,0	39,47*
	20,0	14,37*
	40,0	16,92*
	60,0	8,27*
Harvester + Forwarder	0,0	58,24*
	10,0	51,82*
	20,0	24,26*
	40,0	23,34*
	60,0	19,17*

* : Diferencia significativa ($p \leq 0,05$)

Los valores de densidad aparente de las huellas fueron mayores que los valores de los controles en su respectivo nivel de profundidad, para los tres sectores estudiados. Las mayores diferencias se observaron de 0,0 a 10,0 cm de profundidad para los tres sectores (Figuras 2, 3 y 4).

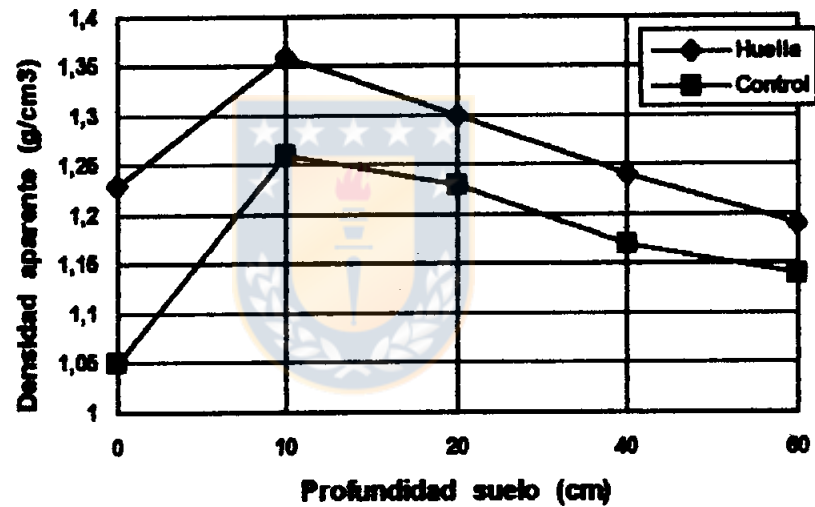


FIGURA 2. Densidad aparente en el perfil del suelo, sector harvester.

Los aumentos límites de densidad aparente alcanzados en las huellas, con respecto a los controles, fueron de un 17,14% en la superficie a un 4,40% a los 60,0 cm de profundidad para huellas de harvester; de 22,45% a un 2,38% para huellas de forwarder y de 21,43% a un 5,17% en huellas combinadas.

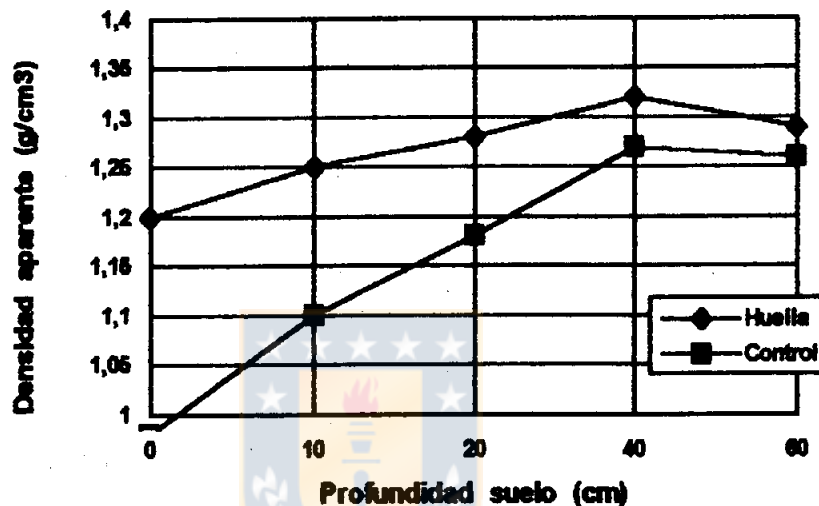


FIGURA 3. Densidad aparente en el perfil del suelo, sector forwarder.

El valor de densidad aparente más alto, para la huella, se presentó a los 40,0 cm de profundidad en el sector forwarder y a los 10,0 cm de profundidad en los sectores harvester y harvester+forwarder, siendo a las vez este último el más alto de los tres valores.

En tanto el menor valor de esta variable, para la huella, se presentó a los 60,0 cm de profundidad para sectores harvester y harvester+forwarder, y a los 0,0 cm de profundidad para el sector forwarder, siendo el primero de estos el menor de los tres (Figuras 2, 3 y 4).

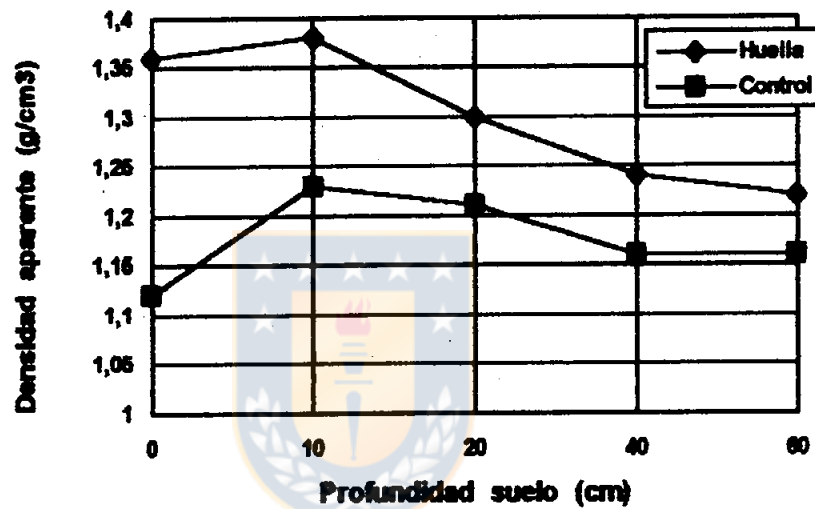


FIGURA 4. Densidad aparente en el perfil del suelo, sector harvester más forwarder.

4.2 Porosidad del suelo

Los análisis estadísticos realizados, a los tres tipos de porosidad, indicaron que existen diferencias significativas entre los valores de huella y control en todos los niveles de profundidad (excepto dos de ellos) en los tres casos (Tabla 3).

Los valores de macroporosidad y porosidad total de las huellas fueron menores que los valores de los controles en su respectivo nivel de profundidad, en todos los sectores. Lo contrario ocurre con los valores de microporosidad de la huella los cuales fueron mayores que los valores de los controles en su respectivo nivel de profundidad en los tres sectores.

Las mayores diferencias, en porcentaje, se observaron de 0,0 a 10,0 cm de profundidad para los tres tipos de porosidad en todos los sectores (Figuras 5 a 13).

TABLA 3. VALOR F DEL ANALISIS DE VARIANZA, PARA CADA NIVEL DE PROFUNDIDAD.

Sector	Profundidad (cm)	F (Macroporos)	F (Microporos)	F (P.Total)
Harvester	0,0	38,69*	37,38*	12,87*
	10,0	25,83*	31,91*	13,78*
	20,0	16,45*	18,90*	22,22*
	40,0	8,24*	8,69*	13,61*
	60,0	3,78	3,72	5,93*
Forwarder	0,0	20,12*	21,24*	25,82*
	10,0	13,23*	11,65*	21,56*
	20,0	19,04*	18,21*	11,39*
	40,0	7,46*	7,19*	10,20*
	60,0	6,70*	8,20*	6,19*
Harvester + Forwarder	0,0	36,64*	36,68*	57,06*
	10,0	19,80*	20,61*	48,79*
	20,0	29,11*	30,67*	21,10*
	40,0	17,03*	16,46*	18,07*
	60,0	6,51*	6,38*	15,41*

* : Diferencia significativa ($p \leq 0,05$)

Los más altos valores de macroporosidad, para la huella, se presentaron a los 20,0 cm de profundidad en los tres sectores; siendo, levemente, mayor el valor registrado en el sector harvester. A la vez los valores más bajos, para la huella, se presentaron a los 0,0 cm de profundidad en todos los sectores, siendo menor el registrado en el sector forwarder (Figuras 5, 6 y 7).

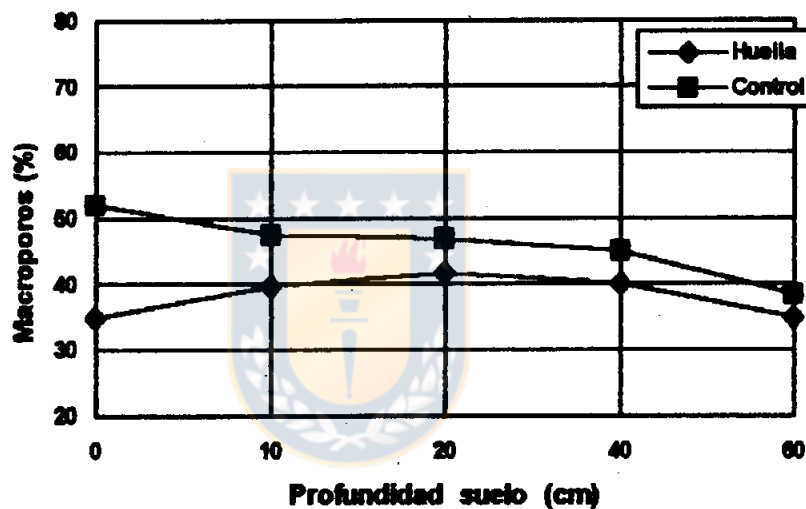


FIGURA 5. Macroporosidad en el perfil del suelo, sector harvester.

La disminución del volumen de macroporos en las huellas, con respecto a los controles, fue de 32,85% a 11,19% en huellas de harvester, 52,29% a 12,72% en huellas de forwarder y 32,25% a 11,86% en huellas combinadas, para 0,0 y 60,0 cm de profundidad, respectivamente.

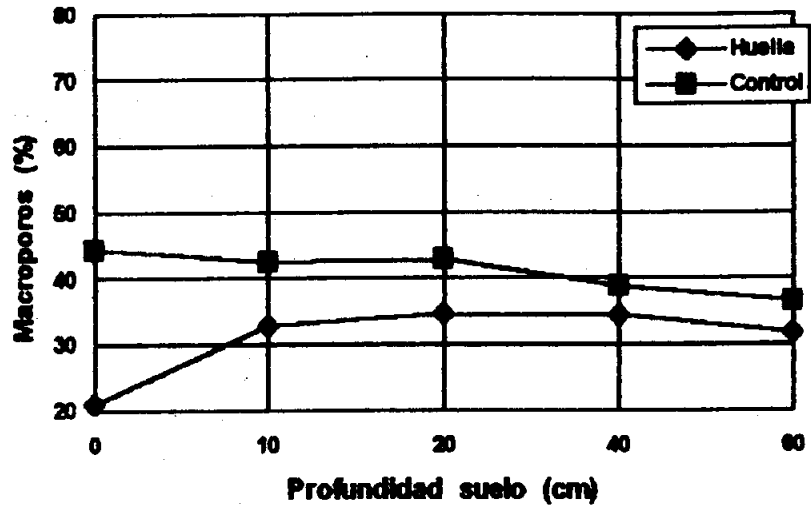


FIGURA 6. Macroporosidad en el perfil del suelo, sector forwarder.

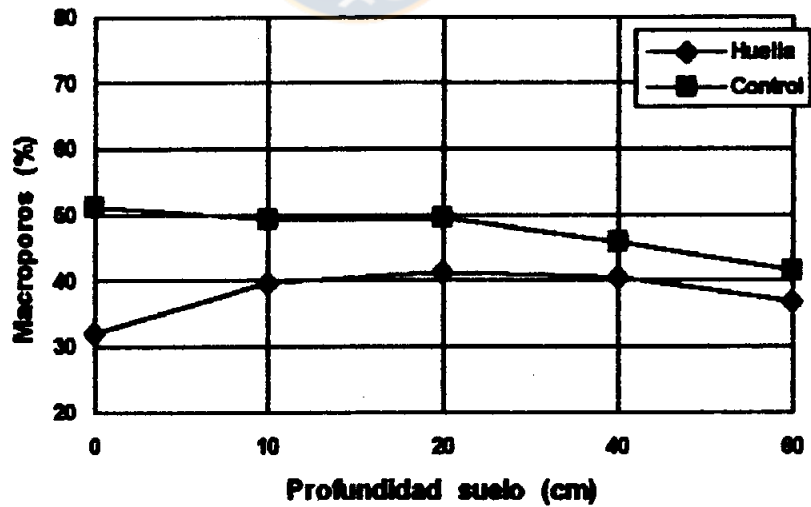


FIGURA 7. Macroporosidad en el perfil del suelo, sector harvester más forwarder.

Los valores de microporosidad mayores, para la huella, se presentaron a los 0,0 cm de profundidad en todos los sectores, siendo el más alto el registrado en el sector forwarder. Los valores menores, también para la huella, se presentaron a los 20,0 cm de profundidad en los sectores harvester y harvester+forwarder, y a los 40,0 cm de profundidad en el sector forwarder, siendo el más bajo el registrado en el sector harvester (Figuras 8, 9 y 10).

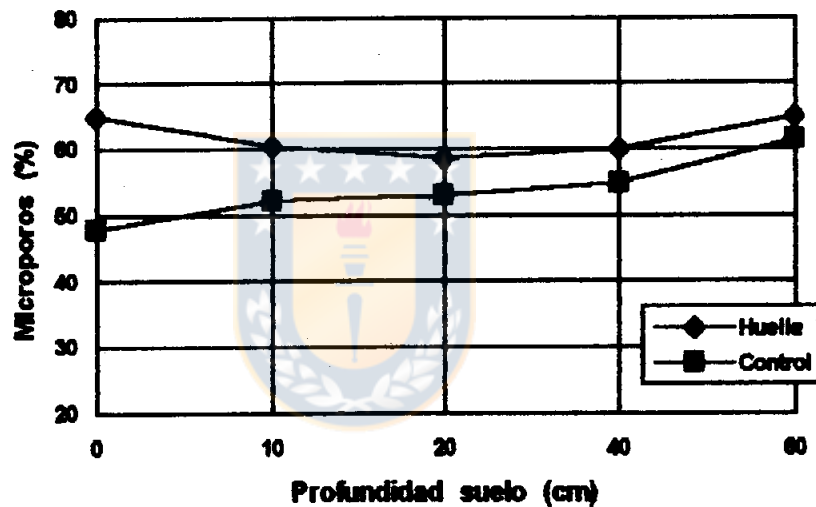


FIGURA 8. Microporosidad en el perfil del suelo, sector harvester.

Las máquinas provocaron en las huellas un aumento del volumen de microporos, con respecto a los controles, de 35,67% a 9,30% en huellas de harvester, de 40,51% a 7,81% en huellas de forwarder y de 38,99% a 8,04% en huellas combinadas, a 0,0 y 60,0 cm de profundidad, respectivamente.

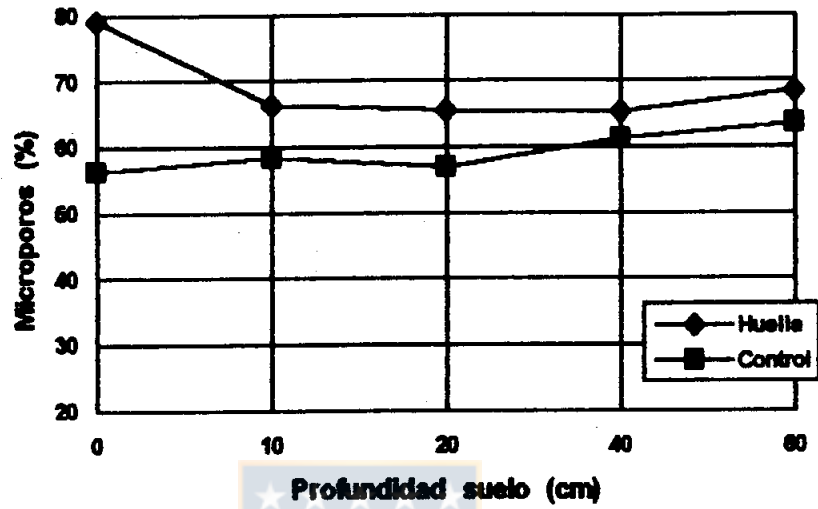


FIGURA 9.

Microporosidad en el perfil del suelo, sector forwarder.

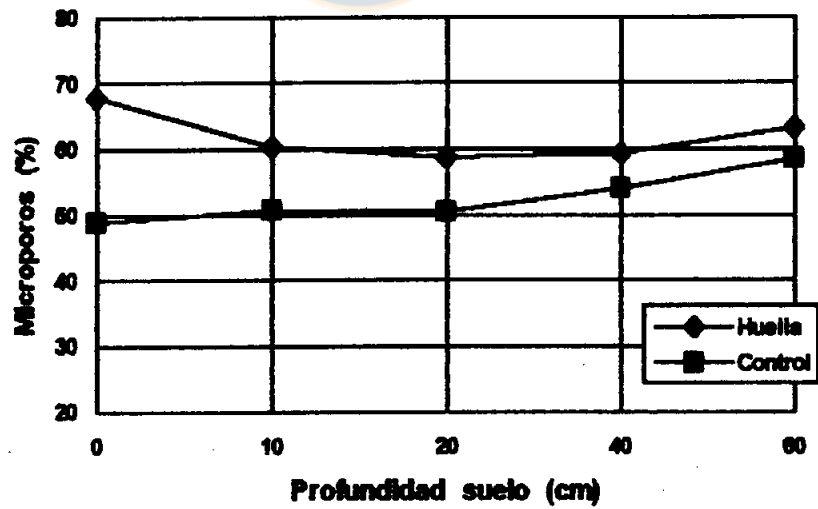


FIGURA 10.

Microporosidad en el perfil del suelo, sector harvester más forwarder.

Los valores más altos de porosidad total, para la huella, se presentaron a los 60,0 cm de profundidad en los sectores harvester y harvester+forwarder, y a los 0,0 cm en el sector forwarder, siendo mayor el valor registrado en el sector harvester. Los valores menores, para la huella, se presentaron a los 10,0 cm de profundidad en los sectores harvester y harvester+forwarder, y a los 40,0 cm en el sector forwarder, siendo más bajo el registrado en el sector harvester+forwarder (Figuras 11, 12 y 13).

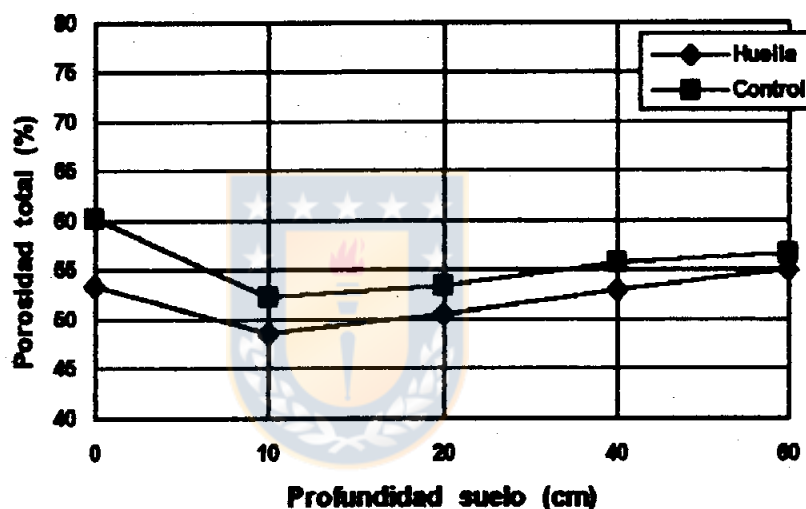


FIGURA 11. Porosidad total en el perfil del suelo, sector harvester.

Las variaciones límites de la porosidad total en las huellas, con respecto a los controles, fueron de 11,41% a 2,86% en huellas de harvester, de 13,22% a 2,58% en huellas de forwarder y de 16,01% a 3,94% para huellas combinadas, a 0,0 y 60,0 cm de profundidad, respectivamente.

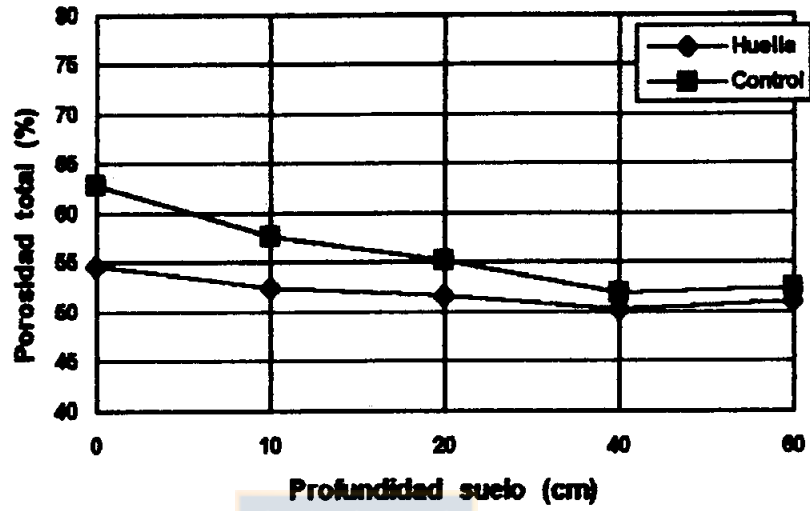


FIGURA 12.

Porosidad total en el perfil del suelo, sector forwarder.

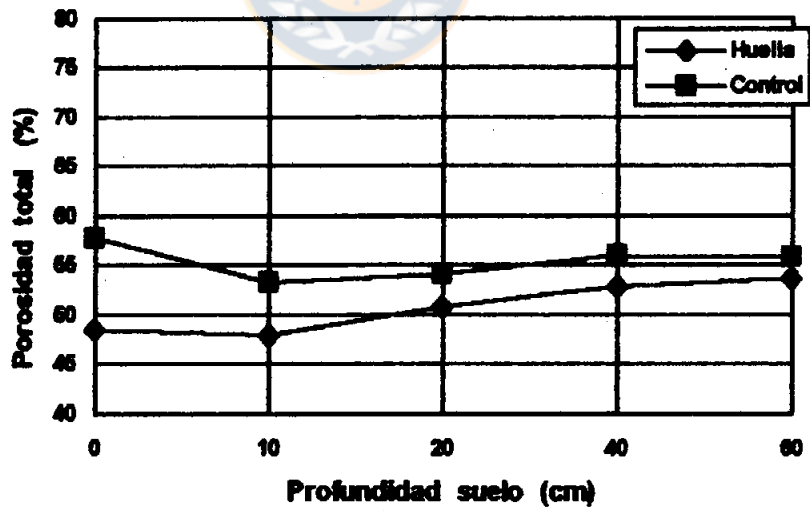


FIGURA 13.

Porosidad total en el perfil del suelo, sector harvester más forwarder.

4.3 Resistencia a la penetración

El análisis estadístico efectuado indicó que la resistencia a la penetración -Índice de cono- presentó diferencias significativas entre huella y control en todos los niveles de profundidad, en los tres sectores estudiados (Tabla 4).

TABLA 4. VALOR F DEL ANALISIS DE VARIANZA, PARA CADA NIVEL DE PROFUNDIDAD.

Sector	Profundidad (cm)	F
Harvester	0,0	40,58*
	10,0	33,15*
	20,0	45,20*
	40,0	30,18*
	60,0	17,98*
Forwarder	0,0	54,59*
	10,0	43,42*
	20,0	43,88*
	40,0	81,52*
	60,0	66,42*
Harvester + Forwarder	0,0	199,67*
	10,0	328,75*
	20,0	570,06*
	40,0	63,67*
	60,0	112,49*

* : Diferencia significativa ($p \leq 0,05$)

Los valores de Índice de cono de la huella fueron mayores que los valores de los controles en su respectivo nivel de profundidad para todos los sectores. Las mayores diferencias se observaron desde los 0,0 a 20,0 cm de profundidad para todos los sectores (Figuras 14, 15 y 16).

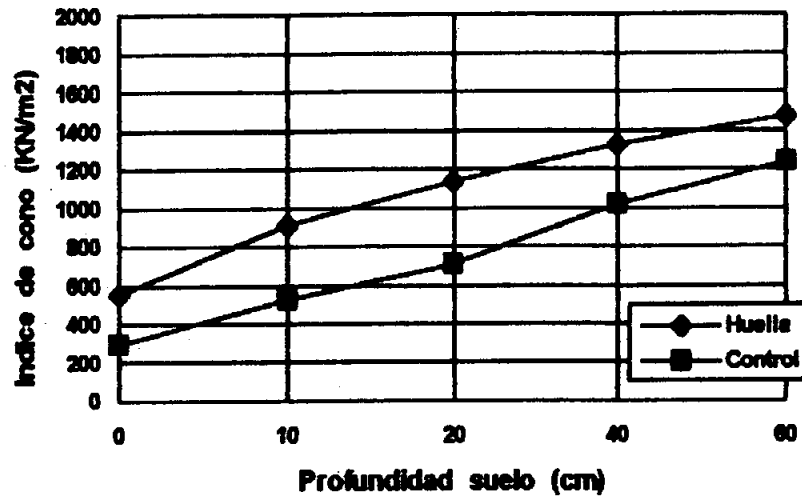


FIGURA 14. Índice de cono en el perfil del suelo, sector harvester.

El valor de índice de cono más alto, para la huella, se presentó a los 60,0 cm de profundidad para todos los sectores (Figuras 14, 15 y 16), siendo mayor el valor registrado en el sector forwarder. Los valores más bajos de ésta variable, para la huella, se presentó a los 0,0 cm de profundidad para los tres sectores, observándose menor valor en el sector forwarder.

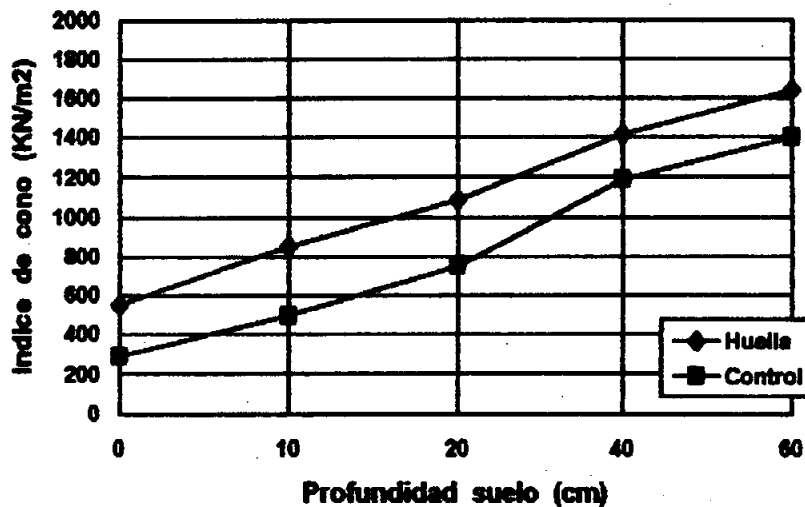


FIGURA 15. Índice de cono en el perfil del suelo, sector forwarder.

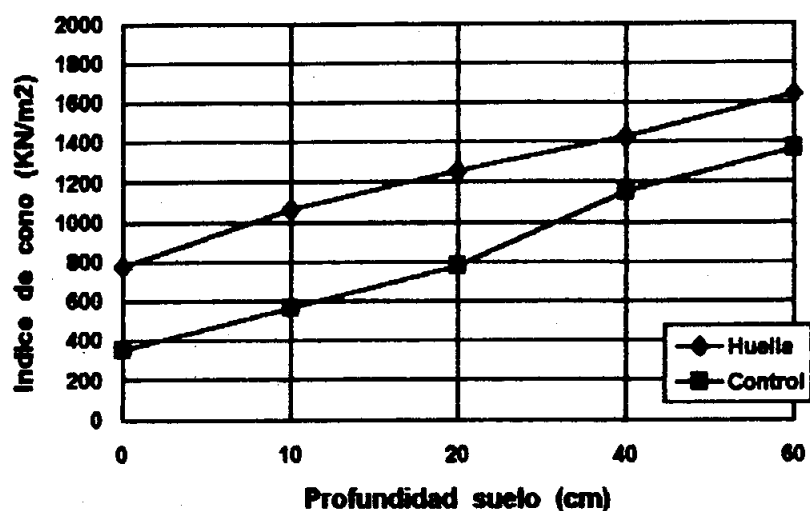


FIGURA 16. Índice de cono en el perfil del suelo, sector harvester más forwarder.

Los incrementos del Índice de cono en las huellas, con respecto a los controles, fue de 91,42% a 19,33%, 87,75% a 17,47% y de 119,93% a 19,86% para huellas de harvester, forwarder y combinada, respectivamente, para una profundidad de 0,0 y 60,0 cm.

4.4 Velocidad de infiltración

El análisis estadístico indicó que existe diferencia entre la velocidad de infiltración estabilizada o básica para la huella y el control en los tres sectores (Tabla 5).

TABLA 5. PRUEBA DE COMPARACION DE MEDIAS PARA VELOCIDAD DE INFILTRACION ESTABILIZADA, ENTRE HUELLA Y CONTROL.

Sector	Estimador	Huella	Control
Harvester	n	14	12
	x(cm/min)	0,019285	0,2875
	tm	104,32	
	tc	20,656	
Forwarder	n	14	12
	x(cm/min)	0,04285	0,4542
	tm	15,90	
	tc	11,05	
Harvester Forwarder	n	16	12
	x(cm/min)	0,0	0,17
	tm	97,66	
	tc	11,00	

($p \leq 0,05$)

Los valores de velocidad de infiltración de la huella fueron considerablemente menores que los valores del control para todos los sectores estudiados apreciándose diferencias promedio del orden del 90% para huellas de harvester y forwarder, y de 100% para huellas combinadas. Las diferencias existentes se acentuaron a medida que transcurrió el tiempo, para los tres sectores en estudio (Figuras 17 a 19).

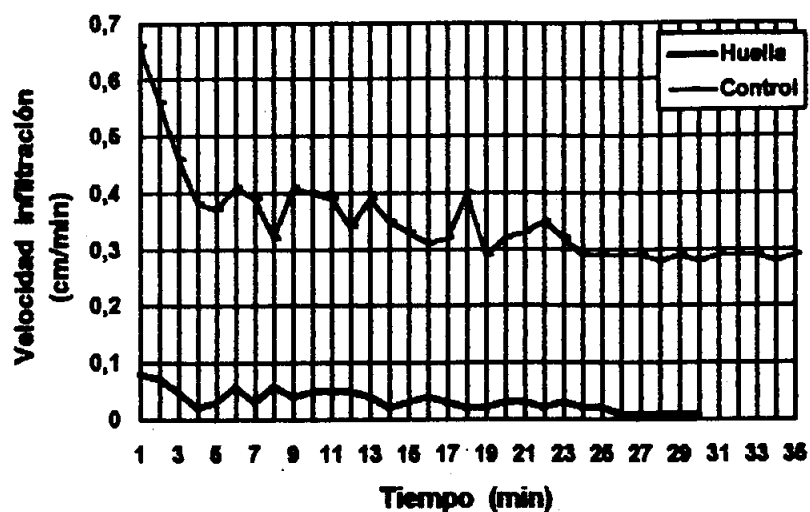


FIGURA 17. Velocidad de infiltración, sector harvester.

La velocidad de infiltración de la huella, en todos los casos, presentó un brusco descenso durante los primeros minutos, luego del cual tendió a estabilizarse. Se observó además que el sector harvester+forwarder es el que presentó menores valores de velocidad de infiltración en la huella, durante toda la prueba. (Figura 19).

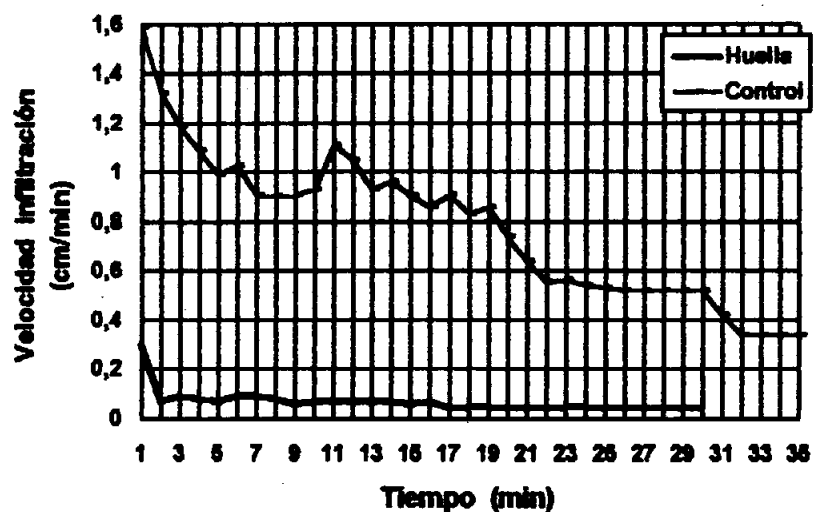


FIGURA 18. Velocidad de infiltración, sector forwarder.

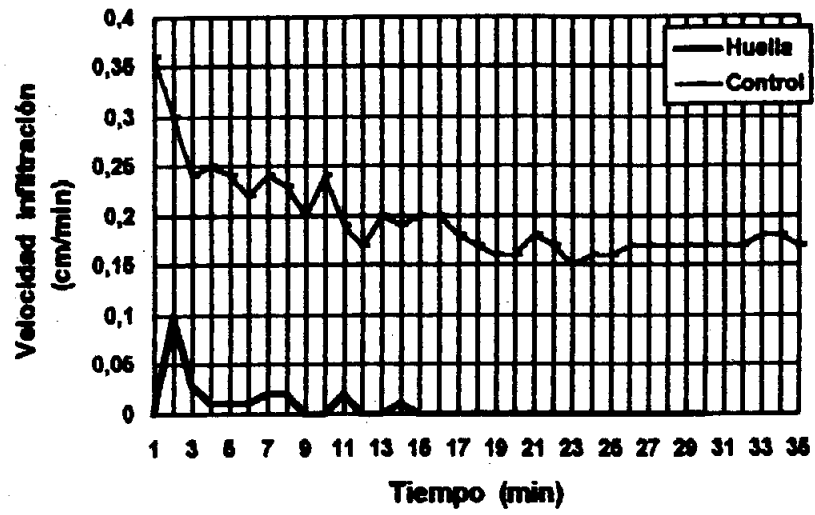


FIGURA 19. Velocidad de infiltración, sector harvester más forwarder



V DISCUSION

5.1 Densidad aparente

La densidad aparente de un suelo depende en gran medida de factores tales como: estructura, presencia de materia orgánica la cual facilita la granulación de los suelos, la textura y el grado de compactación, el cual es buen indicador de porosidad, determinante para el desarrollo radicular, aireación y capacidad de infiltración.

Según el grado de densidad aparente, ésta puede afectar el crecimiento de las plantas, la magnitud de las labores culturales del suelo, el nivel de erosividad de un suelo y el drenaje de éste.

En los resultados de este estudio es posible distinguir que en las huellas de las máquinas la máxima densidad aparente no se encuentra en la superficie, sino a una profundidad variable aproximada de 10 y 40 cm según el tipo de huella que se trate. Este hecho se puede explicar al considerar que el paso de las máquinas hace que se produzca una aglutinación de las partículas del suelo provocando un aumento de la densidad aparente, sobre todo en los primeros niveles de profundidad, producto de que allí se ubica el punto donde choca la fuerza normal de las máquinas con la fuerza de reacción del suelo (Linerós, 1994) (Figuras 2, 3 y 4).

El comportamiento de esta variable se explica también en parte por la expansión y contracción que sufren los suelos causado por las variaciones térmicas e higroscópicas, las que se presentan con un mayor grado de intensidad en los primeros centímetros del suelo. Estudios de Froehlich y Mc Nabb (1983) y Dickerson (1976) citado por Vaughan (1993), confirman una disminución de la densidad aparente en suelos con ciclos regulares de congelamientos y deshielos y un frecuente humedecimiento y secado.

Se debe considerar además, el efecto de tracción que ejerce el sistema de rodado de las máquinas sobre el suelo, haciendo que este último se rompa en la superficie aminorando el efecto de compactación provocado por la fuerza y vibración de las máquinas (Fuentes, 1993; Lineros, 1994).

La densidad aparente en las unidades de control, se manifiesta baja en la superficie debido a que allí existe un mayor nivel de actividad de microorganismos y procesos químicos naturales lo que hace que aumente la porosidad por disgregación de las partículas del suelo trayendo consigo una disminución de la densidad aparente, la cual al mermar ésta actividad va incrementándose en profundidad; a esto hay que agregar el peso del suelo que ocasiona compactación natural (Donoso, 1981; Pritchett, 1991; Fuentes, 1993; Lineros, 1994).

En relación a los niveles de densidad aparente detectados, Cullen et al. (1991) citados por Lineros (1994), señalan que el límite máximo de esta variable para evitar una severa disminución del crecimiento radicular debe ser inferior a $1,9 \text{ g/cm}^3$. En forma más puntual Schlatter y Grez (1978) citados por Gayoso e Iroumé (1989) estimaron que el límite máximo de densidad aparente para el crecimiento radicular de Pinus radiata es de $1,4 \text{ g/cm}^3$, si se trata de suelos arcillosos, y de $1,6 \text{ g/cm}^3$ en suelos arenosos.

Según los resultados de éste estudio la cosecha con el sistema mecanizado harvester - forwarder provoca una alteración significativa del perfil (0,0 a 60,0 cm), que aumenta los niveles de densidad aparente del suelo.

5.2 Porosidad del suelo

La porosidad corresponde al porcentaje de espacio poroso presente en un suelo, o bien el espacio de suelo que no está ocupado por sólidos. En forma análoga también se la puede definir como la porción de suelo ocupada por aire y/o agua. La porosidad está determinada por la distribución y arreglo de las partículas sólidas del suelo; según esto existen macroporos y microporos a los cuales se les asocia a distintos fenómenos en el suelo, los primeros son esenciales para el drenaje del agua gravitante, y los microporos permiten retener el agua en el perfil del suelo, ambos son importantes en el crecimiento y desarrollo radicular.

En las huellas de las máquinas estudiadas, producto del efecto dinámico de éstas se produce un acomodamiento de las partículas y una modificación de la estructura del suelo (Gayoso, 1982; Froehlich, 1991), que se traduce en la disminución del volumen total de poros acentuado en los primeros 20 cm debido mayoritariamente a la destrucción de los macroporos que son más susceptibles a presiones y vibraciones que los microporos.

Un aspecto importante que se observa es que la porosidad total para cada máquina por separado y para el sistema completo se comporta de forma casi simétricamente opuesta a la densidad aparente, lo que se explica por la alta correlación que existe entre ambas variables, por lo cual las explicaciones dadas para el comportamiento de la densidad aparente en la sección anterior también son válidas para la porosidad total.

En cuanto al volumen de macroporos y microporos en la huella, existe una relación inversamente proporcional entre ellos, explicada por el reacomodamiento de las partículas al destruirse los macroporos producto del choque entre la fuerza normal de las máquinas y la fuerza de reacción del suelo (Linerós, 1994).

El menor porcentaje de macroporos en los primeros 10,0 cm de profundidad se puede explicar por la rotura que sufre el suelo por efecto del sistema de rodado (Fuentes, 1993; Lineros, 1994), el cual modifica la estructura del suelo provocando una agregación de las partículas que se traduce en pérdida de macroporos y asociado a esto un incremento del volumen de microporos.

En los controles de este estudio, la porosidad se comporta en forma lógica en el perfil del suelo debido a que a nivel superficial hay presencia de materia orgánica, existe una mayor actividad de tipo biológica y química, que provoca disgregación del suelo lo cual aumenta la porosidad total (mayor cantidad de macroporos); luego a medida que se profundiza la actividad biológica y química decrece, sumándose a esto el peso del suelo lo cual provoca compactación natural disminuyendo la porosidad total (mayor cantidad de microporos).

La porosidad puede constituirse en un factor restrictivo para el crecimiento radicular; estudios de Bayer et al. (1972) citados por Gayoso e Iroumé (1989) indican que porcentajes de macroporosidad inferiores al 10%, se consideran restrictivos para el crecimiento de las plantas debido a que no es posible satisfacer las necesidades mínimas de aireación y a la disminución de la disponibilidad de agua.

Determinaciones hechas por Gayoso e Iroumé (1989) muestran que la macroporosidad se reduce bajo huellas en aproximadamente 20%, pudiendo llegar a valores residuales inferiores al 10%. Si se observa el comportamiento de la porosidad en las huellas de cada máquina en este estudio así como la huellas combinadas de ambas (Figuras 5 a 13) se aprecia que existe una alteración significativa de todo el perfil del suelo (0,0 a 60,0 cm), con excepción de macroporos y microporos para harvester al nivel de profundidad 60,0 cm, disminuyendo los niveles de porosidad total y macroporosidad y aumentando los niveles de microporosidad.

5.3 Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración puede ser expresada por el índice de cono el cual varía según el contenido de humedad, tipo de suelo y densidad aparente.

El índice de cono está altamente correlacionado con la densidad aparente, sobretodo cuando el contenido de humedad del suelo es homogéneo; por otra parte los suelos plásticos que presentan altos contenidos de humedad en todo el perfil son susceptibles a deformaciones en profundidad por la transmisión de las fuerzas que le otorga el agua. Según lo anterior, el comportamiento ascendente del índice de cono en el perfil de suelo, bajo las huellas, se explica por el alto y homogéneo contenido de humedad en el suelo lo que permite que el suelo arcilloso del lugar se deforme por la fuerza ejercida por las máquinas, fuerzas que se potencian con el peso del propio suelo en profundidad; a esto se debe agregar la resistencia opuesta por concreciones y rocas cuarzosas meteorizadas que elevan los valores de ésta variable en profundidad por encontrarse cada vez más próximo el material generador lo cual hace que la reacción a la penetración del cono aumente para los tres tipos de huella (Linerros, 1994).

En el suelo no alterado, el contenido de humedad en los primeros niveles de profundidad es alto y la densidad aparente es baja; luego el índice de cono presenta sus valores más reducidos, pero al aumentar en profundidad el contenido de humedad disminuye y al igual que en las huellas aparecen concreciones y rocas cuarzosas meteorizadas que indican la proximidad del material generador que como ya se indicó eleva la reacción del suelo a la penetración del instrumento (Linerros, 1994).

En resumen, el efecto de la cosecha mecanizada con el sistema harvester - forwarder provoca una significativa alteración de todo el perfil del suelo (0,0 a 60,0 cm).

5.4 Velocidad de Infiltración

El movimiento de agua en sentido vertical depende esencialmente de tres factores, conductividad hidráulica, succión matricial y fuerza de gravedad. La primera aumenta cuando el volumen de poros crece y baja cuando el contenido de humedad aumenta. La succión matricial corresponde a una fuerza de adsorción del suelo que baja al aumentar el contenido de humedad de este suelo. Este conjunto de variables regulan el proceso de infiltración en el suelo (Fuentes, 1993).

De acuerdo con los resultados de este estudio, la forma que adoptan las curvas de infiltración son similares entre si, en especial al comienzo de las pruebas de infiltración, esto tiene explicación en el comportamiento que manifiesta el fluido en el suelo, ya que el proceso de infiltración se produce de manera semejante ya sea en el control o en las huellas, lo que cambia es la velocidad a la cual ocurre el proceso.

También se debe considerar como un factor importante para la disminución de la velocidad de infiltración el sellamiento gradual del suelo provocado por el movimiento o migración de partículas de horizontes superiores hacia los poros que presentan diámetros menores y que se ubican más abajo (Fuentes, 1993). Así también la compactación del suelo, formación de capas impermeables y contenido de humedad inicial en el suelo (Linerros, 1994).

La cosecha mecanizada con el sistema harvester - forwarder provoca alta disminución en la velocidad de infiltración del suelo para los tres tipos de huella.

VI CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten llegar a las siguientes conclusiones :

- 1.- La densidad aparente en las huellas de las máquinas presentó valores significativamente mayores que el control en todo el perfil del suelo (0,0 a 60,0 cm).**
- 2.- En los tres tipos de huellas en estudio la porosidad total del suelo es significativamente menor que en los controles respectivos en todo el perfil estudiado (0,0 a 60,0 cm).**
- 3.- El volumen de macroporos en los tres tipos de huellas es significativamente menor que en los controles en todo el perfil estudiado, con excepción de los 60,0 cm de profundidad para huellas de harvester.**
- 4.- El volumen de microporos en los tres tipos de huellas es significativamente mayor que en los controles en todo el perfil estudiado, con excepción de los 60,0 cm de profundidad para huellas de harvester.**
- 5.- En las huellas de las máquinas la resistencia a la penetración creció gradualmente a medida que aumentó la profundidad.**
- 6.- La resistencia a la penetración en las huellas de las máquinas es significativamente mayor que en los controles en todo el perfil (0,0 a 60,0 cm).**
- 7.- Las velocidades de infiltración estabilizada en los controles son considerablemente mayores que las velocidades registradas en huellas de harvester, forwarder y huella combinada.**

VII RESUMEN

En un suelo arcilloso ubicado en la costa de la VIII región, se efectuó un estudio con el objeto de evaluar el grado de compactación que provoca el sistema mecanizado de cosecha harvester - forwarder. Para ese propósito, se seleccionaron tres vías de madereo, y se midió y analizó hasta una profundidad del suelo de 60 cm, densidad aparente, porosidad, resistencia a la penetración y velocidad de infiltración.

Se concluyó que el sistema mecanizado de cosecha compuesto por harvester y forwarder, causa alteraciones significativas en la densidad aparente, porosidad, resistencia a la penetración y velocidad de infiltración. Las modificaciones provocadas alcanzan hasta los 60,0 cm de profundidad del suelo. La densidad aparente aumentó en un 17,14%, 22,45% y 21,43% y la porosidad total se redujo un 11,41%, 13,22% y 16,01%; el volumen de macroporos se redujo un 32,85%, 52,29% y 32,25%; y el de microporos aumentó un 35,67%, 40,51% y 38,99%, en huellas de harvester, forwarder y combinada, respectivamente. La resistencia a la penetración, índice de cono, registró incrementos en profundidad que alcanzaron en promedio 54,83%, 48,30% y 62,37% para huella de harvester, forwarder y combinada. La velocidad de infiltración se redujo 93,30%, 90,60% y 100% en relación con los controles para huellas de harvester, forwarder y combinada, respectivamente.

SUMMARY

On a clayed soil located on the coast of the VIII Region, studies were done with the objective to evaluate the degree of compaction produced by the mechanized harvesting systems (harvester - forwarder).

Three types of logging roads were selected measured and analyzed up to a soil depth of 60,0 cm of apparent density, porosity, resistance penetration and soil infiltration velocity.

This study concludes that the mechanized harvesting system composed by the harvester and forwarder, causes significant alterations to the apparent density, porosity, resistance penetration and infiltration velocity. The changes occurred up to a depth of 60,0 cm of the soil.

The apparent density increased by 17,14%, 22,45% and 21,43% and the total porosity decreased by 11,41%, 13,22% and 16,01%; the macropores volume decreased by 32,85%, 52,29% and 32,25%; none the less the micropores volume increased by 35,67%, 40,51% and 38,99%, in harvester trails, forwarder trails and combined trails, respectively. The resistance penetration, cone index, registered depth increments that reached an average of 54,83%, 48,30% and 62,37% for harvester trails, forwarder trails and combined trails. The infiltration velocity was reduced by 93,30%, 90,60%, and 100% in relation to the controls for the harvester trails, forwarder trails and combined trails, respectively.

VIII BIBLIOGRAFIA

- 1.- Adams, P. and H.A. Froehlich. 1981. Compaction of forest soils. A Pacific Northwest Extension Publication. Oregon-Washington-Idaho. 13p.
- 2.- Cochran, P.H. and T. Brock. 1985. Soil compaction and initial height growth of planted ponderosa pine. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. 4p.
- 3.- Donoso, Z.C. 1981. Ecología forestal: el bosque y su medioambiente. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
- 4.- Formin. 1993. Anuario meteorológico 1993, estaciones: Escuadrón y Colicheu. Subgerencia de Silvicultura y Patrimonio. Depto. Mejoramiento Genético. Forestal Mininco S.A., Concepción. pp. 4.
- 5.- Froehlich, H.A. 1979. Soil compaction from logging equipment: effects on growth of young ponderosa pine. Journal of Soil and Water Conservation. 34(6): 276-278.
- 6.- Froehlich, H.A. and D.H. Mc Nabb. 1983. Minimizing soil compaction in Pacific Northwest Forest. In: Earl L. Stone (Ed.) Forest Soils and Treatment Impacts. Proc. of Sixth North American Forest Soils Conference. Univ. of Tenn. Conferences. Knoxville. USA. pp 152-192.

- 7.- Froehlich, H.A. 1991. A summary of machine impacts. In: Mechanized Harvesting the Future is Here. Department of Forest Engineering. Oregon State University. 2p.
- 8.- Fuentes, A. 1993. Compactación de suelo por equipos mecanizados terrestres en la cosecha forestal. Tesis de grado. Univ. de Concepción. Fac. de Cs. Forestales. Depto. Manejo de Bosques y Medio Ambiente. Chillán, Chile.
- 9.- Gayoso, J. 1982. Pérdida de la productividad del sitio por efecto del madereo. En: Actas Reunión de Trabajo sobre Evaluación de la Productividad de Sitios Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia. pp. 284-300.
- 10.- Gayoso, J. 1983. Efectos de la extracción forestal sobre suelos de textura fina. En: actas Simposio Desarrollo y perspectivas de las Disciplinas Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia. pp. 155-166.
- 11.- Gayoso, J. y A. Iroumé. 1989. Daño en suelos forestales asociado a faenas de madereo. Medio Ambiente 10(1): 70-79.
- 12.- Gayoso, J. y A. Iroumé. 1991. Compaction and soil disturbances from logging in Southern Chile. Ann Sci For. 48(1): 63-71.
- 13.- Gayoso, J., A. Iroumé y A. Ellies. 1991. Degradación de suelos forestales asociada a operaciones de cosecha. En: Actas III Taller de Producción Forestal. Noviembre 1991. Cap. XI. Fundación Chile. Concepción, Chile.

- 14.- Lineros, M.A. 1994. Efectos de la cosecha mecanizada en la compactación de suelos forestales. Tesis de Postgrado. Univ. de Concepción. Fac. de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
- 15.- Meurisse, R.T. 1991. Soil and water resource policies and standards related to mechanized harvest Pacific Northwest region national forests. In: Mechanized Harvesting the Future is Here. Department of Forest Engineering. Oregon State University. 2p.
- 16.- Minore, D. and H.G. Weatherly. 1988. Yarding-method and slash-treatment effects on compaction, humus, and variation in plantation soils. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Northwest Research Station. 6p.
- 17.- Murray, S. 1989. Teoría y problemas de estadística. Serie compendios Shaum. Mc.Graw-Hill/Interamericana. México.
- 18.- Pritchett, W. 1991. Suelos forestales: propiedades, conservación y manejo. Editorial Limusa S.A. México.
- 19.- Royo, D.A. 1983. Curso de estadística. Fac. de Cs. Agrarias, Veterinarias y Forestales. Depto. Desarrollo Rural. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

- 20.- Smith, C. 1991. Tentative guidelines for soil physical management of South African forestry soils. Part I: soil compaction; Part II: soil sensitivity and soil physical properties. En: Tutorial de Planificación de Cosecha y Distribución de Canchas de Madereo. Diciembre 1993. Fundación Chile. Concepción, Chile. pp. 470-482.
- 21.- Snedecor, G. y W. Cochran. 1981. Métodos estadísticos. Compañía Editorial Continental, S.A. México.
- 22.- Toro, J. 1991. La mecanización de faenas forestales y su relación con la degradación de suelos. En: Actas III Taller de Producción Forestal. Noviembre 1991. Cap. XX. Fundación Chile. Concepción, Chile.
- 23.- Vasquez, J. 1994. Informe de avance: estudio de suelos predio Escuadrón. Forestal Mininco S.A. . Concepción. pp. 1-3.
- 24.- Vaughan, L. 1993. Las faenas de cosecha forestal y el medio ambiente. En: Informe Nº 9 del Grupo de Producción Forestal. Fundación Chile. Concepción, Chile. pp. 39-50.

