



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

**Evaluación del crecimiento de *Pinus radiata*  
en suelos compactados, Valdivia.**

Profesor Guía: Sr. Juan Schlatter V.  
Tesis de Grado presentada como parte  
de los requisitos para optar al Título  
de **Ingeniero Forestal.**

**VICTOR GUILLERMO CARCAMO JACKSON**

VALDIVIA

2006

## CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

|                |                       | <b>Nota</b> |
|----------------|-----------------------|-------------|
| Profesor Guía: | Sr. Juan Schlatter V. | <u>5.7</u>  |
| Informante:    | Sr. Víctor Gerding S. | <u>5.8</u>  |
| Informante:    | Sr. Felipe Leiva M.   | <u>6.3</u>  |

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

---

Sr. Juan Schlatter V.

## ÍNDICE DE MATERIAS

|  | Página |
|--|--------|
| 1. INTRODUCCIÓN  | 1      |
| 2. MARCO TEÓRICO   | 3      |
| 2.1 La compactación del suelo  | 3      |
| 2.2 Requerimientos de la planta en relación al estado físico del suelo | 5      |
| 2.3 Materia orgánica   | 6      |
| 2.4 Efecto sobre las plantaciones                                      | 6      |
| 2.5 Recuperación de suelos compactados                                 | 7      |
| 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN  | 9      |
| 3.1 Material   | 9      |
| 3.1.1 Antecedentes generales del área de estudio                       | 9      |
| 3.1.2 Rodales de estudio e historial de uso del suelo                  | 11     |
| 3.2 Método   | 16     |
| 3.2.1 Simulación de rodales de <i>Pinus radiata</i>                    | 16     |
| 3.2.2 Levantamiento de parcelas  | 16     |
| 3.2.3 Características del suelo  | 17     |
| 3.2.4 Resistencia a la penetración                                     | 18     |
| 3.2.5 Evaluación de datos  | 18     |
| 4. RESULTADOS  | 19     |
| 4.1 Resultados dasométricos  | 19     |
| 4.1.1 Comparación del volumen mediante la simulación de rodales        | 19     |
| 4.1.2 Comparación de tablas de rodal y existencias                     | 19     |
| 4.2 Caracterización de los suelos de los rodales de estudio            | 20     |
| 4.3 Resistencia a la penetración                                       | 26     |
| 4.3.1 Método del bastón de golpe                                       | 26     |
| 4.3.2 Método del penetrómetro  | 26     |
| 5. DISCUSIÓN   | 31     |
| 6. CONCLUSIONES  | 34     |
| BIBLIOGRAFÍA   | 35     |

- 1 Abstract
- 2 Funciones de Índice de Sitio y de Volumen
- 3 Base de datos resistencia a la penetración (bastón de golpe)
- 4 Base de datos resistencia a la penetración (penetrómetro)
- 5 Tablas de propiedades físicas del suelo
- 6 Análisis de suelo (datos de laboratorio)
- 7 Análisis estadístico (resistencia a la penetración y densidad aparente)

## ÍNDICE DE FIGURAS

|           |  | Página |
|-----------|--|--------|
| Figura 1. | Rodales de estudio en el predio Los Pinos                                | 12     |
| Figura 2. | Densidad aparente y grupos homogéneos en los rodales de estudio          | 22     |
| Figura 3. | Volumen de poros gruesos de drenaje rápido                               | 23     |
| Figura 4. | Volumen de poros gruesos de drenaje rápido por horizonte                 | 24     |
| Figura 5. | Volumen de poros gruesos de drenaje lento por horizonte                  | 25     |
| Figura 6. | Promedio del número de golpes totales por rodal                          | 26     |
| Figura 7. | Número de golpes promedio en los tres rodales a distintas profundidades. | 26     |
| Figura 8. | Resistencia promedio a la penetración por rodal                          | 27     |

## ÍNDICE DE CUADROS

|           |  | Página |
|-----------|--|--------|
| Cuadro 1. | Tabla de rodal y existencias del rodal tratamiento   | 13     |
| Cuadro 2. | Tabla de rodal y existencias del rodal testigo   | 14     |
| Cuadro 3. | Tabla de rodal y existencias del bosque nativo   | 15     |
| Cuadro 4. | Simulación de rodales de <i>P. radiata</i> proyectados a 24 y 25 años                              | 19     |
| Cuadro 5. | Resumen de tablas de tablas de rodal y existencias general y puntual por rodal                     | 19     |
| Cuadro 6. | Características morfológicas de los perfiles de suelo  | 20     |
| Cuadro 7. | Grupos homogéneos de densidad aparente entre profundidades en el perfil de suelo del bosque nativo | 23     |
| Cuadro 8. | Grupos homogéneos de resistencia a la penetración entre perfiles de suelo                          | 29     |
| Cuadro 9. | Grupos homogéneos de resistencia a la penetración entre profundidades                              | 29     |

## RESUMEN EJECUTIVO.

El presente estudio se realizó en el predio Los Pinos, provincia de Valdivia, X Región, para evaluar la compactación producida por un tractor articulado (*skidder*) de 6t en un suelo rojo arcilloso (Typic Paleudult) y su efecto en el rendimiento de *Pinus radiata*, establecido en 1982 (tratamiento), producto de faenas de cosecha de la rotación anterior.

En la plantación forestal analizada se determinó el rendimiento volumétrico, en comparación a una plantación similar de 24 años, cuyo suelo fue menos afectado al utilizar tracción animal en la cosecha (testigo). Esta comparación fue ajustada mediante simulación debido a la diferencia de edad entre ambos rodales.

El análisis del suelo incluyó un sector de bosque nativo colindante con el suelo compactado, como referencia del suelo original. Se realizó una descripción morfológica de cuatro perfiles de suelo (dos en el rodal de 22 años) y se determinaron cambios en las propiedades físicas: densidad aparente, volumen de poros y resistencia a la penetración.

Los resultados de la simulación indicaron que el rodal testigo presentó un 11,4% más de volumen total que el rodal tratamiento a la edad de 24 años, para una misma densidad. Esto equivale a  $374,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  y  $336,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  respectivamente. A los 25 años esta superioridad disminuyó levemente a 10,1%. Al considerar el error de muestreo en el rodal testigo la diferencia aumentó a 25%.

El suelo del rodal testigo fue el único que presentó un horizonte tipo C y la estructura del primer horizonte indica que fue sometido a un menor esfuerzo que el suelo del rodal tratamiento. El suelo del bosque nativo presenta una morfología típica de suelos con alta actividad biológica e indica que ha tenido un bajo tránsito histórico. En el rodal tratamiento se observan, en cambio, indicadores característicos de efectos de remoción y tránsito de maquinaria.

La densidad aparente de los suelos tuvo una diferencia significativa (95% de confianza) para todos los perfiles, comparándolos a una misma profundidad. En el horizonte A ( $p= 0,015$ ), en el horizonte AB ( $p= 0,009$ ), en el horizonte BA ( $p= 0,014$ ) y en horizonte B ( $p= 0,019$ ). En un mismo perfil sólo el bosque nativo presentó diferencia significativa ( $p= 0,001$ ) entre horizontes, lo que indica que el efecto de tránsito ha homogenizado los horizontes superiores con los inferiores en los otros perfiles.

El volumen de poros gruesos disminuyó a medida que aumentó la profundidad del suelo en todos los perfiles. El suelo del rodal testigo y el bosque nativo presentaron los mayores volúmenes reflejando un estado menos afectado por tránsito. El rodal tratamiento en su perfil 1, registró los valores de volumen más bajos de todo el estudio y en su perfil 2 valores cercanos a los del rodal testigo y bosque nativo por tratarse de suelo removido. Cabe señalar que en general los valores fueron muy altos para este tipo de suelos (25-35%).

La resistencia a la penetración horizontal, el rodal tratamiento acusó el efecto del tránsito de *skidder* hasta los 65 cm de profundidad. En el perfil 1 esta resistencia fue más alta en los horizontes profundos (BA y B) debido a que el suelo superficial corresponde a material de relleno. El suelo del rodal testigo y el bosque nativo presentaron valores muy similares, siendo el rodal testigo levemente superior en esta característica, debido a que la tracción animal sólo afectó al suelo superficial y es de menor duración que el producido por un *skidder*. Para una misma profundidad la diferencia de la resistencia resultó significativa ( $p= 0,000$ ) para los cuatro perfiles, en todas las profundidades analizadas (5, 15, 25 y 45 cm). Entre profundidades de un mismo perfil, la diferencia fue significativa ( $p=0,000$ ) sólo para los perfiles del rodal tratamiento y el bosque nativo (95% de confianza).

Se concluye en este estudio, que la principal causa de pérdida de rendimiento con respecto a la primera rotación de pino, debiera ser la compactación del suelo debido a que los rodales de primera rotación fueron cosechados en invierno con maquinaria y tracción animal, donde se establecieron posteriormente los rodales de segunda rotación. Esta pérdida se estima en un 25% considerando un error de muestreo. La calidad de las plantas, el método de plantación y el manejo posterior del rodal produjeron una pérdida adicional importante. También se señala que el efecto de la compactación fue mitigado por el hecho de que no toda la superficie de producción fue transitada por lo cual el efecto real de la compactación puede ser aún mayor.

Palabras clave: *Pinus radiata*, rojo arcilloso, rendimiento, compactación.



## 1. INTRODUCCIÓN.

En los últimos diez años las actividades de cosecha forestal en Chile han tenido un fuerte desarrollo a nivel nacional. Ha habido una mejoría substancial en cuanto a la planificación, la construcción de redes de caminos permanentes, el estudio y la incorporación de nuevas tecnologías, la mecanización de las faenas y la mantención en los niveles de producción. Esto se ha traducido en un aumento en los niveles de productividad, mejor desarrollo de la seguridad y el interés por cuidar la productividad de los sitios y el ambiente en general.

Dentro de las características típicas de los tractores articulados (*skidder*) con huinche, está su capacidad para retirar trozas de zonas ribereñas, sin ingresar la máquina a sectores protegidos. Además pueden cosechar rodales donde se dejan árboles residuales, permitiendo a la máquina permanecer en la vía de saca designada, evitando la alteración entre las vías. En caso de encontrar suelo blando, se puede detener la acción del huinche y mover el *skidder* a suelo más firme, desde donde puede volver a tirar las trozas, reduciendo el impacto al suelo, especialmente en madereo contra la pendiente.

Sin embargo, el alto nivel tecnológico también trae consecuencias asociadas a la cosecha forestal, ya que la construcción de caminos para la ejecución de las faenas de cosecha puede generar fallas menores en taludes y cierta erosión superficial. En pendientes moderadas, la degradación de sitios puede ser consecuencia de remoción de suelos y exposición de subsuelo; en pendientes suaves, puede generar degradación por compactación y amasado del suelo, producto del tránsito de maquinaria, volteo, madereo, carguío y transporte.

El principal impacto de los equipos *skidder* es producto de la cantidad de viajes que deben realizar sobre los sitios para cosechar un determinado volumen, ya que no pueden transportar cargas muy grandes. El diseño de las vías de saca debe ser muy bien planificado de forma de restringir la zona de daños.

El uso de esta maquinaria, en general, produce una compactación en el suelo, lo que se traduce en una modificación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de éste, generándose condiciones desfavorables para el desarrollo vegetal.

Para un uso sostenible del recurso es necesario conocer la susceptibilidad del suelo a la compactación y el peso máximo que éste puede soportar a fin de evitar un daño severo e irrecuperable en sus propiedades.

La capacidad de penetración de las raíces depende de las propiedades estructurales y de las condiciones hídricas del suelo. Las raíces se desarrollan preferentemente en zonas con baja resistencia a la penetración y cuando se presenta una favorable relación suelo-aire-agua.

En un suelo compactado el sistema radicular presenta un desarrollo superficial, poco extendido, con lo cual disminuye la eficiencia de absorción de nutrientes y el aprovechamiento de agua del subsuelo. También el efecto de anclaje se ve disminuido, otorgando al árbol una menor resistencia mecánica a los fuertes vientos.

El objetivo de este trabajo es evaluar el suelo y el crecimiento de un rodal de *Pinus radiata* en un terreno compactado por *skidder*, producto de las faenas de cosecha de la rotación anterior.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Evaluar el efecto de la compactación del suelo en el rendimiento volumétrico de una plantación de *P. radiata*.
- Determinar cambios en las propiedades físicas del suelo por efecto de la cosecha.

## **2. MARCO TEÓRICO.**

### **2.1. La compactación del suelo.**

El fenómeno de la compactación parece un proceso simple pero se dificulta predecirlo, debido a la gran variabilidad de suelos existentes y de fuerzas naturales o aplicadas que actúan sobre él. La compactación influye en la mayoría de los procesos físicos y biológicos que ocurren en el suelo, afectando la productividad y su conservación (Larson *et al.*, 1980).

Mediante el proceso de la compactación las partículas del suelo se ponen más en contacto entre sí, lo que conlleva la expulsión del agua o el aire de los poros. La compactación de un suelo provoca un aumento de la densidad aparente, resultado de cargas y/o presiones aplicadas, ya que un acercamiento de las partículas produce una disminución en la relación de vacíos (Gayoso, 1985).

La compactación equivale a la reducción de la profundidad de un suelo y a la disminución de su volumen arraigable. La compactación produce el sellado del suelo, donde la velocidad de infiltración del agua disminuye considerablemente. La precipitación escurre superficialmente y genera la erosión del suelo. Los rendimientos agrícolas bajan y la tasa de crecimiento de las plantaciones forestales disminuye (Ellies, 2000).

La compactación puede ser causada por procesos naturales como el impacto de la lluvia, condiciones pedogénicas, secado muy profundo, o causas externas como el excesivo tránsito de maquinaria pesada y pisoteo animal (Horn, 1985).

Las actividades comprendidas en el ciclo de cosecha de las empresas forestales corresponden a las que producen mayor impacto en el sitio y en el suelo. Esta actividad después de la construcción de caminos, es considerada como la de mayor importancia desde el punto de vista del efecto sobre la productividad del sitio (CIFOR, 1998).

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

El grado de compactación del suelo depende de la fuerza aplicada y del contenido de agua del suelo. La densidad aparente de un suelo, bajo un esfuerzo constante de compactación, sube progresivamente al aumentar el contenido de agua, pero hasta un máximo y luego disminuye con adiciones posteriores de agua (Reyes, 1991).

Al aplicar una presión sobre el suelo, éste se desplaza tanto en sentido horizontal como vertical, aumentando el número y superficie de contacto entre las partículas. Con un incremento en la densidad aparente hay una pérdida en la porosidad lo que se asocia con un deterioro en la calidad del sitio para el crecimiento vegetal, ya sea por pérdida del espacio poroso o por un aumento en la resistencia al arraigamiento (Hartge, 1984).

La importante relación entre densidad aparente y distribución de tamaño de poros, demuestra que los efectos de una compactación son dañinos. Al aumentar la densidad aparente cambia la distribución del tamaño de los poros (Hartge, 1984). La compresión reorienta las partículas, lo que se traduce en un aplastamiento y ruptura de agregados, transformándose los poros grandes en medianos y finos. Esto produce una reducción en el intercambio de gases, disminución de la actividad biótica y de la capacidad de almacenamiento de agua. Con ello la proliferación de raíces se afecta debido al aumento de la resistencia a la penetración y la disminución en la aireación (Laming, 1982).

Según Ellies (1999), la capacidad de soporte de los suelos se reduce al aumentar su contenido de humedad. Debido a ello el efecto de las presiones ejercidas por la maquinaria es variable a lo largo del año.

El mismo autor explica que el asentamiento del suelo debido a cargas excesivas se traduce en una menor capacidad de almacenamiento de agua, acentuándose las sequías estivales. Además, durante el invierno aumenta el escurrimiento superficial debido a una menor conductividad hidráulica y velocidad de infiltración, con lo cual se potencia la erosión.

Ellies (1999) estudió la compactación que produce un tractor de 4 toneladas sobre un suelo rojo arcilloso subsolado, tanto en verano como en invierno: en verano la orientación de las cargas fue alrededor de un eje vertical y alcanzó una profundidad de 45 cm. Esto sugiere que el tránsito sobre suelos subsolados, aun con equipos livianos debe evitarse, porque la estructura artificial es inestable. Las vías de saca deben ser perpendiculares a las líneas de subsolación, para que el suelo compactado soporte una parte de la carga. En invierno la penetración de la carga fue mayor y alcanzó una profundidad de 65 cm. Si el suelo no tiene la resistencia suficiente el cambio que se produce en la estructura compromete a horizontes más profundos, los cuales son más difíciles de recuperar.

También constató que cuando el suelo superficial es húmedo se produce una fuerte pérdida de la porosidad total. En condición saturada, el suelo superficial pierde cerca de un 30% de porosidad total.

La pérdida más destacada, sin embargo, es la cualitativa, ya que la reducción de los poros gruesos supera en algunos casos el 50% y compromete horizontes más profundos mientras más húmedo está el suelo.

## 2.2 Requerimientos de la planta en relación al estado físico del suelo.

El sistema radical es una de las partes más esenciales de la planta. Ejerce principalmente las funciones de absorción y transporte de nutrientes y agua; fijación, almacenamiento y síntesis de compuestos orgánicos. La eficiencia de las raíces en sus distintas funciones depende tanto de las características hereditarias de la especie como del medio en que se desarrollen (Helal, 1991).

El medio ambiente del suelo, tanto interno como externo, es determinante en el desarrollo vegetal, desde la germinación hasta la madurez fisiológica (Medina, 1977).

La cantidad de agua y nutrientes minerales disponibles para la planta está determinada por el volumen de suelo con que sus raíces entran en contacto. El crecimiento pujante de las raíces está condicionado a muchos factores en el ámbito del suelo que lo rodea, especialmente los que tienen relación con la resistencia mecánica contra el crecimiento de las raíces (Servicio de Conservación de Suelos, 1974).

En suelos profundos y bien aireados, las raíces pueden llegar a varios metros de profundidad. Generalmente el mayor volumen de raíces se concentra entre los 0,6 y 1,5 m. Cuando el suelo presenta un número de poros adecuado y de un diámetro tal que las raíces penetren sin mayor esfuerzo, éstas crecen activas y vigorosas (Kramer, 1983). Un suelo bien estructurado y espaciado presenta en general una distribución bastante homogénea en sentido horizontal y una disminución gradual en sentido vertical. En suelos con algunas limitaciones estructurales o de profundidad la distribución radicular puede ser heterogénea y/o presentar concentraciones en determinados horizontes, generalmente superficiales (Schlatter *et al.*, 2003).

Los pelos radicales tienen un diámetro cercano a 10  $\mu\text{m}$ , de modo que poros con un diámetro menor no son arraigables. Debido a esto, la magnitud de la porosidad gruesa es esencial en el arraigamiento y los poros arraigables pueden ser expandidos si la fuerza que une a las partículas es menor que la presión provocada por el crecimiento (Horn, 1984).

A medida que las condiciones alrededor de la raíz se tornan desfavorables, el sistema radicular será menos ramificado, corto y más grueso, de modo que en terrenos compactos las raíces se desarrollarán dentro de una capa delgada de suelo, sin poder seguir su acostumbrado crecimiento (Medina, 1977).

Para un adecuado desarrollo de las raíces, el espacio poroso total debe conservarse o incrementarse. Un buen desarrollo vegetal se puede garantizar cuando existe como mínimo un 12-15% del volumen de suelo ocupado por poros gruesos, para favorecer la difusión de los gases y la conducción del agua, el resto de la porosidad debería ser de tamaño medio para tener un buen almacenamiento de agua útil (Horn, 1984).

Una cantidad inferior propende al anegamiento, condiciones de reducción e insuficiente intercambio de gases metabólicos, lo cual restringe el desarrollo vegetal (Ellies, 1999).

La densidad aparente óptima de un suelo es aquella que permite una adecuada aireación, infiltración y proliferación de raíces. El crecimiento radical es afectado en su desarrollo cuando la densidad aparente alcanza ciertos valores umbrales. Según Schlatter *et al.* (2003) esto sería con densidades mayores a  $1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  para un suelo arcilloso y  $1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  para un suelo arenoso.

El factor más importante para el éxito de los cultivos es el aporte hídrico, ya que en el crecimiento radical el agua proporciona la fuerza que permite expandir las células y producir la elongación. El movimiento del agua hacia las raíces es relativamente lento y la única disponible en forma inmediata es la que se encuentra desde unos milímetros hasta unos cuantos centímetros de ellas, por lo tanto, la extensión horizontal y vertical del sistema radical y el grado de ramificaciones son determinantes para el buen desarrollo de la planta (Medina, 1977).

### **2.3 Materia orgánica.**

La cantidad de materia orgánica en el suelo influye directamente sobre la estructura de éste aumentando, por lo tanto, su porosidad. Además, la materia orgánica es muy porosa alcanzando valores de 80%-90% de porosidad total en ella (Donoso, 1997).

Según Ellies (2000), la materia orgánica es necesaria para la estructuración en la mayoría de los suelos, especialmente los de textura fina. Con cada uso y manejo del suelo se produce un equilibrio entre el aporte y la pérdida de materia orgánica.

El mismo autor señala que la disminución de la porosidad total y el cambio en la distribución por tamaño en un suelo trumao parecen ser alarmantes. Sin embargo, la porosidad residual aún permite un adecuado crecimiento vegetal. En un suelo rojo arcilloso la pérdida de materia orgánica incide más en un cambio cualitativo del sistema poroso el cual tiene un fuerte impacto sobre el crecimiento vegetal. Esto indica que la conservación de la materia orgánica en algunos suelos es de mayor prioridad que en otros.

### **2.4 Efecto sobre las plantaciones.**

El efecto de la compactación expresado en crecimiento de volumen llega a ser de un 56-59% menor que lo obtenido en sectores menos alterados. Esta disminución se mantiene hasta la edad adulta del árbol, aunque muestra algunos signos de recuperación, siempre que las solicitaciones no sean tan grandes que el suelo se deforme hasta un estado irreversible, situación que se logra cuando se modifica más del 50% de la densidad inicial, desde cuyo valor nunca podrá llegarse a las densidades originales (Alarcón, 2001).

Gayoso *et al.* (1991) determinaron que los caminos, canchas y vías de saca no planificadas para madereo con *skidders* cubren hasta un 53% de la superficie total cosechada. Para la especie *Pinus radiata*, en suelos alterados por el madereo, se han medido pérdidas de crecimiento en altura de los árboles entre 20% y 50%. En esta pérdida de crecimiento es posible que participen también la pérdida de nutrientes por efecto de la erosión y remoción de suelo (Gayoso e Iroumé, 1995).

Monroy (1981) evaluó el crecimiento de las plantas de *Pinus radiata* de cuatro años de edad establecidas sobre dos situaciones distintas de un suelo rojo arcilloso: inalterado y compactado. Estos suelos son de textura fina limo-arcillosa y se encuentran en los predios Los Ulmos (40°02' S y 73°06' O) y Los Pinos (39°43' S y 73°06' O). Los resultados de la evaluación indican que la altura media alcanzada por las plantas establecidas sobre un suelo inalterado es un 30% mayor que las establecidas sobre un suelo compactado. En diámetro la diferencia alcanzó un 23% favorable a la situación inalterada. También señala que existen otros factores, además de la compactación, que restringirían el crecimiento de las plantas, como la lixiviación de minerales, menor contenido de materia orgánica y efectos químicos que no fueron estudiados.

## **2.5 Recuperación de suelos compactados.**

De acuerdo con algunos autores, la compactación del suelo no es un problema en la actualidad ya que existen diversos métodos de recuperación tales como la labranza y el uso de fertilizantes. Sin embargo, existen autores que también plantean lo contrario.

La labranza tiene como principal objetivo la eliminación de la compactación del suelo, mejorando los regímenes de aireación y drenaje. Es muy importante que esta intervención se realice en el momento adecuado, con el suelo con una capacidad de soporte suficientemente elevada para resistir el tratamiento. Esto es particularmente cierto en el caso de los suelos rojos arcillosos, que se ven muy afectados según la condición de humedad presente (Rab, 1998).

En caso de operar sobre suelos muy húmedos se producirá amasado, en tanto que en condiciones de baja humedad se producirán bloques y pulverización. Bajo distintos contenidos de humedad se forman sustratos con distinto tamaño y distribución de agregados. La trabajabilidad de los suelos, y en particular los de tipo arcilloso, depende de su límite plástico y éste está influido en gran medida por su contenido de materia orgánica (Rab, 1998).

Rab (1998) propone el método de labranza extensiva. Este tratamiento comprende toda la superficie alterada hasta una profundidad determinada. En general sus tasas de productividad son más altas que los otros métodos de recuperación y sus costos más bajos. Normalmente utiliza equipos que se mueven en una sola dirección y que completan la operación en una sola pasada, lo que incide directamente sobre el suelo.

El mismo autor señala que otro factor importante a considerar en la recuperación del suelo es la conservación y la incorporación del mantillo. Es importante en la restitución de la materia orgánica del suelo y sus beneficios físicos, químicos y biológicos. Esta labor otorga una mayor estabilidad a los agregados del suelo, originando una mejor distribución de poros y menores densidades aparentes.

También propone el método de labrado biológico. Para realizar esta labor se emplean comúnmente especies agrícolas que puedan penetrar en suelos compactados. El *Lupinus albus* (lupino) es una de estas especies y por lo general las dicotiledóneas ejercen un mejor efecto que las gramíneas. Una ventaja adicional que conlleva este método es la incorporación de nitrógeno al suelo al ser fijado por las plantas, así como un efectivo control de la erosión superficial.

Según Buck (2000), la desventaja fundamental del empleo de la técnica de labrado biológico reside en la poca profundidad en que es efectivo el tratamiento, aun si se emplean arbustos, y que requiere de un tiempo prolongado para obtener resultados.

Dentro de los métodos de recuperación de suelos es común el uso de fertilizantes y enmiendas. Los fertilizantes tienen por objetivo mejorar el establecimiento de las plantas, acelerar su crecimiento y mantener su productividad. El uso de enmiendas (materia orgánica en forma de *compost*) es relevante en la recuperación de suelos fuertemente degradados. Las enmiendas deben realizarse en conjunto con algún tipo de labranza para incorporar éstas al suelo superficial y restaurar las propiedades físicas del mismo, pérdidas principalmente por compactación (Bainbridge, 1999).

Según Ellies (1999), debido al rápido ciclo de las rotaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp* se produce un problema acumulativo. Es común subsolar estos suelos, pero la restitución de los macroporos no supera el 50% y sólo abarca la angosta línea de plantación. El resto de la superficie se compacta aún más con el peso de los tractores que arrastran el subsolador. Los resultados de las subsoluciones pueden ser de carácter efímero, debido a que las posteriores prácticas silvícolas que incluyen tránsito de maquinaria trasladan las estratas compactadas a profundidades mayores donde es más difícil soltarlas.

El mismo autor señala que la pérdida de productividad por compactación se ha tratado de compensar con la aplicación de mayores dosis de fertilizantes, sin solucionar un problema que es de origen físico.



### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

#### 3.1 Material.

##### 3.1.1 Antecedentes generales del área de estudio.

El área de estudio corresponde al predio Los Pinos, el cual es propiedad de la Universidad Austral de Chile y actualmente es administrado por el Centro Experimental Forestal (CEFOR). Este predio posee una superficie total de 435,7 ha y se encuentra en la Provincia de Valdivia, sector Cayumapu. Se localiza entre los 39°43' y 39°45' de latitud sur y los 73°06' y 73°12' de longitud oeste (Muñoz, 1986).

El acceso principal del predio se encuentra en el kilómetro 15 de la carretera T-205 que une las ciudades de Valdivia y San José de la Mariquina. Los caminos internos principales son ripiados, por lo que son transitables durante todo el año. Sin embargo el tránsito de los camiones pesados es recomendado sólo durante los meses en que los caminos están secos, es decir desde la primavera al otoño, en general. También existen senderos o vías de saca que permiten al acceso a todos los rodales.

##### *Clima.*

El clima de la zona, de acuerdo a la clasificación de Köppen, es de tipo templado lluvioso con influencia mediterránea. El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 2.000 – 2.500 mm, concentrada principalmente en los meses de invierno (INIA, 1989)

De acuerdo a la clasificación de Schlatter *et al.* (1995) el predio se ubica en la zona 1 y distrito 0. Esta zona corresponde al secano interior formado por la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa y parte occidental de la Depresión Intermedia. Se caracteriza por una pluviometría considerablemente menor que en las zonas vecinas, aumentando el efecto de un eventual período seco.

Con respecto al régimen térmico invernal, el invierno es riguroso y presenta entre diez y veinte días al año con heladas. En un mes al año la temperatura mínima absoluta alcanza -6 °C, constituyendo un régimen desfavorable a moderado. El régimen de humedad anual presenta abundantes precipitaciones, mayores a 1.900 mm, con altos excedentes para el consumo de la vegetación. El período seco puede alcanzar hasta dos meses de duración lo cual se considera un régimen favorable. El régimen de humedad estival se considera moderado, ya que presenta un balance hídrico estival desfavorable pero con adecuada humedad relativa del aire, mayor a 70% (Schlatter *et al.*, 1995).

El régimen térmico se caracteriza por una temperatura media anual de 12,2°C, con una máxima media del mes más cálido (enero) de 23,3°C y una mínima media del mes más frío (agosto) de 4,6°C (INIA, 1989).

Entre los meses de abril y agosto predominan los vientos norte y entre octubre y febrero los vientos oeste. Estos son generalmente los causantes de las precipitaciones, como también de daños a vegetales y construcciones (Huber, 1970).

Las condiciones climáticas que se presentan en la zona permiten un buen nivel de producción anual de *P. radiata*. Schlatter *et al.* (1995) determinaron que la calidad de sitio para esta especie en el predio Los Pinos variaba entre I y II, donde clase de sitio I corresponde a alturas mayores a 30 m y clase de sitio II a alturas que varían entre 24 y 30 m.

#### *Topografía y suelos.*

El predio se sitúa dentro de la unidad de relieve denominada Cordillera de la Costa, que topográficamente es una cadena de colinas baja y bastante disectada. El terreno se caracteriza por la presencia de colinas y lomajes cortados por quebradas que en algunos casos poseen fuertes pendientes que limitan su accesibilidad (IREN, 1978).

Según Schlatter *et al.* (1995), el predio se ubica en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa. En estos casos generalmente en elevaciones menores a 400 m s. n. m.

Las altitudes del predio varían entre 20 y 190 m s.n.m. El 78% de la superficie del predio está representada por pendientes entre 15 y 30%. Todos los cursos de agua recorren el predio principalmente en dirección norte y desembocan en el río Cayumapu, que avanza a un costado de la carretera T-205. La mayor parte de estos cursos de agua son de orden terciario y están asociados con áreas de protección (Salazar y Valenzuela, 1977).

La mayor parte de los suelos del predio corresponde a la serie Los Ulmos. Son suelos profundos, rojo arcillosos, originados a partir de sedimentos eólicos antiguos depositados sobre el complejo metamórfico de la costa, ubicados en la Cordillera de la Costa sobre los 15 m s.n.m. Una pequeña parte de la superficie del predio está representada por terrenos bajo los 12 – 14 m en donde se presenta la serie de suelos Valdivia (CIREN, 2001)

Los suelos de la serie Los Ulmos presentan una profundidad y características físicas adecuadas, si no se encuentran compactados o erosionados. Salazar y Valenzuela (1977) determinaron que la densidad aparente del suelo en el predio varía según la pendiente. Para suelos ubicados sobre pendientes moderadas (5-15%) la densidad aparente fluctúa entre 0,8 y 1,08 g·cm<sup>-3</sup>.

Para suelos sobre pendientes pronunciadas (15-30%) la densidad aparente varía entre 0,68 y 1,1 g·cm<sup>-3</sup> y para suelos sobre pendientes muy pronunciadas (30-45%) la densidad aparente varía entre 0,68 y 0,85 g·cm<sup>-3</sup>. Estos suelos son de textura franco arcillosa en la superficie y arcillosa en profundidad, muy bien estructurados (CIREN, 2001).

Las limitantes más frecuentes de estos suelos son una profundidad arraigable de gran variación y drenaje interno restringido en el subsuelo, frecuentemente con estructura cerrada. Baja a moderada capacidad de agua aprovechable, acidez y deficiencias de fósforo, potasio y boro. Nitrógeno y azufre también son limitados en terrenos erosionados. Presentan una alta susceptibilidad a la compactación, especialmente en fases poco profundas de alta pedregosidad (Schlatter *et al.*, 1995).

La mayor parte del predio pertenece a la clase de capacidad de uso VI (suelo forestal o praderas con limitaciones). Una menor proporción pertenece a la clase de uso VII (forestal con limitaciones). Los terrenos de clase de uso VIII (forestal de protección) son terrenos de protección con bosque nativo o quilantales y generalmente corresponden a laderas de quebradas (Salazar y Valenzuela, 1977).

Vera (1988) determinó que el índice de sitio para la serie de suelo Los Ulmos es de 28,1 m, obtenido a través de distintos rodales de *Pinus radiata* ubicados en la Provincia de Valdivia sobre esta serie de suelos.

Arntz *et al.*, (1969), caracterizaron un rodal promedio de *Pinus radiata* de 22 años (primera rotación) en el predio Los Pinos. Sus resultados indicaron DAP medio de 31 cm y altura media de 30,3 m. La cobertura era de 70% y el volumen 580 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>.

De acuerdo con los antecedentes generales del área de estudio, *Pinus radiata* encuentra condiciones favorables para su desarrollo, alcanzando buenos niveles de producción. Donoso (1993) señala que es una especie de gran plasticidad, ya que se puede desarrollar en una mayor cantidad de medioambientes diferentes. En Chile es capaz de sobrevivir entre los 31° latitud norte en una zona semidesértica en la costa, hasta los 41° latitud sur, en una zona de muy altas precipitaciones.

### 3.1.2 Rodales de estudio e historial de uso del suelo.

Los rodales en estudio corresponden a tres situaciones distintas (figura 1), las cuales son:

- 1) Rodal tratamiento: plantación de *Pinus radiata* (1982) establecida sobre un suelo compactado por *skidder*. Superficie del rodal: 8,74 ha. Clave CEFOR: 82001 Pr.
- 2) Rodal testigo: plantación de *P. radiata* (1980) establecida sobre un suelo compactado por tracción animal. Superficie del rodal: 2,56 ha. Clave CEFOR: 80001 Pr.
- 3) Bosque nativo: desarrollado sobre un suelo sin efecto de compactación, de bajo tránsito histórico y colindante con el rodal tratamiento.

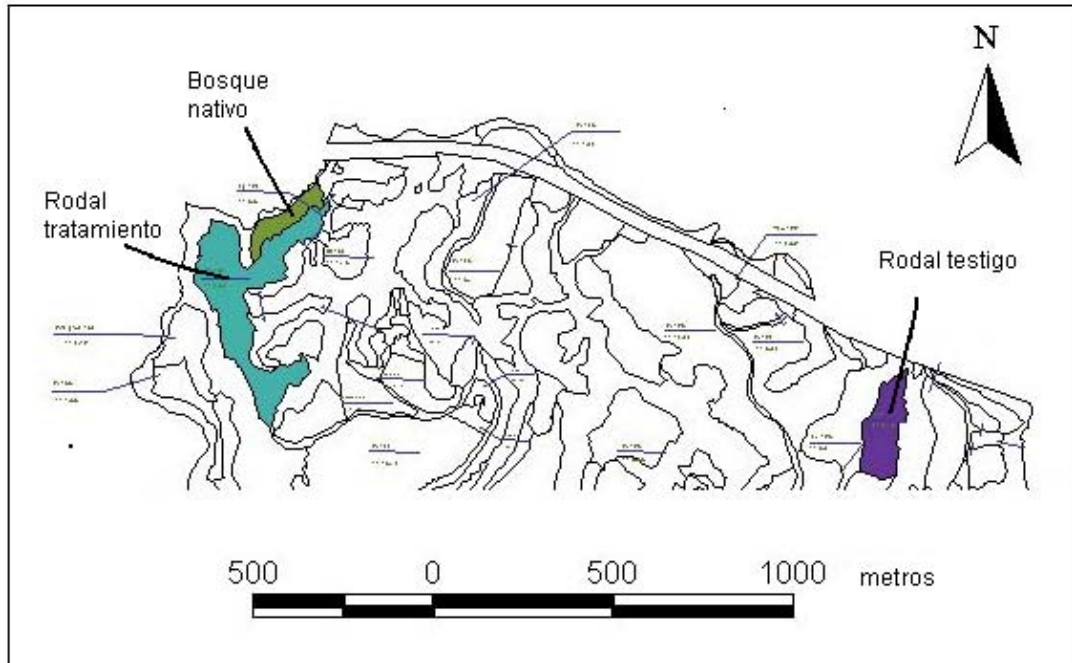


Figura 1: Rodales de estudio en el predio Los Pinos, Universidad Austral de Chile.

- *Características principales de los sistemas de cosecha.*

Con respecto a la historia del uso del suelo para los rodales en estudio, se puede mencionar que ambas plantaciones tienen una historia en común hasta 1980 aproximadamente, año en que se realizan las cosechas de estos rodales, pero de diferente manera.

El predio Los Pinos se caracterizó por un uso agrícola y ganadero hasta 1950-1956, a partir de ese período comienzan las primeras forestaciones con especies exóticas.

El rodal tratamiento fue cosechado durante el invierno de 1981 y fue reforestado en 1982. El subsistema de madereo fue realizado en forma mecanizada empleando un tractor forestal. Tractor articulado (*skidder*) marca *Caterpillar*, modelo 518. Diseño y fabricación CAT especialmente para arrastre pesado. Algunas especificaciones técnicas son:

- Motor diesel 4 tiempos *Caterpillar*.
- Peso total 6.000 kg.
- Tracción del cable del tractor: 14,5 t
- Largo total 5,7 m
- Ancho 2,5 m
- Esfuerzo al suelo: 4,0 – 4,5 kg·cm<sup>-2</sup>

Fuente: Finning Chile (2004).

En esta cosecha fue necesaria una planificación de vías de saca, las cuales fueron principales y secundarias. Las canchas de madereo tenían una superficie de 600 m<sup>2</sup> (20 x 30 m).

El rodal testigo fue cosechado durante el invierno de 1979 y fue reforestado en 1980. Su sistema de cosecha utilizó solamente bueyes para el madereo. El empleo de este tipo de tracción animal genera un esfuerzo al suelo de 3,5 – 4,0 kg·cm<sup>-2</sup>. Este esfuerzo es causado al suelo por un buey de madereo con un peso que varía de 700 a 800 kg, a partir de tres puntos de apoyo. Cada uno de estos puntos tiene una superficie de 60 cm<sup>2</sup> aproximadamente (Monroy, 1981).

Un subsistema de madereo de tracción animal consiste simplemente en que el animal recorra la menor distancia entre el lugar de volteo y la cancha de madereo o acopio, aprovechando caminos y senderos existentes. Las canchas de madereo del rodal testigo tenían una superficie de 300 m<sup>2</sup> (20 x 15 m).

- *Características de los bosques en los tres sitios.*

El rodal tratamiento se encuentra en una cumbre y parte de una ladera convexa con exposición noreste. Es una plantación de 22 años y su densidad actual es de 490 árboles por hectárea, los cuales fueron podados hasta una altura de 7 m. Son árboles más pequeños que los del rodal testigo y en promedio su altura no sobrepasa los 23 m (cuadro 1). El índice de sitio para este rodal es de 24,0 m y fue calculado utilizando los coeficientes obtenidos por García (1970) (Anexo 2). Los árboles en general tienen buenas características de forma y sanidad, aunque se aprecia una mayor heterogeneidad en cuanto a sus diámetros. El sotobosque está compuesto principalmente por regeneración de *Acacia dealbata* (aromo del país).

Cuadro 1: Tabla de rodal y existencias del rodal tratamiento.

| Clase DAP (cm) | Densidad (N·ha <sup>-1</sup> ) | Área basal (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) | Altura (m) | Volumen (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) |
|----------------|--------------------------------|--|------------|---|
| 18             | 10                             | 0,3  | 19,0       | 1,6   |
| 20             | 30                             | 1,0  | 20,2       | 5,9   |
| 22             | 50                             | 2,0  | 20,0       | 12,8  |
| 24             | 30                             | 1,5  | 20,6       | 10,0  |
| 26             | 70                             | 3,8  | 20,3       | 24,1  |
| 28             | 10                             | 0,6  | 21,5       | 4,4   |
| 30             | 70                             | 5,1  | 22,3       | 33,9  |
| 34             | 50                             | 4,6  | 23,0       | 33,4  |
| 36             | 40                             | 4,2  | 24,5       | 32,3  |
| 38             | 40                             | 4,6  | 25,3       | 36,5  |
| 40             | 40                             | 5,1  | 24,9       | 37,8  |
| 42             | 10                             | 1,4  | 24,5       | 10,5  |
| 44             | 20                             | 3,0  | 26,6       | 24,1  |
| 46             | 20                             | 3,3  | 27,4       | 28,6  |
| Total          | 490                            | 40,4   | 22,6       | 295,9                                       |

Donde N: número total de árboles.

Fuente: Inventario Precosecha 2004, CEFOR (inédito).

El rodal testigo se ubica en parte de una ladera convexa con una exposición norte. Es una plantación de 24 años y su densidad actual es 360 árboles por hectárea, los cuales han sido podados hasta una altura de 7 m. La altura promedio del rodal es de 30 m aproximadamente (cuadro 2). El índice de sitio para este rodal es de 27,2 m.

Los árboles tienen buenas características en cuanto a su forma (ausencia de grandes curvaturas y bifurcaciones) y aparentemente no han sido dañados severamente por algún agente biótico o abiótico. Su distribución espacial permite la formación de sotobosque, el cual es dominado por las especies *Aristotelia chilensis* (maqui) y *Ugni molinae* (murta).

Cuadro 2: Tabla de rodal y existencias del rodal testigo.

| Clase DAP (cm) | Densidad (N·ha <sup>-1</sup> ) | Área basal (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) | Altura (m) | Volumen (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) |
|----------------|--------------------------------|--|------------|---|
| 26             | 20                             | 1,1  | 30,0       | 10,6  |
| 28             | 40                             | 2,6  | 29,2       | 24,3  |
| 30             | 20                             | 1,4  | 29,6       | 14,5  |
| 32             | 40                             | 3,4  | 29,7       | 32,4  |
| 34             | 100                            | 9,1  | 29,6       | 88,4  |
| 36             | 20                             | 2,0  | 31,0       | 20,7  |
| 40             | 40                             | 5,2  | 30,4       | 50,6  |
| 42             | 40                             | 5,7  | 30,3       | 56,6  |
| 44             | 20                             | 3,2  | 31,0       | 31,6  |
| 56             | 20                             | 4,9  | 31,8       | 40,2  |
| Total          | 360                            | 38,6   | 30,0       | 370,0                                       |

Donde N: número total de árboles.

Fuente: Inventario Precosecha 2004, CEFOR (inédito).

El bosque nativo se encuentra sobre una ladera convexa de quebrada. Está constituido por *Nothofagus dombeyi* (coigüe), especie dominante y remanente del bosque nativo original. Es un bosque abierto, de baja densidad y constituido por coigües de grandes dimensiones, complementado con escasos ejemplares de *Eucryphia cordifolia* (ulmo) y *Aextoxicon punctatum* (olivillo) (cuadro 3). El sotobosque se caracteriza por la dominancia de *Chusquea quila* (quila) además de *Ugni molinae* (murta), *Fascicularia bicolor* (chupón), *Rhaphithamnus spinosus* (espino negro) y *Lapageria rosea* (copihue).

Los volúmenes de cada especie presentados en la tabla de rodal y existencias del bosque nativo fueron calculados con funciones de volumen específicas (Donoso *et al.*, 1984), las cuales se encuentran en el anexo 2. Se utilizaron los datos del suelo como referencia del suelo original para determinar el grado de compactación del suelo de los otros sitios.

Cuadro 3: Tabla de rodal y existencias del bosque nativo.

| Clase<br>DAP<br>(cm) | <i>Nothofagus dombeyi</i>         |   |               |  | <i>Eucryphia cordifolia</i>       |   |               |  | <i>Aextoxicon punctatum</i>       |   |               |  | Volumen<br>total<br>(m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) |
|----------------------|-----------------------------------|---|---------------|--|-----------------------------------|---|---------------|--|-----------------------------------|---|---------------|--|---|
|                      | Densidad<br>(N·ha <sup>-1</sup> ) | Área basal<br>(m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) | Altura<br>(m) | Volumen<br>(m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) | Densidad<br>(N·ha <sup>-1</sup> ) | Área basal<br>(m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) | Altura<br>(m) | Volumen<br>(m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) | Densidad<br>(N·ha <sup>-1</sup> ) | Área basal<br>(m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) | Altura<br>(m) | Volumen<br>(m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) |   |
| 20                   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 40                                | 1,3   | 17            | 7,8  | 20                                | 0,6   | 15            | 3,6  | 11,4  |
| 25                   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 60                                | 2,9   | 19            | 21,2   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 21,2  |
| 30                   | 20                                | 1,4   | 18            | 12,3   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 12,3  |
| 35                   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 20                                | 1,9   | 22            | 23,1   | 23,1  |
| 40                   | 20                                | 2,5   | 25            | 39,0   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 39,0  |
| 45                   | 40                                | 6,4   | 27            | 93,1   | 20                                | 3,2   | 23            | 85,2   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 178,3   |
| 50                   | 40                                | 7,9   | 27            | 114,9  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 114,9   |
| 55                   | 20                                | 4,8   | 30            | 56,7   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 56,7  |
| 60                   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0,0   |
| 65                   | 20                                | 6,6   | 28            | 103,1  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 20                                | 6,6   | 31            | 109,3  | 212,4   |
| 70                   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0,0   |
| 75                   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0,0   |
| 80                   | 20                                | 10,1  | 31            | 88,1   | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 0                                 | 0   | 0             | 0  | 88,1  |
| Total                | 180                               | 40  | 27            | 507  | 120                               | 7,4   | 20            | 114,2  | 60                                | 9   | 23            | 136  | 757,2   |

## 3.2 MÉTODO.

### 3.2.1 Simulación de los rodales de *Pinus radiata*.

Los rodales de *P. radiata* no eran directamente comparables debido a las diferencias de edad y densidad entre ellos. Para hacer una comparación se igualó su densidad considerando desde la clase de DAP 26 en adelante del rodal tratamiento. De esta manera ambos rodales quedaron con clases de DAP similares.

Se realizaron dos simulaciones: en la primera el rodal tratamiento se hizo crecer hasta la edad del rodal testigo (24 años) y en la segunda ambos rodales se proyectaron a la edad de 25 años.

Estas simulaciones fueron realizadas con el apoyo del proyecto “Modelo Nacional de Simulación de Árbol Individual para Pino radiata” de Fundación Chile y el simulador utilizado fue el *INSIGNE v.1.1\_3.12*.

Este programa es un modelo de árbol individual independiente de distancia, esto significa que no utiliza el distanciamiento entre árboles como variable predictora y por lo tanto no requiere de un mapa de localización de los individuos. Considera como variables de entrada el índice de sitio y la lista de árboles, que debe contener las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, razón de copa y factor de expansión de la parcela. A estas variables se agregan todas las variables que caracterizan los resultados de los manejos y calidad de las trozas. De esta manera el simulador proyecta los cambios anuales que se producen en las dimensiones de cada árbol (diámetro y altura y usualmente razón de copas) y su probabilidad de sobrevivencia.

No se realizó análisis estadístico (prueba de significancia) a la simulación debido a que se tiene un valor total por año para cada rodal, por lo que esta cantidad de datos es insuficiente para determinar si la diferencia en volumen es significativa.

### 3.2.2 Levantamiento de parcelas.

Se levantaron dos parcelas de 250 m<sup>2</sup> alrededor de una calicata del rodal testigo. En ellas se midieron las variables diámetro (cm) y altura (m), lo que generó los parámetros densidad (N·ha<sup>-1</sup>), área basal (m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>) y volumen (m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>). El objetivo fue compararlas con la tabla de rodal y existencias del CEFOR (cuadro 2) para ese rodal y determinar si la calicata está ubicada en el promedio de sitio del rodal o se trata de una situación particular que pudiera influir en los resultados.



En el caso del rodal tratamiento se utilizó los datos de la parcela (500 m<sup>2</sup>) más cercana a la calicata, proporcionados por CEFOR de su inventario de precosecha 2004. A partir de estas parcelas CEFOR generó tablas de rodal y existencias puntuales (cuatro en total) con las cuales obtuvo la tabla de rodal y existencias general (cuadro 1). El objetivo es el mismo que en la situación anterior.

### 3.2.3 Características del suelo.

En el área de estudio se confeccionaron cuatro calicatas, dos de las cuales fueron ubicadas en el rodal tratamiento, cuyos perfiles fueron utilizados para todos los análisis posteriores. Estas calicatas fueron ubicadas al azar dentro de los rodales y se obtuvieron cinco perfiles de estudio:

- Rodal tratamiento: tres perfiles (perfil 1, perfil opuesto al 1 y perfil 2)
- Rodal testigo: un perfil.
- Bosque nativo: un perfil.

La distancia entre las calicatas del rodal tratamiento sobrepasó los 50 m.

#### *Descripción morfológica.*

Se analizaron las principales características morfológicas del suelo en los tres sitios y se determinaron las variables: horizontes, espesor, límites, textura, estructura, consistencia, pedregosidad y color (Schlatter *et al.*, 2003).

#### *Determinaciones.*

Densidad aparente (DA): para esto se utilizaron 5 muestras de 100 cm<sup>3</sup> de suelo no disturbado por horizonte en cada calicata. Estas muestras fueron extraídas mediante cilindros a una profundidad relativa, dependiendo del espesor del horizonte. La densidad aparente se determinó en suelo seco a 105° C. Para este estudio se analizaron los horizontes AB y BA (cuyo rango de profundidad fluctúa en general entre los 10 y 40 cm) puesto que son los horizontes de mayor vulnerabilidad, tanto a la compactación como a la recuperación (Ellies, 1999).

Volumen de poros gruesos (poros de drenaje rápido y drenaje lento): se determinó utilizando 3 cilindros de 300 cm<sup>3</sup> de suelo por horizonte en cada calicata. Las muestras de suelo en sus cilindros fueron saturadas en bandejas de inmersión durante 5 días y llevadas luego a equilibrios en la tensión mátrica del agua del suelo mediante la cámara a presión durante otros 5 días. Se les aplicaron presiones de 0,06 y 330 bar permitiendo fraccionar el espacio poroso total en poros gruesos de drenaje rápido (>50 μm) y poros gruesos de drenaje lento (50-10 μm). En ambos casos se muestreó cuatro horizontes por calicata.

En una de las calicatas del rodal tratamiento se muestreó adicionalmente el lado opuesto al perfil principal, ya que se trataba de una situación particular en el suelo, donde hubo amasado y remoción, producto del tránsito del *skidder*. Se tomaron muestras a dos profundidades: 15 y 30 cm.

### 3.2.4 Resistencia a la penetración.

#### *Método del bastón de golpe.*

Durante el mes de enero de 2004 se realizó un estudio de resistencia a la penetración vertical a través de una serie de transectos en los rodales de *Pinus radiata* y en cada rodal se trazaron tres transectos al azar.

Cada uno de estos tiene una longitud que varía entre los 30 y 50 m, dependiendo del tamaño del rodal, y está dividido en puntos de medición cada 10 m. En cada punto de medición se contabilizó el número de golpes necesarios sobre un bastón graduado para que éste penetrara 10 cm de profundidad, hasta una profundidad total de 80 cm. No se diferenció entre huella y suelo compactado. De esta manera se midieron 14 puntos en el rodal tratamiento y 9 en el rodal testigo. Los golpes fueron ejecutados por una misma persona para asegurar cierta uniformidad en la intensidad del golpe.

No se realizó análisis estadístico a este método debido a que carece de estructura científica y depende mucho de la intensidad del golpe aplicado por la persona.

#### *Método del penetrómetro de bolsillo.*

Esta medición se efectuó durante los meses de julio y agosto, bajo el supuesto de que las precipitaciones habían declinado un poco su intensidad. En el perfil principal de cada calicata se establecieron tres columnas.

En cada una de ellas se realizaron mediciones cada 10 cm de profundidad, a partir de los 5 cm de profundidad, adecuándose a la disposición y espesor del horizonte. Se realizaron 7 mediciones en cada profundidad hasta los 0,65 m aproximadamente.

### 3.2.5 Evaluación de datos.

La morfología de los suelos fue comparada a través de métodos descriptivos. Los datos cuantitativos densidad aparente y resistencia a la penetración se analizaron estadísticamente, utilizando la comparación de medias y su varianza (ANOVA, 95% confianza). Adicionalmente se utilizó la prueba de Duncan (95% confianza) para evaluar la existencia de grupos homogéneos de acuerdo a sus valores medios (Ovalle, 2001).

## 4. RESULTADOS.

### 4.1 Resultados dasométricos.

#### 4.1.1 Comparación del volumen mediante la simulación de los rodales.

Al comparar las tablas de rodal y existencias del CEFOR (cuadros 1 y 2, páginas 13 y 14) se observa que el rodal testigo presenta un volumen actual de  $370 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (24 años) obteniéndose un incremento medio anual de  $15,42 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ . Por otra parte, el rodal tratamiento presenta un volumen actual de  $295,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (22 años) y un incremento medio anual de  $13,45 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

Los resultados de la simulación (cuadro 4) arrojaron que el rodal testigo mantiene esta superioridad frente al rodal tratamiento para una misma edad y densidad. En la primera simulación (24 años) se observa que, para el volumen total, el rodal testigo presenta un 11,4% más de volumen que el rodal tratamiento. En la segunda simulación (25 años) la superioridad en volumen del rodal testigo disminuye levemente a 10,1%. Sin embargo, en ambas simulaciones el rodal tratamiento es superior en área basal.

De acuerdo a los valores obtenidos de la simulación, existe una leve mortalidad en los rodales y es mayor en el rodal tratamiento.

Cuadro 4: Simulación de rodales de *P. radiata* proyectados a 24 y 25 años.

| Rodal       | Edad (años) | Densidad ( $\text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) | Área basal ( $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) | D.M.C. (cm) | Volumen ( $\text{m}^3 \text{ sc} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) | I.M.A. ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) |
|-------------|-------------|--|--|-------------|--|--|
| Testigo     | 24          | 360  | 37,8   | 36,6        | 374,8  | 15,6   |
| Tratamiento | 24          | 355  | 39,2   | 37,5        | 336,4  | 14,0   |
| Testigo     | 25          | 357  | 39,4   | 37,5        | 407,5  | 16,3   |
| Tratamiento | 25          | 352  | 41,3   | 38,6        | 370,2  | 14,8   |

Donde D.M.C.= Diámetro medio cuadrático e I.M.A.= incremento medio anual.

#### 4.1.2 Comparación de tablas de rodal y existencias.

Para el rodal tratamiento la comparación de ambas tablas de rodal y existencias presentó una gran diferencia en cuanto a densidad (cuadro 5), sin embargo los valores de área basal y volumen son muy similares, situación que indica que la calicata fue ubicada en un área representativa del rodal.

Cuadro 5: Resumen de tablas de rodal y existencias general y puntual por rodal.

| Tipo        | Rodal       | Densidad ( $\text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) | Altura (m) | Área basal ( $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) | Volumen ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) |
|-------------|-------------|--|------------|--|---|
| General     | tratamiento | 490  | 22,6       | 40,4   | 295,9   |
| Puntual (*) | tratamiento | 360  | 23,4       | 40,2   | 294,0   |
| General     | testigo     | 360  | 30,0       | 38,6   | 370,0   |
| Puntual (*) | testigo     | 340  | 30,6       | 33,3   | 318,9   |

(\*): Obtenida de las parcelas más cercanas a las calicatas.

En el caso del rodal testigo la tabla de rodal y existencias puntual presentó una diferencia en cuanto al área basal y volumen por hectárea con respecto a la general (13,8% menos). Esta diferencia se explica, en gran medida, porque el suelo de ese sector (donde fue ubicada la calicata) es más delgado, donde los horizontes A y B son menos profundos y aflora roca metamórfica a los 0,95 m. Topográficamente la calicata está ubicada en una ladera convexa de fuerte pendiente (> 35%).

#### 4.2 Caracterización de los suelos de los rodales de estudio.

- *Descripción morfológica.*

Los perfiles de suelo del rodal tratamiento presentan características muy similares, aunque en el perfil 2 se aprecia una mayor profundidad en los horizontes AB y BA. En este perfil se observó una delimitación ondulada pero clara a los 26 cm, demostrando que el suelo superior fue removido por el movimiento durante las faenas de cosecha. El subsuelo en cambio sólo fue presionado. Con respecto a la estructura en los dos primeros horizontes, ésta corresponde a la esperada en suelos superiores francos a arcillosos (cuadro 6).

Cuadro 6: Características morfológicas de los perfiles de suelo.

|                      | Horizonte | Prof. (cm) | Límites          | Estructura                  | Textura                 | Consistencia  |
|----------------------|-----------|------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|
| Tratamiento perfil 1 | A         | 0-10       | Ondulado         | Subpoliédrica mediana       | Franco arcillosa limosa | Friable-firme |
|                      | AB        | 10-20      | Ondulado         | Subpoliédrica               | Franco arcillosa limosa | Friable-firme |
|                      | B1        | 20-36      | Claro – gradual  | Masiva a subpoliédrica fina | Arcilla limosa          | Friable-firme |
|                      | B2        | 36-65      | Difuso           | Masiva                      | Arcilla                 | Friable       |
|                      |           | 65-100+    | -                | Masiva                      | Arcilla                 | Friable       |
| Tratamiento perfil 2 | A         | 0-9        | Ondulado         | Subpoliédrica mediana       | Franco arcillosa limosa | Friable-firme |
|                      | AB        | 9-26       | Ondulado         | Subpoliédrica               | Franco arcillosa limosa | Friable-firme |
|                      | BA        | 26-45      | Ondulado         | Masiva a subpoliédrica fina | Arcilla limosa          | Friable       |
|                      | B1        | 45-60      | Difuso           | Masiva                      | Arcilla                 | Friable       |
|                      | B2        | 60-100+    | -                | Masiva                      | Arcilla                 | Friable       |
| Testigo              | A         | 0-12       | Claro-ondulado   | Granular a subpoliédrica    | Franco arcillosa limosa | Friable       |
|                      | AB        | 12-18      | Gradual          | Subpoliédrica fina          | Franco arcillosa limosa | Friable       |
|                      | BA        | 18-40      | Gradual          | Masiva a subpoliédrica      | Arcillosa limosa        | Friable       |
|                      | B         | 40-80      | Claro            | Masiva                      | Arcillosa limosa        | Friable       |
|                      | B2C       | 80-95      | Ondulado         | Masiva                      | Arcilla limosa arenosa  | Friable-firme |
|                      | 2C        | 95-100+    | -                | Masiva                      |                         | Friable-firme |
| Bosque nativo        | A         | 0-10       | Gradual-ondulado | Grumosa-granular            | Franco arcillosa limosa | Muy friable   |
|                      | AB        | 10-18      | Gradual-ondulado | Granular                    | Franco arcillosa limosa | Friable       |
|                      | BA        | 18-40      | Difuso           | Subpoliédrica fina          | Arcilla limosa          | Friable       |
|                      | B1        | 40-70      | Difuso           | Masiva                      | Arcilla                 | Friable       |
|                      | B2        | 70-100+    | -                | Masiva                      | Arcilla                 | Friable       |

La estructura subpoliédrica de este suelo (rodal tratamiento) se debe a las fuerzas que actuaron sobre éste: amasamiento y remoción, con un engrosamiento de los agregados o su destrucción, dejando evidencia del tránsito de maquinaria soportado durante la cosecha anterior a su establecimiento.

En el caso del rodal testigo se identificaron seis horizontes en este perfil de suelo. La profundidad de estos es similar con los del perfil 1 del rodal tratamiento y es el único que presentó un horizonte tipo C, posiblemente por su ubicación en el relieve como se señaló anteriormente (ladera convexa de pendiente pronunciada).

La estructura de los dos primeros horizontes indica que el suelo fue sometido a un esfuerzo menor que en los perfiles del rodal tratamiento ya que aún conserva, en parte, una estructura granular típica de horizonte A en suelos franco arcillosos a arcillosos.

El perfil de suelo del bosque nativo es similar al del rodal tratamiento, debido a que es colindante con éste. Sin embargo la gran diferencia de este suelo, con respecto a los dos sitios anteriores, es su estructura grumosa en los dos primeros horizontes. Este tipo de estructura está relacionada con horizontes biológicamente activos (horizontes A) que son frecuentes en los bosques nativos. Esto indica que este suelo no ha sido compactado o ha tenido un bajo tránsito histórico.

- *Densidad aparente por sitio para horizontes AB y BA.*

En el horizonte AB, a 15 cm de profundidad, la mayor densidad aparente se registró en el rodal tratamiento en sus perfiles 1 y opuesto. Estos valores fueron 0,93 y 0,90  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  respectivamente. El perfil 2 del mismo rodal presentó un valor de 0,79  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  siendo inferior con respecto al perfil testigo cuyo valor fue 0,83  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y superior comparado con el perfil de bosque nativo (0,69  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). En general, para el horizonte AB los valores no superaron 1,0  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , indicando que esta característica fue muy afectada en este horizonte. Los valores obtenidos indican que el suelo del rodal testigo soportó una menor fuerza de compactación (figura 2).

En el horizonte BA, a 25 cm de profundidad, el suelo del rodal tratamiento presentó los mayores valores de densidad aparente en todos sus perfiles. Estos valores corresponden a 1,0  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en el perfil 1 (siendo el máximo valor de todo el estudio), 0,97  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en el perfil opuesto y 0,95  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en el perfil 2. En ambos horizontes el perfil de suelo 1 del rodal tratamiento presentó los mayores valores, siendo el más afectado e indicando claramente un mayor estado de compactación. Para los dos horizontes el suelo del bosque nativo presentó los valores más bajos de densidad aparente por su condición de suelo original o de muy bajo tránsito histórico. En general la densidad aparente aumenta con la profundidad del suelo en todos los perfiles.

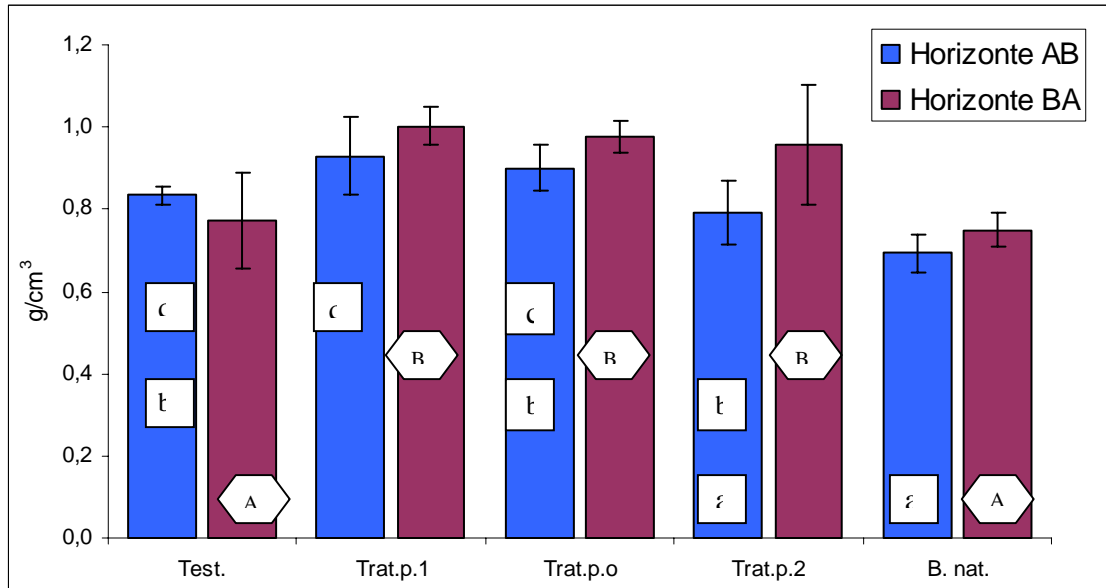


Figura 2: Densidad aparente y grupos homogéneos en los rodales de estudio. Las letras indican grupos homogéneos. Test: rodal testigo. Trat. p.1: Rodal tratamiento perfil 1. Trat. p.o: Rodal tratamiento perfil opuesto al 1. Trat. p.2: Rodal tratamiento perfil 2. B. Nat: bosque nativo.

La prueba ANOVA, de un factor, comprobó que la diferencia de densidad aparente entre los cinco perfiles de suelo, al ser comparados a una misma profundidad, es significativa (95% de nivel de confianza). En el horizonte AB ( $P = 0,009$ ) y en el horizonte BA ( $P = 0,014$ ). Esto se traduce en que el suelo del rodal tratamiento es distinto al suelo del rodal testigo y al suelo del bosque nativo debido a un mayor estado de compactación. Para los otros dos horizontes A (5 cm de profundidad) y B (45 cm de profundidad) la diferencia también fue significativa entre los cinco perfiles de suelo comparados a una misma profundidad, obteniéndose valores de probabilidad de 0,015 y 0,019 respectivamente.

La prueba de Duncan determinó que en el horizonte AB se produce una formación de grupos homogéneos que dan cuenta de que el suelo superficial se encuentra en una condición alterada, producto de la remoción, relleno y amasado. Esto hace, por ejemplo, que el suelo del bosque nativo tenga el mismo grado de compactación que el suelo transitado por *skidder* (grupo identificado con la letra a). Sin embargo, en el horizonte BA, se formaron dos grupos claramente diferenciados por su densidad aparente, indicando que el suelo del rodal testigo soportó una menor fuerza que el suelo del rodal tratamiento y/o presenta un grado de recuperación que lo asemeja a la condición del suelo del bosque nativo (grupos identificados con las letras A y B).

Al analizar la densidad aparente entre profundidades de un mismo perfil de suelo, se obtiene una diferencia significativa ( $P = 0,001$ ) sólo en el perfil del bosque nativo (cuadro 7).

Cuadro 7: Grupos homogéneos de densidad aparente entre profundidades en el perfil de suelo del bosque nativo.

| Profundidad (cm) | Media  | Desviación estándar | Grupos homogéneos |   |
|------------------|--------|---------------------|-------------------|---|
| 5                | 0,5433 | 0,0404              | A                 |   |
| 15               | 0,6933 | 0,0472              |                   | B |
| 25               | 0,7500 | 0,0400              |                   | B |
| 45               | 0,7733 | 0,0404              |                   | B |

Esta situación ocurre frecuentemente en suelos de bosque nativo. En terreno, durante la toma de muestras, se apreció visualmente que contiene una mayor cantidad de materia orgánica. La actividad biológica suelta la estructura del suelo en el horizonte superficial dejándolo con una menor densidad aparente.

- *Volumen de poros gruesos en los horizontes AB y BA.*

El rodal testigo y el bosque nativo son los que presentaron un mayor volumen de poros gruesos de drenaje rápido para el horizonte AB. Sin embargo la diferencia con el rodal tratamiento es solamente considerable en el caso del perfil de suelo 1 que presentó un volumen de poros de drenaje rápido inferior al 20%. Esto se explica porque es un horizonte superior donde existe un nivel de actividad biológica que remueve el suelo permitiendo su recuperación (figura 3).

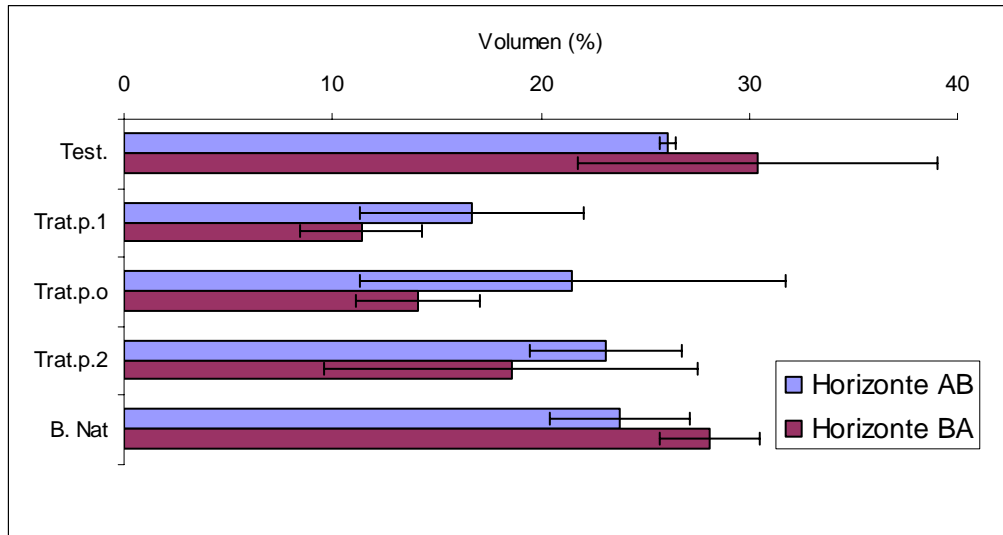


Figura 3: Volumen de poros gruesos de drenaje rápido. Test: rodal testigo. Trat. p.1: Rodal tratamiento perfil 1. Trat. p.o: Rodal tratamiento perfil opuesto al 1. Trat. p.2: Rodal tratamiento perfil 2. B. Nat: bosque nativo.

En el horizonte BA la diferencia en el volumen de poros es mucho más marcada. Esto se debe a que es un horizonte más profundo donde el proceso de recuperación es más limitado. El rodal testigo y el bosque nativo presentaron un mayor volumen porque tuvieron un menor efecto de compactación, por el menor tránsito y/o el menor peso soportado.

- *Volumen de poros gruesos para todos los horizontes.*

En todos los perfiles se observa una tendencia hacia una disminución del volumen de poros gruesos de drenaje rápido a medida que aumentó la profundidad. Los suelos del rodal testigo y del bosque nativo presentaron los mayores volúmenes, reflejando un estado menos afectado por tránsito. Sin embargo, el volumen de poros gruesos de drenaje rápido en el suelo del rodal testigo es muy superior con respecto a los demás suelos, especialmente en el horizonte A (5 cm), donde alcanzó el más alto valor (35,7%) de los cuatro perfiles de suelo (figura 4).

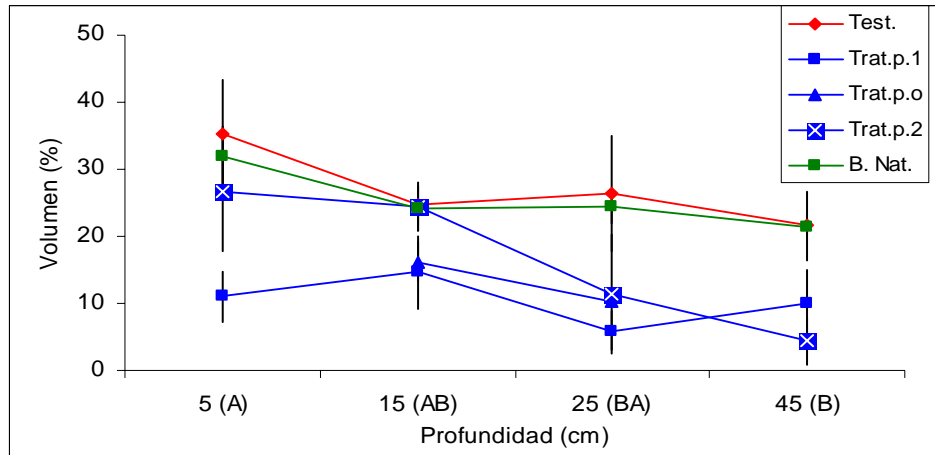


Figura 4: Volumen de poros gruesos de drenaje rápido por horizonte. Test: rodal testigo. Trat. p.1: Rodal tratamiento perfil 1. Trat. p.o: Rodal tratamiento perfil opuesto al 1. Trat. p.2: Rodal tratamiento perfil 2. B. Nat: bosque nativo. ( ) Indica horizonte.

El suelo del rodal tratamiento, en el perfil 1, presentó los valores de volumen más bajos de todo el estudio. Esto se debe a que tiene un mayor grado de compactación por estar muy cerca de una huella de *skidder* y en un lugar donde hubo mayor intensidad de tránsito. En el perfil 2 registró valores muy cercanos a los del bosque nativo en los dos primeros horizontes por tratarse de suelo removido. En profundidad disminuyó en forma considerable como efecto proyectado del peso del *skidder*.

Cabe señalar que los valores obtenidos a través del análisis de laboratorio son considerados como altos para un suelo rojo arcilloso (25-35%). Debido a esto no se aplicó análisis estadístico para establecer diferencias significativas y se presentaron los valores tal como fueron entregados por el laboratorio.

Con respecto al volumen de poros gruesos de drenaje lento, éste fue mayor a medida que aumentó la profundidad. Estos poros fueron mucho menores en volumen que los poros gruesos de drenaje rápido. El mayor volumen lo registró el suelo del rodal testigo, en cambio los suelos del rodal tratamiento y del bosque nativo presentaron valores muy similares excepto en el último horizonte (figura 5).



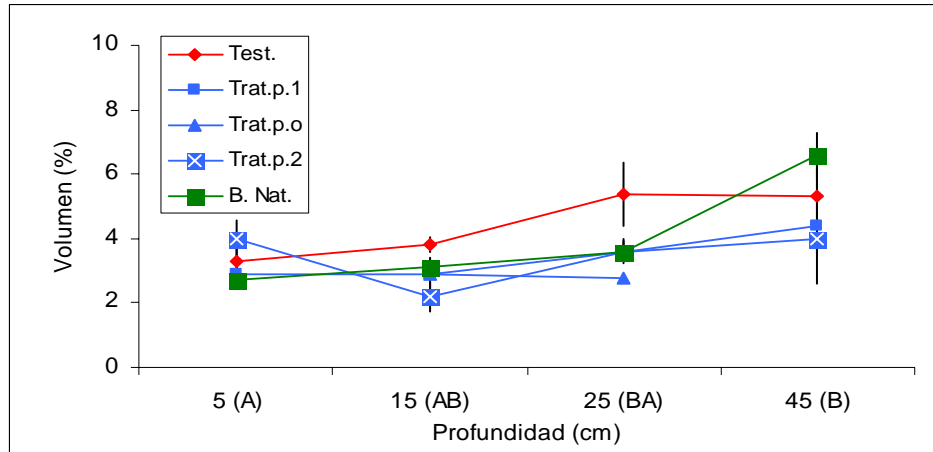


Figura 5: Volumen de poros gruesos de drenaje lento por horizonte. Test: rodal testigo. Trat. p.1: Rodal tratamiento perfil 1. Trat. p.o: Rodal tratamiento perfil opuesto al 1. Trat. p.2: Rodal tratamiento perfil 2. B. Nat: bosque nativo. ( ): Indica horizonte.

La remoción del suelo superior explica la mayor porosidad gruesa en los suelos transitados, disminuyendo en profundidad los poros más gruesos y aumentando los más finos.

Estos valores se encuentran dentro de los rangos esperados, los cuales no superan el 10%. No obstante, tampoco se le aplicó análisis estadístico puesto que en conjunto con los poros gruesos de drenaje rápido constituyen la porosidad gruesa de un suelo y no tendría sentido analizar una sola parte de dicho conjunto.

### 4.3 Resistencia a la penetración.

#### 4.3.1 Método del bastón de golpe.

Este método entregó un indicio del estado de compactación del suelo en los rodales de *Pinus radiata*. El suelo del rodal testigo presentó el menor número de golpes promedio y la menor desviación estándar hasta alcanzar los 80 cm de profundidad. El rodal tratamiento superó casi en 50% al rodal testigo en esta variable (figura 6).

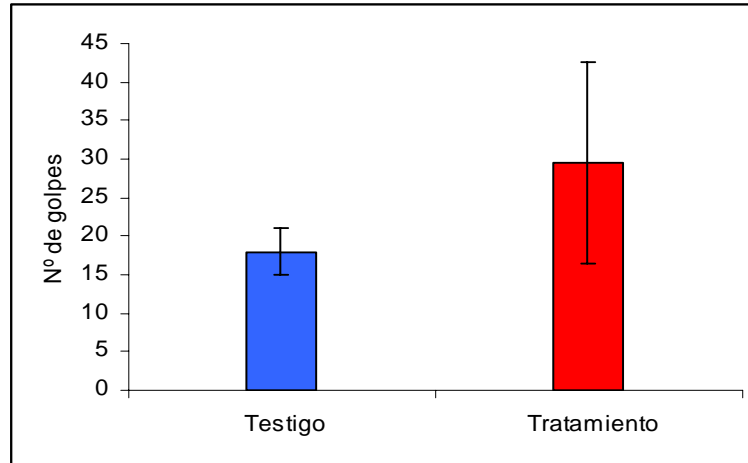


Figura 6: Promedio del número de golpes totales en los rodales de *Pinus radiata*.

El suelo del rodal tratamiento resultó con el mayor número de golpes promedio debido a su estado de compactación. Presentó la mayor desviación estándar, ya que en este rodal se presentaron zonas con distinto grado de compactación.

En la resistencia a la penetración vertical a distintas profundidades el suelo del rodal tratamiento presentó los mayores valores en número de golpes en todas las profundidades. Una mayor resistencia se registró desde los 30 cm en adelante indicando que este suelo presenta un mayor estado de compactación (figura 7).

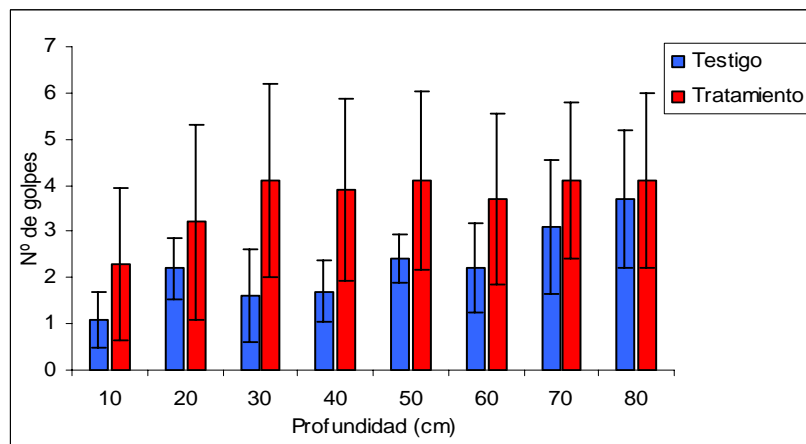


Figura 7: Número de golpes promedio en los rodales de *P. radiata* a distinta profundidad.

#### 4.3.2 Método del penetrómetro.

En el perfil de suelo 1 del rodal tratamiento se observa que las máximas resistencias a la penetración se produjeron en las profundidades de 15 y 25 cm (figura 8).

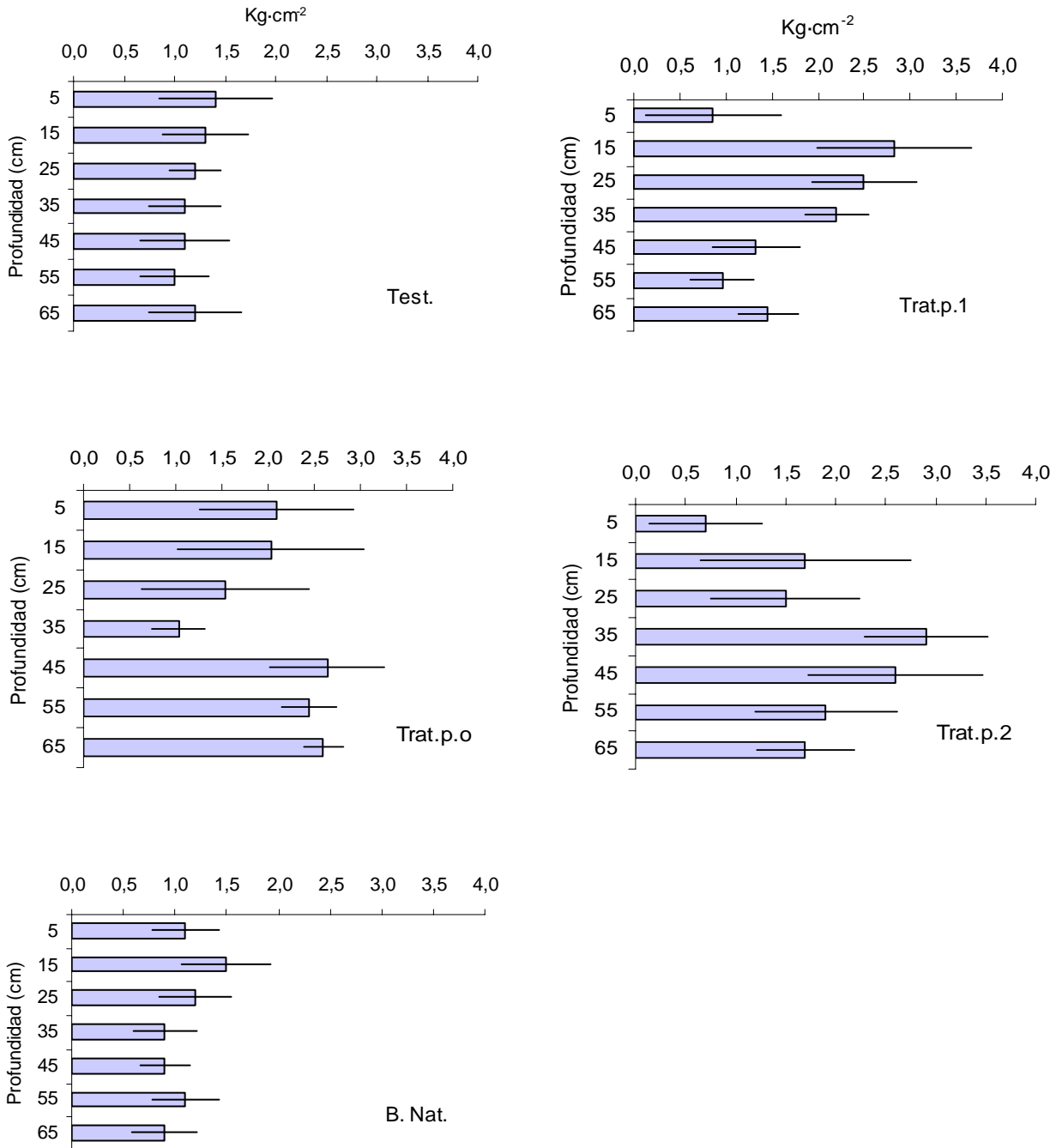


Figura 8: Resistencia promedio a la penetración por rodal. Test: rodal testigo. Trat. p.1: Rodal tratamiento perfil 1. Trat. p.o: Rodal tratamiento perfil opuesto al 1. Trat. p.2: Rodal tratamiento perfil 2. B. Nat: bosque nativo.

Estas profundidades corresponden a los horizontes AB y BA. Más en profundidad esta resistencia disminuyó gradualmente hasta los 65 cm donde aumentó en forma leve

En el perfil de suelo opuesto al 1 del rodal tratamiento, la resistencia a la penetración fue en general alta y el comportamiento de esta resistencia fue particular, debido a que comienza alta en las profundidades superiores, disminuyó en las profundidades medias y aumentó nuevamente en las profundidades inferiores. Esto se explica porque hasta los 35 cm el suelo fue un material de relleno, producto de la remoción durante la cosecha. Destaca la alta resistencia del suelo debajo del relleno y acusa el efecto del tránsito del *skidder* hasta los 65 cm.

En el perfil de suelo 2 del mismo rodal se observa que este suelo presentó dos situaciones de resistencia a la penetración. La primera ocurrió para los horizontes superiores hasta 25 cm de profundidad cuyos valores indicaron una baja resistencia a la penetración producto de que corresponden a material removido. En los horizontes más profundos esta resistencia es alta dados los valores que se registraron.

En el perfil de suelo del rodal testigo la resistencia a la penetración no superó los  $1,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Se observa una disminución gradual muy leve a medida que aumenta la profundidad pero que no varió más de  $0,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Estos valores de penetrometría indican que el suelo es capaz de recuperarse de la compactación producida por los bueyes de madereo, y cuya duración es menor que la producida por un *skidder*.

El perfil de suelo del bosque nativo representa las condiciones del suelo casi original por tener un bajo tránsito histórico. Los valores de penetrometría son muy similares a los del perfil de suelo del rodal tratamiento aunque en este caso no se observa ningún tipo de tendencia en la resistencia a la penetración. El horizonte A (5 cm) presentó una resistencia más baja que el horizonte AB (15 cm), causada por una mayor actividad biológica.

Al comparar una misma profundidad entre los cinco perfiles de suelo, la diferencia resultó significativa ( $P = 0,000$ ). Esta diferencia fue significativa en las cuatro profundidades analizadas (5, 15, 25 y 45 cm). La otra comparación fue realizada entre las profundidades de una misma calicata, en este caso arrojaron diferencia significativa ( $P = 0,000$ ) los perfiles de suelo del rodal tratamiento y el bosque nativo. Esto se aprecia en la figura 7, donde los perfiles 1 y 2 del rodal tratamiento tienen una mezcla de material removido y suelo compactado (peso proyectado del *skidder*) y el bosque nativo tiene un horizonte superficial biológicamente activo.

La prueba de Duncan diferenció tres grupos en los horizontes superficiales (5 y 15 cm) y dos en los horizontes más profundos (25 y 45 cm) (cuadro 8).

Cuadro 8: Grupos homogéneos de resistencia a la penetración entre perfiles de suelo.

| Perfil    | Profundidad (cm) | Media | Desviación estándar | Grupos homogéneos |   |   |
|-----------|------------------|-------|---------------------|-------------------|---|---|
| Testigo   | 5                | 1,45  | 0,62                |                   | B |   |
| Trat.p.1  | 5                | 0,86  | 0,75                | A                 |   |   |
| Trat.p.o  | 5                | 2,10  | 0,83                |                   |   | C |
| Trat.p2   | 5                | 0,73  | 0,62                | A                 |   |   |
| B. Nativo | 5                | 1,03  | 0,33                | A                 |   |   |
| Testigo   | 15               | 1,30  | 0,40                | A                 |   |   |
| Trat.p.1  | 15               | 2,84  | 0,95                |                   |   | C |
| Trat.p.o  | 15               | 2,02  | 1,10                |                   | B |   |
| Trat.p2   | 15               | 1,67  | 1,20                | A                 | B |   |
| B. Nativo | 15               | 1,42  | 0,53                | A                 | B |   |
| Testigo   | 25               | 1,16  | 0,26                | A                 |   |   |
| Trat.p.1  | 25               | 2,74  | 0,82                |                   | B |   |
| Trat.p.o  | 25               | 1,54  | 0,91                | A                 |   |   |
| Trat.p2   | 25               | 1,46  | 0,87                | A                 |   |   |
| B. Nativo | 25               | 1,16  | 0,33                | A                 |   |   |
| Testigo   | 45               | 1,14  | 0,47                | A                 |   |   |
| Trat.p.1  | 45               | 1,30  | 0,46                | A                 |   |   |
| Trat.p.o  | 45               | 2,64  | 0,62                |                   | B |   |
| Trat.p2   | 45               | 2,63  | 0,86                |                   | B |   |
| B. Nativo | 45               | 0,87  | 0,26                | A                 |   |   |

Esta agrupación no era la esperada debido a que no se establece una diferencia entre el suelo del bosque nativo y el suelo compactado de las plantaciones. El análisis entre profundidades de un mismo perfil de suelo entrega un resultado de acuerdo a su estado de compactación. Sólo se muestran los perfiles que arrojaron diferencia significativa con ANOVA (cuadro 9).

Cuadro 9: Grupos homogéneos de resistencia a la penetración entre profundidades.

| Perfil   | Profundidad (cm) | Media | Desviación estándar | Grupos homogéneos |   |   |
|----------|------------------|-------|---------------------|-------------------|---|---|
| Trat.p.1 | 5                | 0,86  | 0,75                | A                 |   |   |
| Trat.p.1 | 15               | 2,84  | 0,95                |                   | B |   |
| Trat.p.1 | 25               | 2,74  | 0,82                |                   | B |   |
| Trat.p.1 | 45               | 1,30  | 0,46                | A                 |   |   |
| Trat.p.2 | 5                | 0,73  | 0,62                | A                 |   |   |
| Trat.p.2 | 15               | 1,67  | 1,20                |                   | B |   |
| Trat.p.2 | 25               | 1,46  | 0,87                |                   | B |   |
| Trat.p.2 | 45               | 2,63  | 0,86                |                   |   | C |
| B. Nat.  | 5                | 1,03  | 0,33                | A                 | B |   |
| B. Nat   | 15               | 1,42  | 0,53                |                   |   | C |
| B. Nat   | 25               | 1,16  | 0,33                |                   | B |   |
| B. Nat   | 45               | 0,87  | 0,26                | A                 |   |   |

En el perfil de suelo 1 del rodal tratamiento, el análisis distinguió dos grupos dejando los horizontes extremos en uno. Esto se debe a la composición de este perfil, suelo removido en la parte superficial (menor resistencia a la penetración) y suelo compactado más en profundidad. Se aprecia que el efecto de la compactación no alcanzó al horizonte más profundo, asemejándolo en valor con el primer horizonte.

En el perfil de suelo 2 del mismo rodal, el análisis distinguió tres grupos los cuales se formaron de acuerdo su estado de compactación, cuyo efecto en este caso fue proyectado hacia los horizontes más profundos, siendo más resistentes a la penetración que los horizontes superficiales.

En el perfil de suelo del bosque nativo también se distinguieron tres grupos, los cuales se forman por factores que inciden en la resistencia a la penetración tales como la cantidad de materia orgánica superficial y mezclada en profundidad, por el nivel de actividad biológica, por la estructura y el contenido de humedad.

## 5. DISCUSIÓN.

Las plantaciones utilizadas en este estudio demostraron un rendimiento menor al de la primera rotación, con índices de sitio de 27 m en el rodal testigo y 24 m en el rodal tratamiento, en comparación a los 28-29 m medidos en la primera rotación. También el rendimiento volumétrico fue menor con  $15,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  en el rodal testigo y  $13,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  en el rodal tratamiento, comparados con los  $26,3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  medidos en la primera rotación. Esto indica que hubo una pérdida de rendimiento que puede ser resultado de la compactación producida por *skidder* y bueyes de madereo, así como también puede haber influido la calidad de las plantas para establecer la plantación en segunda rotación y del manejo posterior del bosque antes del cierre de copas.

El volumen de producción simulado de los rodales de *Pinus radiata* alcanzó una diferencia que varió entre 10 y 11%. Sin embargo las tablas de rodal que fueron simuladas pudieron haber sido influenciadas por un efecto de ubicación de parcelas, tal como ocurrió en el rodal testigo que entregó un 13,8% menos de volumen que la tabla general de la plantación del sector lo cual podría estar subestimando el volumen proyectado para este rodal. Estas diferencias se producen por un efecto puntual del suelo y topografía, ya que la parcela del rodal testigo fue levantada en un sector que fue de menor crecimiento, donde los suelos son menos profundos (80-100 cm) comparados con suelos mayores a 100 cm en los otros sitios. El volumen de suelo es uno de los factores que define la fertilidad, de allí que sea una característica muy importante para determinar la capacidad de uso del suelo y el potencial productivo que éste presenta (Schlatter *et al.*, 2003).

Al considerar la diferencia simulada de 10-11% y la subestimación del rodal testigo de 13,8% con respecto a la plantación en general, entonces podría proyectarse el efecto real de la pérdida de producción por compactación entre 10 y 25% del volumen de producción. Esta pérdida en la producción sería significativa y deberá ser considerada en las proyecciones de las plantaciones de segunda y tercera rotación.

La diferencia de volumen detectada en la simulación de los rodales de *P. radiata* fue probablemente disminuida debido a que el daño en el suelo por madereo depende de la superficie cosechada, producto de las vías principales, secundarias y canchas de carguío. Monrroy (1981) determinó que el rodal tratamiento fue alterado en más de un 50% producto de un madereo no planificado. Gayoso e Iroumé (1993) señalan que para una condición de madereo con *skidder* en temporada de invierno, las vías de saca ocupan hasta el 40% de la superficie total. Caminos y canchas cubren un 13% adicional. De acuerdo a esto se estima que el resto de la plantación (50% aproximadamente) sobre superficie no alterada crece en condiciones normales, aumentando el volumen y enmascarando el real efecto de la compactación.

El efecto de la compactación también se manifestó a través de una disminución del índice de sitio, ya que Vera (1988) determinó un valor de 28,1 m para la serie de suelos Los Ulmos y Schlatter *et al.* (1995) determinaron un valor para el predio Los Pinos que variaba entre > 30 m y 24- 30 m. Tomando en consideración estos valores se generaría un índice de sitio promedio de 29 m, por lo tanto el rodal testigo presenta una disminución de 6,1% (IS = 27,2 m) y el rodal sobre suelo compactado una disminución de 17,1% (IS = 24,0 m), manifestando el efecto del madereo con tracción animal en el rodal testigo y con maquinaria forestal en el rodal tratamiento.

Los rodales de *P. radiata* no alcanzaron los niveles de productividad esperados para el potencial del sitio. Es muy importante señalar que se trata de plantaciones de 1980–1982 y en aquellos años las plantas eran producidas generalmente con semilla sin mejoramiento genético y manejo menos intensivo en vivero, como poda de raíces por ejemplo. Ambos rodales se establecieron con el mismo tipo de planta lo que, sumado al estado de alteración del suelo produjo una pérdida en el crecimiento.

La morfología del suelo muestra claramente que el suelo transitado fue alterado, lo que es ratificado por la estructura y consistencia. De acuerdo con Schlatter *et al.* (2003) la estructura subpoliédrica de los suelos compactados (horizontes superficiales) es típica de suelos que han sido sometidos a fuerzas segregantes, mientras que la estructura grumosa a granular del suelo de bosque nativo es típica de horizontes A biológicamente activos. Esta alteración fue medida a través de las características y propiedades físicas: densidad aparente, volumen de poros gruesos (drenaje rápido y lento) y resistencia a la penetración.

La densidad aparente de los suelos en el predio Los Pinos fue medida antes de la cosecha (Salazar y Valenzuela, 1977). De acuerdo con esto el sector del rodal testigo y el bosque nativo tenían valores promedio de 0,68 y 0,72 g·cm<sup>-3</sup> para los horizontes AB y BA, mientras que el sector del rodal tratamiento en su perfil 1 presentó antes de la cosecha un valor de 0,95 g·cm<sup>-3</sup> para ambos horizontes y en el perfil 2 un valor de 0,68 y 0,76 g·cm<sup>-3</sup>. Comparándolos con los valores actuales, a más de 24 años desde la cosecha, los suelos que presentaron un aumento en la densidad aparente fueron el del rodal testigo (25% más en el horizonte AB) y el rodal tratamiento en su perfil 2 (16 y 25% más en los horizontes AB y BA). De acuerdo a los análisis estadísticos el horizonte BA acusó más claro el efecto de la compactación en esta variable. Esto se explica porque el efecto compactador de la tracción animal se proyecta mucho menos en profundidad que el de un *skidder*, el cual alcanza efectos más profundos. La escasa variación superficial del rodal tratamiento en el perfil 2 se explica por el suelo removido durante la cosecha, pero en el horizonte B superó los 1,0 g·cm<sup>-3</sup>.



El volumen de poros gruesos fue particularmente alto para un suelo rojo arcilloso. Ellies (1999) señala que el volumen de poros gruesos de drenaje rápido fluctúa entre 15-10% en suelos rojo arcillosos poco alterados y 8-10% en suelos compactados. De igual forma Hädrich (1976) citado por Schlatter *et al.* (1995) señala que el volumen de poros gruesos para un suelo rojo arcilloso varía entre 13-19% (este porcentaje también incluye el volumen de poros medios). Sin embargo, para la situación particular del predio, Salazar y Valenzuela (1977) determinaron que el volumen de poros gruesos en el predio Los Pinos variaba entre 25 y 35% para los horizontes AB y BA. De la misma manera, Monrroy (1981) indica que el volumen de poros gruesos de drenaje rápido, en el predio Los Pinos, es alto alcanzando un valor de 28,3%, con lo cual el suelo no presentaría problemas de drenaje. En el sector compactado del rodal tratamiento el volumen de poros gruesos fue en general menor a 20%, llegando a valores cercanos al 15%. El horizonte BA fue el más afectado.

La variable más sensible al cambio fue la resistencia a la penetración, la que permite determinar que el grado de alteración del suelo por el tránsito del *skidder* es nítido en este factor, aún después de más de 20 años del hecho. El efecto en el suelo se pudo determinar hasta profundidades mayores a 60 cm, como consecuencia de haber sido rodales con alto porcentaje de humedad. La proyección del efecto compactador dependerá mucho del peso de la máquina o animal y el contenido de humedad del suelo. Ellies (1999) señala que el efecto compactador de un tractor de 4 t sobre un suelo rojo arcilloso alcanza hasta 30 cm de profundidad en verano, mientras que en invierno este efecto alcanza hasta 60 cm de profundidad. A pesar de haberse efectuado la cosecha en invierno el efecto en el suelo puede ser considerado en general como moderado.

Sin embargo el impacto sobre el suelo producido por el tránsito de un *skidder* es considerable, ya que además de compactación se encontraron situaciones de relleno, amasado y remoción de suelo. Con respecto a esta última, Gayoso y Alarcón (1999) mencionan que es propia de la acción directa de equipos de maderero y del arrastre de las trozas cosechadas. Dependiendo de la pendiente del terreno existe también la probabilidad de deslizamientos. Ellies (1999) señala que el tráfico con equipo pesado cambia la estructura de un suelo y puede producir daños irreversibles dependiendo de la intensidad del tránsito.

Una forma de disminuir el riesgo de este efecto en la cosecha mecanizada es organizar adecuadamente las faenas. Gayoso e Iroumé (1995) señalan que, de acuerdo con el origen de los impactos, las medidas mitigadoras se orientan a la aplicación de tecnologías ambientalmente más aceptables. Destacan la planificación integral de la cosecha y de las vías de saca, el empleo de maquinaria de baja presión concordante con la baja capacidad de los suelos, técnicas y estándares de construcción de caminos, técnicas de preparación de sitios y manejo de desechos ajustadas a la fragilidad de los terrenos.

## 6. CONCLUSIONES.

- Las plantaciones de *Pinus radiata* consideradas en este estudio presentaron un menor rendimiento volumétrico con respecto a las plantaciones de la primera rotación. El rodal testigo presentó una pérdida de 35% y el rodal tratamiento una pérdida de 42%, comparados con un rodal promedio de la primera rotación. Esta pérdida de productividad fue estimada en base a los volúmenes simulados de los rodales y resulta difícil estimar la pérdida real debido a que los rodales fueron raleados y se desconoce el volumen exacto extraído, el cual no fue incluido en la simulación.
- La disminución del rendimiento también fue determinada en el índice de sitio, el cual estaba estimado para estos rodales entre 30-28 m. Actualmente para el rodal testigo se le estimó un índice de sitio de 27 m y el rodal tratamiento de 24 m.
- La principal causa de pérdida de rendimiento debiera ser la compactación del suelo, dado que los rodales de primera rotación fueron cosechados en invierno con *skidder* y bueyes de madereo. Posteriormente se establecieron los rodales de segunda rotación. Otros factores importantes de pérdida debieron ser la calidad de las plantas, el método de plantación y el manejo posterior del rodal.
- El efecto de la compactación fue mitigado por el hecho de que no toda la superficie de producción es transitable. Es decir, las zonas del rodal que crecieron bajo condiciones normales de suelo elevaron el promedio del volumen, enmascarando el efecto de la compactación. La diferencia de productividad entre la compactación producida por *skidder* y bueyes de madereo se estimó en 25%, considerando el error de muestreo.
- Los efectos físicos visibles de la compactación en el perfil de suelo son la morfología y estructura. Esto es complementado con las mediciones hechas de penetrometría vertical (bastón pedológico) y penetrometría horizontal (penetrómetro de bolsillo), la densidad aparente y el volumen de poros gruesos. En todos los casos la tendencia fue una estructura más cerrada, con menor porosidad gruesa y mayor resistencia a la penetración.
- La variable más sensible para medir los cambios físicos en el suelo fue la penetrometría o resistencia a la penetración. Con este método fue posible medir efectos hasta los 60 cm de profundidad, sin embargo los principales efectos ocurrieron entre los 15-45 cm de profundidad.

## BIBLIOGRAFIA.

- ALARCON, C. 2001. ¿Los costos ocultos en el sector forestal, disminuyen la rentabilidad del negocio? [www.aldeaforestal.cl/lemu\\_Weblemu/lemumayo01/clasicos/Cesar-ALV.PDF](http://www.aldeaforestal.cl/lemu_Weblemu/lemumayo01/clasicos/Cesar-ALV.PDF) (03 de mayo, 2004)
- ARNTZ, J.; DELMASTRO, R.; SCHLATTER, J. 1969. Influencia de un rodal de *Pinus radiata* D.Don sobre algunos factores ecológicos en comparación al campo abierto. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 130 p.
- BAINBRIDGE, D. 1999. Addressing soil strength problems on restoration projects. Soil Ecology and Restoration Group. 6 p.
- BAVER, J. 1973. Física de suelos. Centro Regional de Ayuda Técnica. México. 529 p.
- BOWLES, J. 1982. Manual de laboratorio de física de suelos en Ing. Civil. McGraw-Hill. México. 231 p.
- BUCK, C. 2000. Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties. Applied Soil Ecology. 33(14): 223-229
- CIFOR (Center of International Forestry Research, Indonesia). 1998. Reduced-Impact Logging. [www.cifor.cgiar.org/publications/Html/AR-98/RIL.html](http://www.cifor.cgiar.org/publications/Html/AR-98/RIL.html) (01 de mayo, 2004)
- CIREN, 2001. Estudio agroecológico X Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Tomo I.
- DONOSO, C.; GERDING, V.; OLIVARES, B.; REAL, P.; SANDOVAL, V.; SCHLATTER, R.; SCHLEGEL, F. 1984. Antecedentes para el manejo del bosque nativo de Forestal Arauco, Sector Cordillera de Nahuelbuta. Informe de convenio N° 74. Proyecto Forestal Arauco/UACH, Valdivia. Universidad Austral de Chile, Fac. Cs. Forestales. Serie Técnica.
- DONOSO, C. 1993. Bosque templados de Chile y Argentina. Variación, estructura y dinámica. 3ª edición. Chile. Editorial Universitaria. 483 p.
- DONOSO, C. 1997. Ecología Forestal. El bosque y su medio ambiente. 5ª edición. Chile. Editorial Universitaria. 369 p.
- ELLIES, A. 1999. Cambios estructurales y distribución de tensiones en suelos sujetos al tránsito de maquinaria. Bosque 20(1): 37-45

- ELLIES, A. 2000. La degradación física del suelo. Proyecto Ley de protección del suelo. Sociedad Chilena de Cs. del Suelo – CONAMA. Boletín nº 14.
- GAYOSO, J. 1985. Mecánica de suelos en la ingeniería vial forestal. Valdivia, Fac. Cs. Forestales, Universidad Austral de Chile. 93 p. (Publicación docente Nº 14).
- GAYOSO, J.; ALARCÓN, D. 1999. Guía de conservación de suelos forestales. Proyecto certificación del manejo forestal en las regiones Octava, Décima y Duodécima. Facultad de Cs. Forestales, UACH. 91 p.
- GAYOSO, J.; IROUMÉ, A. 1993. Impacto al suelo por efecto de la cosecha forestal. *In:* VIII Simposio de la sociedad chilena del suelo. Valdivia, abril 8-10 de 1993. Valdivia (Chile). Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. pp. 98-106
- GAYOSO, J.; IROUMÉ, A. 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. Bosque 16(2): 3-12
- GAYOSO, J.; IROUMÉ, A.; ELLIES, A. 1991. Degradación de la cosecha forestal. Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 10: 98-106
- HARTGE, K. 1984. Efecto de las propiedades físicas de un suelo sobre el rendimiento de los cultivos agrícolas. *In:* IV Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo. Valdivia, septiembre 24-26 de 1984. Valdivia (Chile), pp. 03-09
- HELAL, M. 1991. Fabricación de suelo, desarrollo de raíces y función de las raíces. Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. Pflanzenernähr. Bodenk 154: 403-407.
- HORN, R. 1984. The prediction of the penetration resistance of soils by multiple regression analysis. Z.F. Kulturtechnik und Flurbereinigung 26: 42-51.
- HORN, R. 1985. The influence of animal trading and soil physical properties of mountainous soils. Z.F. Kulturtechnik und Flurbereinigung 26: 42-51.
- HUBER, A. 1970. Diez años de observaciones climatológicas en la Estación Teja-Valdivia. Chile 1960-1969. Valdivia. UACH. 46 p.
- INIA, 1989. Mapa agroclimático de Chile. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Santiago. 221 p.
- IREN-CORFO-UACH. 1978. Estudio de suelos en la Provincia de Valdivia. Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (Chile), Corporación de Fomento de la Producción, Universidad Austral de Chile. Santiago. 178 p.
- KRAMER, P. 1983. Water relations of plants. Academic Press. New York. 489 p.

- LAMING, J. 1982. Capacidad de soporte para algunos suelos de distintos manejos de praderas permanentes en la Provincia de Valdivia. Tesis Lic. Ing. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Cs. Agrarias. 61 p.
- LARSON, W.; GUPTA, S.; USECHE, R. 1980. Compression of agricultural soils from eight soil order. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (44):450-455
- MEDINA, E. 1977. Introducción a la Ecofisiología Vegetal. Serie de Biología. Monografía No 16. Secretaria General O.E.A. Washington, D.C. 102 p.
- MONRROY, M. 1981. Cambios físicos – mecánicos en dos suelos de textura fina, por efecto del madereo con tracción animal y mecanizada. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 136 p.
- OVALLE, C. 2001. CAUQUENES-INIA, Nuevo cultivar de hualputra chilena (*Medicago polymorpha*) para áreas de secano mediterráneo. *Agricultura Técnica* 61(1): 89 -92
- PERALTA, M. 1976. Uso, clasificación y conservación de suelos. Servicio Agrícola y Ganadero (CEDITEC) Chile. 340 p.
- QUINTANAR, J. 1992. Requerimientos para el crecimiento de *Pinus radiata* (D.Don): hábitat natural y situación en Chile. En: *Pinus radiata* investigación en Chile. Silvicultura, manejo y tecnología. Editado por B. Olivares, M Meneses y G. Paredes. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. pp. 30-34.
- RAB, M. 1998. Rehabilitation of snig tracks and landings following logging of *Eucalyptus regnans* forest in the Victoria Central Highland, a review. *Australian Forestry.* 61(2): 103-113
- REYES, J. 1991. Determinación y análisis del límite de contracción en siete series de suelos rojo arcillosos. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 35 p.
- RICO, A. y DEL CASTILLO, H. 1978. La ingeniería del suelo en las vías terrestres. Limusa. México. 459 p.
- SALAZAR, J.; VALENZUELA, R. 1977. Elaboración de un mapa de suelos para un predio forestal. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 82 p.

- SCHLATTER, J.E.; GERDING, V.; HUBER, H. 1995. Sistema de ordenamiento de la tierra. Herramienta para la planificación forestal aplicado a la X Región, Valdivia. Universidad Austral de Chile, Fac.Cs. Forestales. Serie Técnica.
- SCHLATTER, J.E.; GREZ, R.; GERDING, V. 2003. Manual para el Reconocimiento de Suelos. 3ª Ed. Universidad Austral de Chile, Valdivia. Chile. 114 p
- SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS. 1974. Relación suelo-planta-agua. Diana S.A. México. 99 p.
- SOMMER, C. 1988. Soil compaction and water uptake of plants. *Catena Supplement* (11): 107-111
- TOSSO, J. 1985. Suelos volcánicos de Chile. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago. 723 p.
- UNIVERSIDAD DE CHILE. 1992. Resistencia mecánica del suelo. Suelos, una visión actualizada del recurso. Publicación miscelánea agrícola N° 38. 345 p.
- VERA, A. 1998. Relación entre los factores del sitio y el Índice de Sitio para *Pinus radiata* en la zona de Valdivia. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 103 p.

## **ANEXOS**

**Anexo 1.  
Abstract.**



## ABSTRACT.

The compaction of a red clayey soil (Typic Paleudult), produced by a winter harvesting of *Pinus radiata* D. Don, with a 6 t skidder in Los Pinos, Valdivia (treatment), and its effect on the second rotation yield, was evaluated comparing it with an other pine stand which was harvested with animal traction (control).

The two *Pinus radiata* stands had different yields, with an output in favour of the control of 11,4%, by considering only the sample plot of the control, corresponding to the soil profile. However when all the control pine stand was included, the yield loss caused by compaction increased to 25%.

The minor yield in the stand with compacted soil was related with a greater resistance to the vertical penetration (measured with a pedologic stick). Also the soil showed higher bulk density (95% of reliance;  $0,95$  to  $1,0$   $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  compared with  $0,75$   $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  at 25cm of depth), with a minor macropores volume in comparison with the control (12-18% compared with 30%), the last one very similar to the soil under an adjacent native forest. In addition, the horizontal penetration (pocket penetrometer), which proved to be the most sensible variable for measuring the differences between treatments ( $>2$   $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  compared with  $<1,5$   $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), showed a main compaction effect between 15-45cm deep, but even at 65cm it could be detected.

However, the yield of both second rotation pine plantations decreased 35-42% compared with the first rotation. This decrease had its origin in the soil compaction produced by skidder and animal traction (winter harvesting). Other factors as plant quality used at the beginning of the 80's and the type of plantation method used at that time produced an additional loss.

Keywords: *Pinus radiata*, red clayey soil, yield, compaction.

**Anexo 2.**  
**Funciones de Índice de Sitio y de Volumen.**

### Funciones de Índice de Sitio (García, 1970).

Ecuación base:  $\ln h = a_0 + a_1/E$

Ecuación general:  $\ln IS = \ln h + a_1 (1/E_c - 1/E)$

h = Altura media de los árboles dominantes y codominantes (m).

E = Edad (años).

$a_0$  y  $a_1$  = Coeficientes de regresión.

$E_c$  = Edad clave (20 años).

IS = Índice de sitio (m).

De acuerdo a la clasificación del INFOR (1970), Valdivia se encuentra en la zona de crecimiento 10. Además, también existe una función general para estimar el IS.

| Zona          | $a_0$ | $a_1$  |
|---------------|-------|--------|
| 10 (Valdivia) | 3,949 | -15,12 |
| General       | 3,869 | -14,98 |

### Funciones de volumen del fuste (Donoso et al., 1984).

**Especie**

**Función**

*Nothofagus dombeyi*  
(coigüe)

$$V = 0,00003544D^2 H + 0,0001569D^2$$

*Aextoxicon punctatum*  
(olivillo)

$$V = 0,00003915 D^2 H + 0,0000802D^2$$

*Eucryphia cordifolia*  
(ulmo)

$$V = 0,00005071D^2H + 0,00004077D^2H + 0,00000000683$$

V = volumen (m).

D = diámetro a 1,3 m (cm).

H = altura total (m)

Para todos los árboles menores de 35 cm se emplea la siguiente función:

$$V = 0,00002032D^2H + 0,00000713D^3$$

**Anexo 3.**  
**Base de datos resistencia a la penetración (bastón de golpe).**

**METODO DEL  
BASTON.**

**RODAL TRATAMIENTO  
82001 PR**

|           |        | Profundidad (cm) |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------|--------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|
|           |        | 10               | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Transecto | Punto  | Numero de golpes |    |    |    |    |    |    |    |
| 1         | 1      | 1                | 1  | 2  | 2  | 3  | 4  | 4  | 6  |
| 1         | 2      | 3                | 6  | 4  | 4  | 3  | 4  | 4  | 6  |
| 1         | 3      | 1                | 2  | 4  | 4  | 4  | 3  | 3  | 4  |
| 1         | 4      | 3                | 2  | 2  | 2  | 3  | 2  | 3  | 3  |
| 1         | huella | 3                | 6  | 7  | 6  | 6  | 7  | 6  | 7  |
| 2         | 1      | 6                | 7  | 5  | 7  | 6  | 6  | 6  | 7  |
| 2         | 2      | 2                | 4  | 7  | 7  | 6  | 5  | 5  | 7  |
| 2         | 3      | 4                | 5  | 5  | 4  | 4  | 4  | 5  | 5  |
| 2         | 4      | 2                | 4  | 7  | 5  | 6  | 4  | 6  | 6  |
| 2         | huella | 4                | 4  | 6  | 6  | 8  | 6  | 6  | 5  |
| 3         | 1      | 2                | 1  | 2  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  |
| 3         | 2      | 2                | 2  | 2  | 2  | 3  | 3  | 4  | 5  |
| 3         | 3      | 0                | 1  | 2  | 2  | 2  | 1  | 1  | 2  |
| 3         | 4      | 0                | 1  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |

**RODAL TESTIGO  
80001 PR**

|           |       | Profundidad (cm) |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------|-------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|
|           |       | 10               | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Transecto | Punto | Numero de golpes |    |    |    |    |    |    |    |
| 1         | 1     | 1                | 3  | 3  | 2  | 3  | 2  | 1  | 3  |
| 1         | 2     | 2                | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 4  | 3  |
| 1         | 3     | 1                | 2  | 2  | 2  | 3  | 2  | 3  | 5  |
| 2         | 1     | 0                | 1  | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 3  |
| 2         | 2     | 2                | 3  | 2  | 2  | 2  | 0  | 2  | 2  |
| 2         | 3     | 1                | 2  | 2  | 1  | 3  | 3  | 3  | 5  |
| 3         | 1     | 1                | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 3  | 5  |
| 3         | 2     | 1                | 2  | 1  | 2  | 2  | 3  | 6  | 6  |
| 3         | 3     | 1                | 2  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2  |

**Anexo 4.**  
**Base de datos resistencia a la penetración (penetrómetro).**

**Perfil testigo**

**COLUMNA 1**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 1,7                               | 0,8 | 1,0 | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 1,9 | 2,2  | 0,8  | 1,6   | 0,5  |
| 15           | 1,3                               | 0,6 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,6  | 0,6  | 1,3   | 0,3  |
| 25           | 1,3                               | 0,8 | 1,3 | 1,1 | 0,7 | 1,2 | 1,3 | 1,3  | 0,7  | 1,1   | 0,3  |
| 35           | 1,7                               | 1,6 | 0,8 | 0,6 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,7  | 0,6  | 1,2   | 0,4  |
| 45           | 1,9                               | 1,6 | 1,3 | 1,0 | 1,8 | 1,3 | 1,0 | 1,9  | 1,0  | 1,4   | 0,4  |
| 55           | 1,3                               | 0,6 | 1,2 | 0,8 | 0,7 | 1,2 | 1,2 | 1,3  | 0,6  | 1,0   | 0,3  |
| 65           | 1,5                               | 1,2 | 1,0 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 1,2 | 1,5  | 0,5  | 0,9   | 0,4  |

**COLUMNA 2**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 0,6                               | 2,3 | 2,3 | 2,0 | 2,5 | 0,8 | 1,0 | 2,5  | 0,6  | 1,6   | 0,8  |
| 15           | 0,7                               | 0,6 | 1,3 | 1,8 | 1,9 | 1,3 | 1,6 | 1,9  | 0,6  | 1,3   | 0,5  |
| 25           | 1,3                               | 1,4 | 1,6 | 1,1 | 1,4 | 1,0 | 1,3 | 1,6  | 1,0  | 1,3   | 0,2  |
| 35           | 1,3                               | 1,4 | 0,9 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 1,5 | 1,5  | 0,5  | 1,0   | 0,4  |
| 45           | 1,5                               | 0,5 | 1,0 | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 1,5  | 0,5  | 0,9   | 0,3  |
| 55           | 1,5                               | 1,3 | 1,3 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 1,4 | 1,8  | 0,6  | 1,3   | 0,4  |
| 65           | 1,5                               | 2,2 | 2,0 | 0,8 | 2,0 | 0,6 | 1,0 | 2,2  | 0,6  | 1,4   | 0,6  |

**COLUMNA 3**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 1,0                               | 1,7 | 0,9 | 1,2 | 0,7 | 0,8 | 1,3 | 1,7  | 0,7  | 1,1   | 0,3  |
| 15           | 1,3                               | 1,6 | 0,8 | 1,6 | 0,8 | 1,0 | 1,8 | 1,8  | 0,8  | 1,3   | 0,4  |
| 25           | 1,2                               | 0,8 | 1,3 | 1,6 | 0,8 | 0,8 | 1,2 | 1,6  | 0,8  | 1,1   | 0,3  |
| 35           | 1,3                               | 1,6 | 1,4 | 1,1 | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,6  | 0,9  | 1,2   | 0,2  |
| 45           | 1,7                               | 2,0 | 1,3 | 0,6 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 2,0  | 0,5  | 1,1   | 0,6  |
| 55           | 0,5                               | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,9 | 1,1 | 1,4 | 1,4  | 0,5  | 0,8   | 0,4  |
| 65           | 1,6                               | 1,6 | 1,1 | 1,1 | 1,3 | 0,6 | 1,3 | 1,6  | 0,6  | 1,2   | 0,3  |

**Perfil 1 tratamiento**

**COLUMNA 1**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |       |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 0,5                               | 1,1 | 0,6 | 0,5 | 0,4   | 2,1 | 2,5 | 2,5  | 0,4  | 1,1   | 0,9  |
| 15           | 3,4                               | 3,1 | 3,3 | 3,2 | 2,4   | 3,1 | 3,1 | 3,4  | 2,4  | 3,1   | 0,3  |
| 25           | 2,3                               | 2,7 | 2,8 | 2,7 | >4,5* | 2,6 | 2,4 | 1,3  | 2,8  | 2,3   | 2,4  |
| 35           | 1,5                               | 2,0 | 1,7 | 0,5 | 1,4   | 1,6 | 1,7 | 2,0  | 0,5  | 1,5   | 0,5  |
| 45           | 1,9                               | 0,9 | 0,8 | 0,5 | 1,4   | 1,6 | 1,7 | 1,9  | 0,5  | 1,3   | 0,5  |
| 55           | 1,0                               | 0,9 | 0,5 | 1,0 | 0,9   | 1,6 | 1,9 | 1,9  | 0,5  | 1,1   | 0,5  |
| 65           | 1,5                               | 1,3 | 1,0 | 1,3 | 1,7   | 1,3 | 1,0 | 1,7  | 1,0  | 1,3   | 0,3  |

(\*): Agregado de ladrillo.



**COLUMNA 2**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |      | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-------|------|
| 5            | 1,6                               | 2,1 | 0,6 | 1,2 | 0,5 | 0,5 | 0,5  | 2,1  | 0,5  | 1,0   | 0,6  |
| 15           | 4,2                               | 2,3 | 1,7 | 3,3 | 1,4 | 1,1 | 2,2  | 4,2  | 1,1  | 2,3   | 1,1  |
| 25           | 2,9                               | 3,1 | 1,8 | 1,5 | 2,1 | 4,1 | >4,5 | 4,1  | 1,5  | 2,6   | 1,0  |
| 35           | 3,5                               | 3,3 | 2,7 | 3,2 | 2,7 | 2,9 | 3,1  | 3,5  | 2,7  | 3,1   | 0,3  |
| 45           | 1,5                               | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,7  | 1,8  | 0,6  | 1,5   | 0,4  |
| 55           | 1,2                               | 0,8 | 0,8 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,2  | 1,4  | 0,8  | 1,2   | 0,3  |
| 65           | 1,6                               | 0,8 | 1,4 | 1,5 | 1,7 | 2,3 | 2,0  | 2,3  | 0,8  | 1,6   | 0,5  |

**COLUMNA 3**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 2,0                               | 0,5 | 0,1 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 2,0  | 0,1  | 0,5   | 0,7  |
| 15           | 0,8                               | 3,4 | 3,8 | 4,1 | 3,6 | 2,9 | 3,4 | 4,1  | 0,8  | 3,1   | 1,1  |
| 25           | 1,7                               | 2,8 | 2,9 | 2,7 | 1,8 | 3,0 | 2,8 | 3,0  | 1,7  | 2,5   | 0,5  |
| 35           | 1,6                               | 2,0 | 1,6 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,2  | 1,6  | 2,0   | 0,3  |
| 45           | 1,6                               | 0,6 | 1,0 | 1,3 | 0,6 | 1,7 | 1,6 | 1,7  | 0,6  | 1,2   | 0,5  |
| 55           | 0,6                               | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,3 | 1,3  | 0,5  | 0,6   | 0,3  |
| 65           | 1,6                               | 1,1 | 1,8 | 1,6 | 1,9 | 1,3 | 1,5 | 1,9  | 1,1  | 1,5   | 0,3  |

**COLUM. 4** opuesta al perfil principal

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 1,7                               | 2,4 | 1,9 | 3,3 | 0,6 | 2,5 | 2,3 | 3,3  | 0,6  | 2,1   | 0,8  |
| 15           | 3,1                               | 3,0 | 2,5 | 2,0 | 2,3 | 0,7 | 0,6 | 3,1  | 0,6  | 2,0   | 1,0  |
| 25           | 2,6                               | 2,7 | 1,5 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 2,0 | 2,7  | 0,6  | 1,5   | 0,9  |
| 35           | 1,0                               | 1,0 | 1,3 | 0,6 | 1,5 | 0,9 | 0,9 | 1,5  | 0,6  | 1,0   | 0,3  |
| 45           | 3,9                               | 2,6 | 2,5 | 2,0 | 2,3 | 2,9 | 2,3 | 3,9  | 2,0  | 2,6   | 0,6  |
| 55           | 2,1                               | 2,5 | 2,0 | 2,5 | 2,8 | 2,7 | 2,5 | 2,8  | 2,0  | 2,4   | 0,3  |
| 65           | 2,5                               | 2,7 | 2,6 | 2,9 | 2,4 | 2,8 | 2,3 | 2,9  | 2,3  | 2,6   | 0,2  |

**Perfil 2 tratamiento****COLUMNA 1**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 0,1                               | 0,1 | 1,7 | 1,7 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 1,7  | 0,1  | 0,6   | 0,8  |
| 15           | 1,6                               | 1,3 | 1,7 | 0,7 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 1,7  | 0,1  | 0,8   | 0,7  |
| 25           | 1,3                               | 2,4 | 2,5 | 2,8 | 1,4 | 2,2 | 2,4 | 2,8  | 1,3  | 2,1   | 0,6  |
| 35           | 2,6                               | 3,2 | 3,3 | 1,8 | 2,0 | 2,1 | 2,6 | 3,3  | 1,8  | 2,5   | 0,6  |
| 45           | 2,6                               | 3,4 | 2,3 | 1,6 | 2,2 | 3,6 | 2,1 | 3,6  | 1,6  | 2,5   | 0,7  |
| 55           | 2,4                               | 0,6 | 2,7 | 2,3 | 2,2 | 2,3 | 2,0 | 2,7  | 0,6  | 2,1   | 0,7  |
| 65           | 2,0                               | 2,4 | 1,6 | 2,4 | 2,5 | 2,7 | 2,2 | 2,7  | 1,6  | 2,3   | 0,4  |

**COLUMNA 2**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |      |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 0,1                               | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 0,8  | 1,2 | 1,2  | 0,1  | 0,4   | 0,5  |
| 15           | 0,1                               | 0,8 | 3,1 | 3,1 | 1,7 | 2,4  | 2,9 | 3,1  | 0,1  | 2,0   | 1,2  |
| 25           | 3,0                               | 1,0 | 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,9  | 1,5 | 3,0  | 0,1  | 1,1   | 1,0  |
| 35           | 1,5                               | 2,7 | 2,1 | 2,7 | 3,2 | >4,5 | 3,6 | 3,6  | 1,5  | 2,6   | 0,8  |
| 45           | 3,6                               | 2,6 | 1,7 | 1,4 | 3,3 | 2,0  | 2,7 | 3,6  | 1,4  | 2,5   | 0,8  |
| 55           | 2,4                               | 1,6 | 1,0 | 1,7 | 1,7 | 0,5  | 1,5 | 2,4  | 0,5  | 1,5   | 0,6  |
| 65           | 1,0                               | 2,4 | 1,4 | 0,5 | 0,8 | 0,5  | 1,2 | 2,4  | 0,5  | 1,1   | 0,7  |

**COLUMNA 3**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 1,2                               | 1,2 | 0,8 | 1,4 | 0,6 | 0,8 | 2,0 | 2,0  | 0,6  | 1,1   | 0,5  |
| 15           | 2,5                               | 1,0 | 3,9 | 3,4 | 1,2 | 2,7 | 0,8 | 3,9  | 0,8  | 2,2   | 1,2  |
| 25           | 0,6                               | 0,7 | 1,2 | 2,7 | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 2,7  | 0,6  | 1,2   | 0,7  |
| 35           | 4,0                               | 3,7 | 2,7 | 3,5 | 3,9 | 3,2 | 4,2 | 4,2  | 2,7  | 3,6   | 0,5  |
| 45           | 2,3                               | 4,0 | 2,8 | 3,2 | 3,6 | 3,6 | 0,8 | 4,0  | 0,8  | 2,9   | 1,1  |
| 55           | 2,5                               | 3,0 | 1,3 | 2,4 | 0,7 | 2,6 | 2,7 | 3,0  | 0,7  | 2,2   | 0,8  |
| 65           | 1,5                               | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 1,8 | 1,6 | 1,0 | 2,5  | 1,0  | 1,6   | 0,5  |

**Perfil B. nativo****COLUMNA 1**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 0,9                               | 0,5 | 1,0 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | 1,4 | 1,4  | 0,5  | 1,1   | 0,3  |
| 15           | 1,6                               | 1,3 | 1,2 | 2,4 | 2,1 | 2,4 | 1,7 | 2,4  | 1,2  | 1,8   | 0,5  |
| 25           | 1,1                               | 0,5 | 1,1 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,7  | 0,5  | 1,2   | 0,4  |
| 35           | 0,6                               | 0,6 | 1,0 | 1,5 | 0,6 | 0,5 | 1,0 | 1,5  | 0,5  | 0,8   | 0,4  |
| 45           | 0,7                               | 0,8 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0  | 0,7  | 0,8   | 0,1  |
| 55           | 1,2                               | 1,2 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,0 | 1,8  | 1,0  | 1,4   | 0,3  |
| 65           | 1,0                               | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 1,0  | 0,5  | 0,8   | 0,2  |

**COLUMNA 2**

| Profun. (cm) | penetrometría Kg-cm <sup>-2</sup> |     |     |     |     |     |     | MAX. | MIN. | MEDIA | D.E. |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|
| 5            | 1,6                               | 1,7 | 1,3 | 1,1 | 1,2 | 0,6 | 0,8 | 1,7  | 0,6  | 1,2   | 0,4  |
| 15           | 1,8                               | 2,0 | 1,8 | 1,2 | 1,0 | 1,5 | 0,8 | 2,0  | 0,8  | 1,4   | 0,5  |
| 25           | 0,7                               | 0,7 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,3 | 1,6  | 0,7  | 1,2   | 0,4  |
| 35           | 1,8                               | 1,3 | 0,8 | 1,2 | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 1,8  | 0,6  | 1,1   | 0,4  |
| 45           | 1,0                               | 1,2 | 0,6 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,7 | 1,2  | 0,5  | 0,8   | 0,3  |
| 55           | 1,7                               | 0,7 | 0,7 | 0,9 | 0,6 | 1,1 | 1,2 | 1,7  | 0,6  | 1,0   | 0,4  |
| 65           | 1,6                               | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 1,8 | 1,8  | 0,6  | 1,0   | 0,5  |

**COLUMNA 3**

| <b>Profun. (cm)</b> | <b>penetrometría Kg-cm<sup>-2</sup></b> |     |     |     |     |     |     | <b>MAX.</b> | <b>MIN.</b> | <b>MEDIA</b> | <b>D.E.</b> |
|---------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 5                   | 0,7                                     | 1,0 | 0,6 | 1,2 | 0,8 | 1,2 | 0,6 | 1,2         | 0,6         | 0,9          | 0,3         |
| 15                  | 1,0                                     | 1,2 | 0,7 | 1,3 | 1,6 | 0,8 | 1,5 | 1,6         | 0,7         | 1,2          | 0,3         |
| 25                  | 0,8                                     | 1,3 | 1,3 | 1,2 | 1,0 | 1,6 | 0,8 | 1,6         | 0,8         | 1,1          | 0,3         |
| 35                  | 0,6                                     | 0,7 | 0,7 | 1,0 | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 1,0         | 0,5         | 0,7          | 0,2         |
| 45                  | 0,7                                     | 0,7 | 1,5 | 0,7 | 1,3 | 1,2 | 1,0 | 1,5         | 0,7         | 1,0          | 0,3         |
| 55                  | 0,6                                     | 0,6 | 1,0 | 1,2 | 1,3 | 0,9 | 1,0 | 1,3         | 0,6         | 0,9          | 0,3         |
| 65                  | 0,6                                     | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 0,8 | 1,0 | 1,2         | 0,6         | 1,0          | 0,2         |

**Anexo 5.**  
**Tablas de propiedades físicas del suelo.**

| Perfil  | Horizonte | D.A. (g·cm <sup>-3</sup> ) | C.H. % | VTP% | VPGr% | VPGL% |
|---------|-----------|----------------------------|--------|------|-------|-------|
| Testigo | A         | 0,67                       | 44,3   | 68,1 | 35,2  | 3,3   |
| Testigo | AB        | 0,83                       | 42,9   | 60,3 | 24,8  | 3,8   |
| Testigo | BA        | 0,77                       | 41,6   | 63,1 | 26,4  | 5,4   |
| Testigo | B         | 0,84                       | 41,4   | 59,8 | 21,5  | 5,3   |
| Testigo | B2C       | N.D.                       | N.D.   | N.D. | N.D.  | N.D.  |
| Testigo | 2C        | N.D.                       | N.D.   | N.D. | N.D.  | N.D.  |

| Perfil   | Horizonte | D.A. (g·cm <sup>-3</sup> ) | C.H. % | VTP% | VPGr% | VPGL% |
|----------|-----------|----------------------------|--------|------|-------|-------|
| Trat. p1 | A         | 0,92                       | 47,4   | 56,1 | 11,1  | 2,9   |
| Trat. p1 | AB        | 0,93                       | 47,9   | 55,7 | 14,6  | 2,9   |
| Trat. p1 | BA        | 1,00                       | 49,5   | 52,2 | 5,9   | 3,6   |
| Trat. p1 | B1        | 0,93                       | 52,2   | 55,3 | 10,1  | 4,4   |
| Trat. p1 | B2        | N.D.                       | N.D.   | N.D. | N.D.  | N.D.  |

| Perfil     | Horizonte | D.A. (g·cm <sup>-3</sup> ) | C.H. % | VTP% | VPGr% | VPGL% |
|------------|-----------|----------------------------|--------|------|-------|-------|
| Trat. p.o. | 15 cm     | 0,90                       | 50,5   | 59,1 | 16,1  | 2,9   |
| Trat. p.o. | 30 cm     | 0,97                       | 52,9   | 55,6 | 10,3  | 2,8   |

| Perfil   | Horizonte | D.A. (g·cm <sup>-3</sup> ) | C.H. % | VTP% | VPGr% | VPGL% |
|----------|-----------|----------------------------|--------|------|-------|-------|
| Trat. p2 | A         | 0,80                       | 47,2   | 61,7 | 26,6  | 4,0   |
| Trat. p2 | AB        | 0,79                       | 45,6   | 62,2 | 24,4  | 2,2   |
| Trat. p2 | BA        | 0,95                       | 47,2   | 54,4 | 11,3  | 3,6   |
| Trat. p2 | B1        | 0,99                       | 49,8   | 52,5 | 4,3   | 4,0   |
| Trat. p2 | B2        | N.D.                       | N.D.   | N.D. | N.D.  | N.D.  |

| Perfil | Horizonte | D.A. (g·cm <sup>-3</sup> ) | C.H. % | VTP% | VPGr% | VPGL% |
|--------|-----------|----------------------------|--------|------|-------|-------|
| Nativo | A         | 0,54                       | 72,5   | 74,1 | 32,1  | 2,7   |
| Nativo | AB        | 0,69                       | 61,7   | 66,9 | 24,3  | 3,1   |
| Nativo | BA        | 0,75                       | 52,1   | 64,2 | 24,4  | 3,6   |
| Nativo | B1        | 0,77                       | 52,3   | 63,1 | 21,3  | 6,6   |
| Nativo | B2        | N.D.                       | N.D.   | N.D. | N.D.  | N.D.  |

D.A: densidad aparente.

C.H.: contenido de humedad de la muestra.

VTP: volumen total de poros.

VPGr: volumen de poros gruesos de drenaje rápido.

VPGL: volumen de poros gruesos de drenaje lento.

**Anexo 6.**  
**Análisis de suelo (datos de laboratorio).**

**Testigo**

| ID cilindro | Horizonte | H% 0,06 bar | H% 330 bar | D. aparente |
|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|
| 454         | A         | 32,41       | 29,32      | 0,74        |
| 1A          | A         | 32,29       | 28,54      | 0,49        |
| 318         | A         | 33,96       | 30,90      | 0,78        |
| 375         | AB        | 36,16       | 32,06      | 0,81        |
| 383         | AB        | 35,03       | 31,28      | 0,85        |
| 358         | AB        | 35,31       | 31,67      | 0,84        |
| 369         | BA        | 37,44       | 32,58      | 0,88        |
| 133         | BA        | 32,70       | 27,97      | 0,65        |
| 3           | BA        | 40,02       | 33,50      | 0,79        |
| 124         | B         | 39,95       | 33,63      | 0,88        |
| 9           | B         | 35,30       | 30,89      | 0,78        |
| 134         | B         | 39,65       | 34,41      | 0,87        |

**Tratamiento perfil**

| ID cilindro | Horizonte | H% 0,06 bar | H% 330 bar | D. aparente |
|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|
| 385         | A         | 45,30       | 42,41      | 0,94        |
| 10          | A         | 46,14       | 43,25      | 0,81        |
| 425         | A         | 43,49       | 40,23      | 1,02        |
| 140         | AB        | 40,95       | 38,01      | 0,82        |
| 108         | AB        | 38,20       | 35,17      | 0,99        |
| 1           | AB        | 44,07       | 40,82      | 0,98        |
| 449         | BA        | 46,87       | 43,26      | 1,05        |
| 106         | BA        | 46,91       | 43,57      | 1,00        |
| 390         | BA        | 45,34       | 41,28      | 0,96        |
| 321         | B1        | 47,59       | 43,22      | 0,93        |
| 9           | B1        | 39,95       | 36,40      | 0,82        |
| 432         | B1        | 51,43       | 47,46      | 1,06        |

**Tratamiento perfil opuesto**

|     |        |       |       |      |
|-----|--------|-------|-------|------|
| 434 | arriba | 37,58 | 34,64 | 0,85 |
| 6   | arriba | 51,82 | 47,50 | 0,96 |
| 324 | arriba | 39,44 | 36,46 | 0,89 |
| 440 | abajo  | 45,05 | 42,29 | 1,02 |
| 119 | abajo  | 48,62 | 45,62 | 0,94 |
| 315 | abajo  | 42,20 | 38,48 | 0,97 |

**Tratamiento  
perfil 2**

| ID cilindro | Horizonte | H% 0,06 bar | H% 330 bar | D. aparente |
|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|
| 101         | A         | 32,50       | 28,53      | 0,75        |
| 303         | A         | 39,17       | 34,36      | 0,93        |
| 8           | A         | 33,80       | 30,12      | 0,73        |
| 436         | AB        | 37,75       | 35,51      | 0,88        |
| 312         | AB        | 36,05       | 32,85      | 0,77        |
| 333         | AB        | 39,58       | 36,80      | 0,73        |
| 48          | BA        | 41,33       | 37,77      | 0,80        |
| 462         | BA        | 45,43       | 41,88      | 1,09        |
| 380         | BA        | 42,54       | 38,78      | 0,98        |
| 347         | B1        | 49,24       | 45,23      | 1,00        |
| 417         | B1        | 50,35       | 45,62      | 1,01        |
| 429         | B1        | 45,08       | 41,28      | 0,98        |

**Perfil  
B. Nativo.**

| ID cilindro | Horizonte | H% 0,06 bar | H% 330 bar | D. aparente |
|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|
| 11          | A         | 44,06       | 41,36      | 0,52        |
| 4           | A         | 38,37       | 35,41      | 0,52        |
| 5           | A         | 43,81       | 40,66      | 0,59        |
| 100         | AB        | 44,77       | 41,69      | 0,73        |
| 77          | AB        | 43,92       | 40,97      | 0,64        |
| 376         | AB        | 39,49       | 36,71      | 0,71        |
| 127         | BA        | 40,59       | 36,95      | 0,71        |
| 367         | BA        | 40,71       | 37,38      | 0,79        |
| 53          | BA        | 38,34       | 35,31      | 0,75        |
| 136         | B1        | 44,30       | 37,73      | 0,73        |
| 344         | B1        | 40,85       | 35,33      | 0,81        |
| 400         | B1        | 40,37       | 35,14      | 0,78        |



**Anexo 7.**  
**Análisis estadístico**  
**(Resistencia a la penetración y Densidad Aparente).**

Resistencia a la penetración (kg.cm<sup>-2</sup>).

| Perfil  | Prof. cm. | Mínimo | Máximo | Media | Desv. Típica |
|---------|-----------|--------|--------|-------|--------------|
| Testigo | 5         | 0.6    | 2.5    | 1.452 | 0.621        |
| Testigo | 15        | 0.6    | 1.9    | 1.305 | 0.406        |
| Testigo | 25        | 0.7    | 1.6    | 1.167 | 0.263        |
| Testigo | 45        | 0.5    | 2.0    | 1.143 | 0.475        |

| Perfil        | Prof. cm. | Mínimo | Máximo | Media | Desv. Típica |
|---------------|-----------|--------|--------|-------|--------------|
| Tratamiento 1 | 5         | 0.1    | 2.5    | 0.862 | 0.753        |
| Tratamiento 1 | 15        | 0.8    | 4.2    | 2.848 | 0.951        |
| Tratamiento 1 | 25        | 1.5    | 4.5    | 2.748 | 0.820        |
| Tratamiento 1 | 45        | 0.5    | 1.9    | 1.305 | 0.466        |

| Perfil    | Prof. cm. | Mínimo | Máximo | Media | Desv. Típica |
|-----------|-----------|--------|--------|-------|--------------|
| Opuesto 1 | 5         | 0.6    | 3.3    | 2.100 | 0.835        |
| Opuesto 1 | 15        | 0.6    | 3.1    | 2.029 | 1.016        |
| Opuesto 1 | 25        | 0.6    | 2.7    | 1.543 | 0.911        |
| Opuesto 1 | 45        | 2.0    | 3.9    | 2.643 | 0.621        |

| Perfil        | Prof. cm. | Mínimo | Máximo | Media | Desv. Típica |
|---------------|-----------|--------|--------|-------|--------------|
| Tratamiento 2 | 5         | 0.1    | 2.0    | 0.733 | 0.627        |
| Tratamiento 2 | 15        | 0.1    | 3.9    | 1.676 | 1.204        |
| Tratamiento 2 | 25        | 0.1    | 3.0    | 1.462 | 0.875        |
| Tratamiento 2 | 45        | 0.8    | 4.0    | 2.638 | 0.863        |

| Perfil    | Prof. cm. | Mínimo | Máximo | Media | Desv. Típica |
|-----------|-----------|--------|--------|-------|--------------|
| B. Nativo | 5         | 0.5    | 1.7    | 1.038 | 0.335        |
| B. Nativo | 15        | 0.5    | 2.4    | 1.424 | 0.539        |
| B. Nativo | 25        | 0.5    | 1.7    | 1.167 | 0.331        |
| B. Nativo | 45        | 0.5    | 1.5    | 0.876 | 0.264        |

ANOVA de un factor (comparación entre calicatas).

| Profundidad |              | S. cuadrados | G. libertad | M.cuadrática | F      | Significancia |
|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------|---------------|
| 5           | Inter-grupos | 13.700       | 4           | 3.425        | 8.830  | 0.000         |
|             | Intra-grupos | 33.358       | 86          | 0.388        |        |               |
|             | Total        | 47.058       | 90          |              |        |               |
| 15          | Inter-grupos | 31.778       | 4           | 7.944        | 10.954 | 0.000         |
|             | Intra-grupos | 62.372       | 86          | 0.725        |        |               |
|             | Total        | 94.150       | 90          |              |        |               |
| 25          | Inter-grupos | 35.893       | 4           | 8.973        | 20.682 | 0.000         |
|             | Intra-grupos | 37.312       | 86          | 0.434        |        |               |
|             | Total        | 73.206       | 90          |              |        |               |
| 45          | Inter-grupos | 47.425       | 4           | 11.856       | 37.097 | 0.000         |
|             | Intra-grupos | 27.486       | 86          | 0.320        |        |               |
|             | Total        | 74.910       | 90          |              |        |               |

Prueba de Duncan subconjuntos homogéneos.

| Profundidad | Perfil     | 1     | 2     | 3     |
|-------------|------------|-------|-------|-------|
| 5 cm        | Trat. p2   | 0.733 |       |       |
|             | Trat p1    | 0.862 |       |       |
|             | B. nativo  | 1.038 | 1.038 |       |
|             | Testigo    |       | 1.452 |       |
|             | T. opuesto |       |       | 2.100 |

| Profundidad | Perfil     | 1     | 2     | 3     |
|-------------|------------|-------|-------|-------|
| 15 cm       | Testigo    | 1.305 |       |       |
|             | B. nativo  | 1.424 | 1.424 |       |
|             | Trat. p2   | 1.676 | 1.676 |       |
|             | T. opuesto |       | 2.029 |       |
|             | Trat. p1   |       |       | 2.848 |

| Profundidad | Perfil     | 1     | 2     | 3 |
|-------------|------------|-------|-------|---|
| 25 cm       | Testigo    | 1.167 |       |   |
|             | B. nativo  | 1.167 |       |   |
|             | Trat. p2   | 1.462 |       |   |
|             | T. opuesto | 1.543 |       |   |
|             | Trat. p1   |       | 2.748 |   |

| Profundidad | Perfil    | 1     | 2     | 3 |
|-------------|-----------|-------|-------|---|
| 45 cm       | B. nativo | 0.876 |       |   |
|             | Testigo   | 1.143 |       |   |
|             | Trat. p1  | 1.305 |       |   |
|             | Trat. p2  |       | 2.638 |   |
|             | T.opuesto |       | 2.643 |   |

ANOVA de un factor (comparación entre profundidades).

| Perfil     |              | S. cuadrados | G. libertad | M.cuadrática | F      | Significancia |
|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------|---------------|
| Testigo    | Inter-grupos | 1.287        | 3           | 0.429        | 2.030  | 0.116         |
|            | Intra-grupos | 16.900       | 80          | 0.211        |        |               |
|            | Total        | 18.187       | 83          |              |        |               |
| Trat. p1   | Inter-grupos | 63.879       | 3           | 21.293       | 36.071 | 0.000         |
|            | Intra-grupos | 47.224       | 80          | 0.590        |        |               |
|            | Total        | 111.102      | 83          |              |        |               |
| T. opuesto | Inter-grupos | 4.259        | 3           | 1.420        | 1.928  | 0.152         |
|            | Intra-grupos | 17.669       | 24          | 0.736        |        |               |
|            | Total        | 21.927       | 27          |              |        |               |
| Trat. p2   | Inter-grupos | 38.863       | 3           | 12.954       | 15.449 | 0.000         |
|            | Intra-grupos | 67.084       | 80          | 0.839        |        |               |
|            | Total        | 105.947      | 83          |              |        |               |
| B. nativo  | Inter-grupos | 3.370        | 3           | 1.123        | 7.712  | 0.000         |
|            | Intra-grupos | 11.652       | 80          | 0.146        |        |               |
|            | Total        | 15.022       | 83          |              |        |               |

Prueba de Duncan subconjuntos homogéneos.

| Perfil  | Profundidad | 1     | 2     | 3 |
|---------|-------------|-------|-------|---|
| Testigo | 45          | 1.143 |       |   |
|         | 25          | 1.167 | 1.167 |   |
|         | 15          | 1.305 | 1.305 |   |
|         | 5           |       | 1.452 |   |

| Perfil  | Profundidad | 1     | 2     | 3 |
|---------|-------------|-------|-------|---|
| Trat.p1 | 5           | 0.862 |       |   |
|         | 45          | 1.305 |       |   |
|         | 25          |       | 2.748 |   |
|         | 15          |       | 2.848 |   |

| Perfil     | Profundidad | 1     | 2     | 3 |
|------------|-------------|-------|-------|---|
| T. opuesto | 25          | 1.543 |       |   |
|            | 15          | 2.029 | 2.029 |   |
|            | 5           | 2.100 | 2.100 |   |
|            | 45          |       | 2.643 |   |

| Perfil   | Profundidad | 1     | 2     | 3     |
|----------|-------------|-------|-------|-------|
| Trat. p2 | 5           | 0.733 |       |       |
|          | 25          |       | 1.462 |       |
|          | 15          |       | 1.676 |       |
|          | 45          |       |       | 2.638 |

| Perfil    | Profundidad | 1     | 2     | 3     |
|-----------|-------------|-------|-------|-------|
| B. nativo | 45          | 0.876 |       |       |
|           | 5           | 1.038 | 1.038 |       |
|           | 25          |       | 1.167 |       |
|           | 15          |       |       | 1.424 |

Densidad aparente (g·cm<sup>-2</sup>).

| Perfil  | Prof. cm | Mínimo | Máximo | Media  | Desv. Típica |
|---------|----------|--------|--------|--------|--------------|
| Testigo | 5        | 0.49   | 0.78   | 0.6700 | 0.1572       |
| Testigo | 15       | 0.81   | 0.85   | 0.8333 | 2,08E-02     |
| Testigo | 25       | 0.65   | 0.88   | 0.7733 | 0.1159       |
| Testigo | 45       | 0.78   | 0.88   | 0.8433 | 5,51E-02     |

| Perfil        | Prof. cm | Mínimo | Máximo | Media  | Desv. Típica |
|---------------|----------|--------|--------|--------|--------------|
| Tratamiento 1 | 5        | 0.81   | 1.02   | 0.9233 | 0.1060       |
| Tratamiento 1 | 15       | 0.82   | 0.99   | 0.9300 | 9,54E-02     |
| Tratamiento 1 | 25       | 0.96   | 1.05   | 1.0033 | 4,51E-02     |
| Tratamiento 1 | 45       | 0.82   | 1.06   | 0.9367 | 0.1201       |

| Perfil    | Prof. cm | Mínimo | Máximo | Media  | Desv. Típica |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------------|
| Opuesto 1 | 5        |        |        |        |              |
| Opuesto 1 | 15       | 0.85   | 0.96   | 0.9000 | 5,57E-02     |
| Opuesto 1 | 25       | 0.94   | 1.02   | 0.9767 | 4,04E-02     |
| Opuesto 1 | 45       |        |        |        |              |

| Perfil        | Prof. cm | Mínimo | Máximo | Media  | Desv. Típica |
|---------------|----------|--------|--------|--------|--------------|
| Tratamiento 2 | 5        | 0.73   | 0.93   | 0.8033 | 0.1102       |
| Tratamiento 2 | 15       | 0.73   | 0.88   | 0.7933 | 7,77E-02     |
| Tratamiento 2 | 25       | 0.80   | 1.09   | 0.9567 | 0.1464       |
| Tratamiento 2 | 45       | 0.98   | 1.01   | 0.9967 | 1,53E-02     |

| Perfil    | Prof. cm | Mínimo | Máximo | Media  | Desv. Típica |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------------|
| B. Nativo | 5        | 0.52   | 0.59   | 0.5433 | 4,04E-02     |
| B. Nativo | 15       | 0.64   | 0.73   | 0.6933 | 4,73E-02     |
| B. Nativo | 25       | 0.71   | 0.79   | 0.7500 | 4,00E-02     |
| B. Nativo | 45       | 0.73   | 0.81   | 0.7733 | 4,04E-02     |

ANOVA de un factor (comparación entre calicatas).

| Profundidad |              | S. cuadrados | G. libertad | M.cuadrática | F     | Significancia |
|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------|---------------|
| 15          | Inter-grupos | 0.105        | 4           | 2,62E-02     | 6.268 | 0.009         |
| 15          | Intra-grupos | 4,18E-02     | 10          | 4,18E-03     |       |               |
| 15          | Total        | 0.147        | 14          |              |       |               |
| 25          | Inter-grupos | 0.174        | 4           | 4,34E-02     | 5.419 | 0.014         |
| 25          | Intra-grupos | 8,03E-02     | 10          | 8,03E-03     |       |               |
| 25          | Total        | 0.254        | 14          |              |       |               |

Prueba de Duncan subconjuntos homogéneos.

| Profundidad | Perfil     | 1      | 2      | 3      |
|-------------|------------|--------|--------|--------|
| 15 cm       | B. nativo  | 0.6933 |        |        |
|             | Trat. p2   | 0.7933 | 0.7933 |        |
|             | Testigo    |        | 0.8333 | 0.8333 |
|             | T. opuesto |        | 0.9000 | 0.9000 |
|             | Trat. p1   |        |        | 0.9300 |

| Profundidad | Perfil     | 1      | 2      | 3 |
|-------------|------------|--------|--------|---|
| 25 cm       | B. nativo  | 0.7500 |        |   |
|             | Testigo    | 0.7733 |        |   |
|             | Trat. p1   |        | 0.9567 |   |
|             | T. opuesto |        | 0.9767 |   |
|             | Trat. p2   |        | 1.0033 |   |

ANOVA de un factor (comparación entre profundidades)

| Perfil     |              | S. cuadrados | G. libertad | M.cuadrática | F      | Significancia |
|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------|---------------|
| Testigo    | Inter-grupos | 5,70E-02     | 3           | 1,90E-02     | 1.827  | 0.220         |
|            | Intra-grupos | 8,32E-02     | 8           | 1,04E-02     |        |               |
|            | Total        | 0.140        | 11          |              |        |               |
| Trat. p1   | Inter-grupos | 1,24E-02     | 3           | 4,12E-03     | 0.448  | 0.725         |
|            | Intra-grupos | 7,36E-02     | 8           | 9,20E-03     |        |               |
|            | Total        | 8,60E-02     | 11          |              |        |               |
| T. opuesto | Inter-grupos | 8,82E-03     | 1           | 8,82E-03     | 3.725  | 0.126         |
|            | Intra-grupos | 9,47E-02     | 4           | 2,37E-03     |        |               |
|            | Total        | 1,83E-02     | 5           |              |        |               |
| Trat. p2   | Inter-grupos | 9,80E-02     | 3           | 3,27E-02     | 3.279  | 0.080         |
|            | Intra-grupos | 7,97E-02     | 8           | 9,96E-03     |        |               |
|            | Total        | 0.178        | 11          |              |        |               |
| B. nativo  | Inter-grupos | 9,62E-02     | 3           | 3,21E-02     | 18.066 | 0.001         |
|            | Intra-grupos | 1,42E-02     | 8           | 1,78E-03     |        |               |
|            | Total        | 0.110        | 11          |              |        |               |

Prueba de Duncan subconjuntos homogéneos.

| Perfil    | Profundidad | 1      | 2      | 3 |
|-----------|-------------|--------|--------|---|
| B. nativo | 5           | 0.5433 |        |   |
|           | 15          |        | 0.6933 |   |
|           | 25          |        | 0.7500 |   |
|           | 45          |        | 0.7733 |   |