

# Cambios estructurales y distribución de tensiones en suelos sujetos al tránsito de maquinaria\*

Structure change and distribution of stress in soils submitted to wheeling with heavy machinery

ACHIM ELLIES SCH.

Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.

## SUMMARY

Changes in the pore size system and stress distribution produced by transit of forest harvest machines in an Udivitrand, a Palehumult, and a Rhodoxeralf was determined, during different seasons. Stress distribution was determined by horizontally inserted transducers (in a pit) connected to a data logger. The physical and mechanical soil properties were determined on and between the tracks. The penetration depth of the pressure bulbs increases with soil water content. The increase was greater when the subsoil was wet. The concentration factor increases with soil moisture. With similar water content, coarse textured and structured soils presented a lower penetration of the pressure bulbs. Traffic in wet conditions with heavy machinery over a Palehumult or a Rhodoxeralf reduces coarse pores over 50%. With the increment of compaction, mechanical stability increases, presenting a greater bearing capacity and internal cohesion at the expense of coarse pores. With subsoiling a portion of coarse pores were recovered but the mechanical stability was very low for posterior traffic.

*Key words:* soil strength, load bearing capacity, concentration factor, pore size distribution.

## RESUMEN

En un Udivitrand, Palehumult y Rhodoxeralf se evaluaron los cambios del sistema poroso y en la distribución de las tensiones producidas por el efecto del tráfico de la maquinaria de cosecha forestal, durante distintas estaciones del año. La distribución de las tensiones se determinó con transductores insertados horizontalmente en el perfil y conectados a un acumulador de datos. Sobre y entre las huellas se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de suelo.

La profundidad penetración de los bulbos de presión aumenta con la humedad del suelo. Un factor determinante es la humedad del subsuelo. Mientras más húmedo el suelo tanto más aumenta el coeficiente de concentración. A igual contenido de humedad, en los suelos de textura gruesa o los más estructurados, menor la penetración de los bulbos. El tráfico con equipo pesado sobre un Palehumult o Rhodoxeralf con una humedad equivalente a otoño reduce en más de 50% la porosidad gruesa. Con la compactación el suelo adquiere una mayor estabilidad mecánica incrementando la capacidad de soporte y cohesión a expensas del sistema poroso.

El subsolado permite recuperar parte de la porosidad gruesa perdida por compactación, pero la estabilidad mecánica es muy baja para posteriores tráficos.

*Palabras claves:* tensiones del suelo, capacidad de soporte de cargas, factor de concentración, distribución de poros por tamaño.

## INTRODUCCION

La destrucción de la estructura del suelo con equipos pesados incrementa la erodabilidad. La magnitud del patrimonio "recurso natural suelo"

en Chile involucra a más de 35.000 ha cosechadas anualmente. Esto impone la necesidad de estudiar el efecto que tiene la maquinaria en el suelo, con el fin de prevenir daños irreversibles para la sustentabilidad del uso de los suelos.

\* Trabajo financiado por el proyecto FONDECYT 1970301 y presentado en X Silvotecna. IUFRO Conference. Site Productivity Improvement.

En las últimas cuatro décadas el peso de los tractores agrícolas y de las máquinas de cosecha forestal incrementó en tres y la potencia cinco veces. El mejoramiento de la maquinaria en la relación potencia/peso indujo a su utilización en épocas inadecuadas, en particular cuando el suelo conserva aún un alto contenido de humedad. Como resultado se observan daños irreversibles en suelos que, originalmente, presentaban un elevado potencial de arraigamiento.

La compactación de un suelo equivale a la reducción de su profundidad y a una disminución del volumen arraigable, lo que frena el crecimiento vegetal (Kinney *et al.* 1982). Es necesario disponer de informaciones sobre el peso que puede soportar un suelo, sin que se compacte irreversiblemente. Un desarrollo sustentable de la actividad forestal implica necesariamente la conservación del potencial productivo del suelo, recurso sobre el cual se fundamenta esta actividad (Ellies y Horn 1996; Hartwig 1994). Este desarrollo sustentable y sustentabilidad ambiental comprende a la conservación del "capital natural" (en este caso el suelo) con todas sus potencialidades, incluyendo el mantenimiento de la renta o valor potencial del recurso.

La deformación o compactación del suelo implica un cambio en la distribución y continuidad del sistema poroso. La porosidad total disminuye y en términos cualitativos los poros finos incrementan en desmedro de los gruesos, reduciéndose la conductividad hidráulica, el potencial redox y la difusión de iones (Sommer 1979; Ellies *et al.* 1994).

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. La compactación involucra la destrucción de la estructura del suelo. En un sistema no intervenido ésta es anisotrópica, con un manejo inadecuado, el suelo se homogeneiza, tendiendo a la isotropía, presentando un sistema poroso poco variable y de orientación horizontal (Ellies y Hartge 1990). 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. La disminución en el rendimiento generada por compactación en maíz oscila entre un 13% a un 50% (Kinney *et al.* 1982).

En cortas a tala rasa, las huellas alcanzan de 600 a 900 m/ha, ocupando un 20 a 40% de la superficie cosechada (Gayoso *et al.* 1991). El área total afectada con el tráfico puede llegar hasta un 80% (Wästerlund 1992). En las huellas la densidad aparente incrementa hasta en 1.85 veces; la pérdida de crecimiento en altura en la rotación siguiente de *Pinus radiata* alcanza hasta un 50%. Debido al rápido ciclo de las rotaciones de pino y eucalipto se produce un problema acumulativo. Es común subsolar a estos suelos, pero la restitución de los macroporos no supera el 50% (Moehring 1970) y sólo abarca a la angosta línea de la plantación. El resto de la superficie se compacta aún más con el peso de los tractores que arrastran al subsolador. Los resultados de las subsoluciones pueden ser de carácter efímero, debido a que las posteriores prácticas silvícolas que incluyen tráfico trasladan las estratas compactadas a profundidades mayores donde es más difícil soltarlas. La pérdida de productividad por compactación se ha tratado de compensar con la aplicación de mayores dosis de fertilizantes, sin solucionar realmente un problema que es de origen físico.

Las determinaciones de la compactabilidad y compresibilidad en los suelos requiere de metodologías bien definidas y un análisis detallado tanto a escala macro como microscópica para definir las complejas relaciones entre los requerimientos para el desarrollo vegetal y las propiedades físicas de los suelos afectados por cargas externas (Horn y Lebert 1994).

Horn (1980, 1983, 1986) propuso el uso de pequeñas celdas transductoras de presión para determinar la distribución de las tensiones en el suelo. El elemento fundamental de estas celdas es una banda elástica-eléctrica ligada a un cuerpo captador en forma de una banda extensiométrica, que sigue la deformación producida por la carga. Con la deformación se produce un cambio en la resistencia eléctrica, que a su vez genera una nueva diferencia de potencial entre los terminales de la resistencia cuyo cambio es proporcional a la presión aplicada.

Los modelos que estiman la compactación incluyen la predicción de las presiones aplicadas por los vehículos en la interfase suelo-neumático y su propagación en el perfil del suelo. La predicción de la carga superficial aplicada aparenta ser fácil, pero el grado de inflado de los neumáticos, forma de las bandas y profundidad de las estrías de las ruedas, lo hace más complejo. Además, la superfi-

cie de apoyo de una rueda depende de la capacidad de soporte del suelo. Para cuantificar la deformación del perfil se utilizan ensayos odométricos y ensayos de corte (Gupta y Raper 1994).

En este trabajo se analiza la distribución de tensiones y los cambios estructurales producidos por la maquinaria de cosecha forestal en diferentes suelos para distintas condiciones de humedad y manejo. Estas informaciones permiten predecir y cuantificar los cambios estructurales que se producen en el suelo.

## MATERIALES Y METODOS

Las mediciones se realizaron en los siguientes sitios:

- A) Trumao de Precordillera o Udivitrand (cerca del Lago Rupanco) con un sitio bajo bosque nativo y otro donde recién se realizaron faenas de madereo.
- B) Rojo Arcilloso o Palehumult (cerca de Collipulli) con un sitio compactado y otro subsolado con plantaciones recientes de pino (*Pinus radiata* D. Don); las observaciones se realizaron durante distintas estaciones del año.
- C) Rojo Granítico o Rhodoxeralf (cerca de Yumbel) donde se evaluaron los efectos del madereo con variadas condiciones de humedad.

La cuantificación de la distribución de las presiones verticales producidas por la maquinaria se efectuó con 16 celdas transductoras de registro de presión unidimensional. Las celdas se instalaron horizontalmente desde la pared de una calicata por estratas de 10 cm, hasta una profundidad de 75 cm, y separadas entre sí por 20 cm en cada estrata. Las celdas estaban conectadas a un módulo colector de datos múltiple (PERO MEC-32) y éste a su vez a un ordenador. Este sistema permite registrar 20 observaciones por segundo en cada celda (Ellies *et al.* 1996). En la superficie sobre las celdas transitó maquinaria.

Antes y después del tránsito de la maquinaria se determinaron las características físico-mecánicas por estrata del suelo. Se determinó la capacidad de soporte, resistencia al corte y la distribución por tamaño del espacio poroso en muestras de suelos no alteradas extraídas con cilindros por metodologías descritas en Ellies *et al.* (1994) y Gayoso y Ellies (1984).

## RESULTADOS Y DISCUSION

La figura 1 muestra las líneas de isotensión del tránsito de un Skeeder, de dos ejes y 14 t sobre un Trumao de Precordillera, una vez sobre un suelo virgen bajo bosque nativo y después de las faenas de madereo. En el sitio con suelo virgen, la penetración de las líneas de tensión es uniforme tanto en el sentido vertical como horizontal. La distribución regular de las líneas de presión sugiere que la carga es soportada por el suelo debido a su estructura intacta y por la densa malla radical.

Al aumentar la frecuencia del tráfico como ocurre con el madereo la estructura se destruye porque el suelo es amasado y se destruye la malla radical. Esto disminuye la capacidad de soporte y las líneas de tensión penetran a una mayor profundidad y alteran al suelo. Este ejemplo señala que un suelo con una estructura intacta resiste más la acción del tráfico. Cuando ésta se destruye, las pérdidas cualitativas aumentan.

En la figura 2 se muestran las líneas de isotensión producidas por la carga de un tractor de sólo 4 t sobre un suelo Rojo Arcilloso durante el verano e invierno, para un sitio subsolado y otro compactado. La penetración de las isolíneas es leve en el sitio compactado en condiciones secas; toda la carga es disipada por el suelo superficial. Esto permite inferir que el coeficiente de concentración es pequeño en un suelo duro. En el sitio subsolado la orientación de las cargas es alrededor de un eje vertical, la carga profundiza. Esto sugiere que el tráfico sobre sitios subsolados aun con equipos livianos debe evitarse, porque la estructura artificial es inestable. Al traficar en estos sitios las vías deben ser perpendiculares a las líneas de subsolación, para que el suelo compactado soporte una parte de la carga.

Con el aumento del contenido de humedad en ambos sitios, la penetración de la carga es mayor. En las estratas profundas se llega a altos valores de tensión. Si el suelo no tiene la resistencia suficiente el cambio que se produce en la estructura compromete a estratas más profundas del suelo, y éstas son más difíciles en restaurar.

La figura 3 muestra la penetración de las isolíneas de tensión producidas por un cargador lleno con 30 t sobre un suelo Rojo Granítico, en distintas estaciones climáticas. La magnitud y distribución de una misma carga sobre el suelo difieren entre las estaciones.

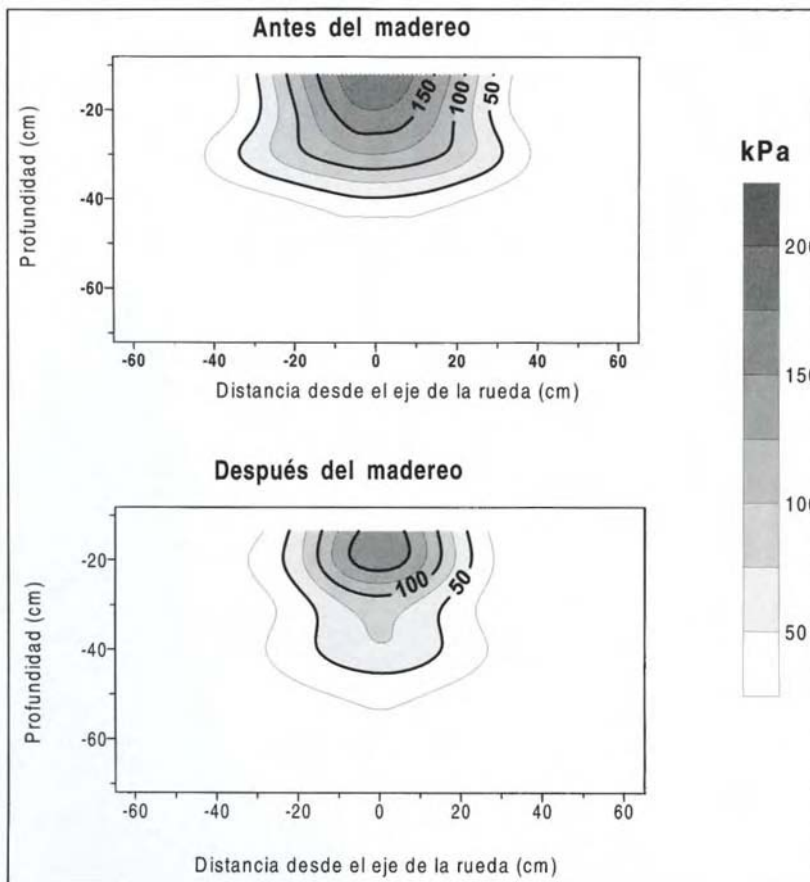


Figura 1. Distribución de las tensiones en un Udivitrاند (Trumao de Precordillera) antes y después de las faenas de madereo.

Strength distribution in an Udivitrاند before and after harvesting

El tráfico invernal aun cuando produce huellas profundas sobre el suelo sus tensiones no son tan altas como a las que se llega en las otras estaciones. Esto se debe a que en un suelo saturado se producen presiones neutrales, es decir, parte de las cargas es soportada por presiones hidrostáticas. En estas condiciones se produce un amasado del suelo y cuando éste se seca se contrae aumentando la densidad aparente.

Cuando el suelo se encuentra seco en la superficie y mojado en profundidad, como ocurre durante la primavera, gran parte de la carga se disipa en el suelo superficial, y sólo una fracción se trasladada en profundidad.

La mayor profundización de las líneas de isotensión se produce cuando el suelo superficial se encuentra mojado y el subsuelo húmedo a seco, situación que representa una condición otoñal. Como el suelo superficial no soporta las presiones

ejercidas por la carga, éstas se disipan a mayores profundidades. Esto abarca un mayor volumen del suelo y las magnitudes a que se llega también son altas. Esto permite inferir cambios estructurales hasta capas muy profundas.

La figura 4 esquematiza para los ejemplos dados en la figura 3 los cambios que experimenta el coeficiente de concentración en profundidad con los distintos contenidos de humedad en el suelo. Un coeficiente alto indica que el efecto de una carga penetra a mayor profundidad en el suelo. Un coeficiente pequeño señala que la disipación se produce en la superficie.

La figura 4 muestra que el coeficiente de concentración siempre es más alto en las estratas más húmedas; en otoño es alto en la superficie y bajo en profundidad. Lo contrario sucede durante la primavera. Esto sugiere que en este caso el tráfico primaveral produce menos daños estructurales, que

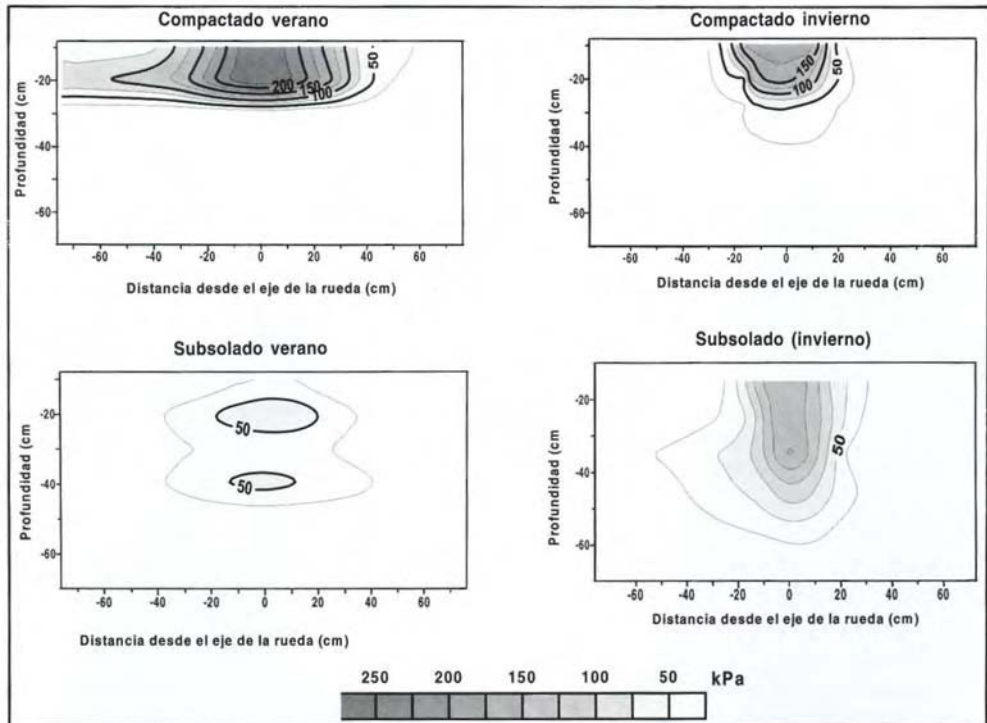


Figura 2. Distribución de las tensiones en un Palehumult (Rojo Arcilloso) con distintos manejos y contenidos de humedad.

Strength distribution in a Palehumult with different management and water contents.

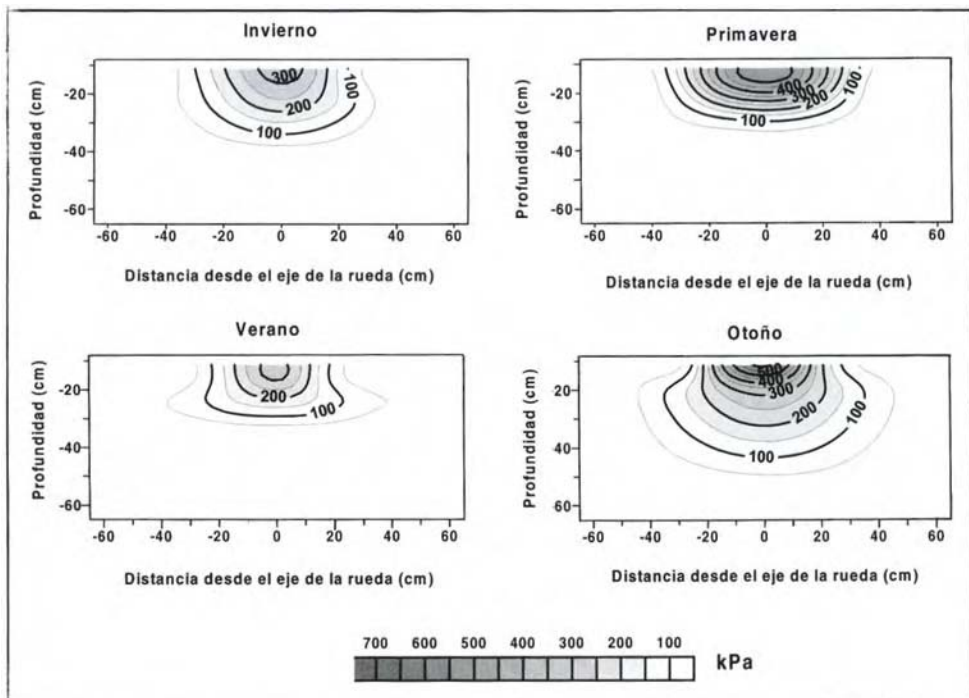


Figura 3. Distribución de las tensiones en un Rhodoxeralf (Rojo Granítico) durante distintas estaciones climáticas.

Strength distribution in a Rhodoxeralf during different climatic seasons.

uno otoñal, porque la magnitud de la carga no llega a las estratas más profundas. Es decir, en primavera se podría operar con un equipo liviano, mientras que en otoño éstos producen daños en la superficie.

La figura 5 señala los cambios que experimenta la densidad aparente en distintas profundidades en un suelo Rojo Granítico, al ser transitado con distintos contenidos de humedad con un cargador de más de 30 t. Estos antecedentes son complementarios a las informaciones entregadas en la figura 3 y figura 4.

En el suelo seco sólo se producen cambios moderados en la densidad aparente. Los cambios mayores se producen en las épocas más húmedas y afectan hasta las estratas profundas.

La subsolación puede restaurar daños que son relativamente superficiales, pero cuando éstos se presentan a grandes profundidades son irreversibles. La figura 5 señala un área gris. La densidad aparente dentro de este margen puede considerarse adecuada, pero cuando supera  $1.4 \text{ g cm}^{-3}$  la calidad de sitio se restringe severamente.

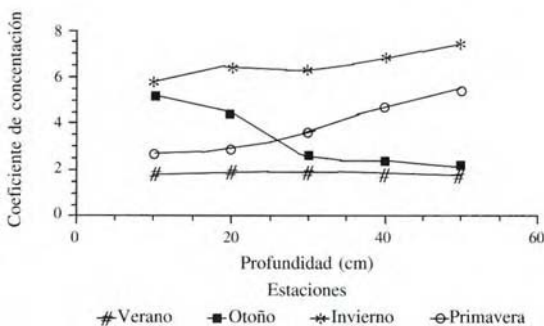


Figura 4. Variación de los coeficientes de concentración en profundidad según estación climática. Variation of concentration factors in depth according to climatic seasons.

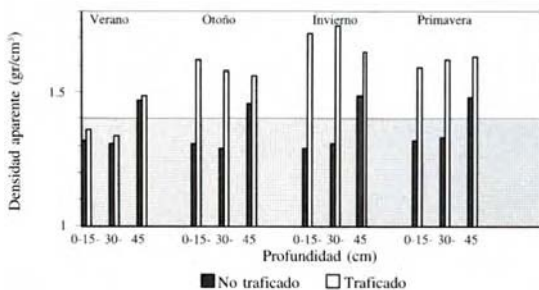


Figura 5. Cambios en la densidad aparente de un Rhodoxeralf (Rojo Granítico) sujeto al tráfico en distintas estaciones climáticas.

Changes in bulk density of a Rhodoxeralf submitted to traffic during different climatic seasons.

Un indicador de la calidad de suelo es el espacio poroso y la distribución de los poros por tamaño. En el espacio poroso se acumulan las reservas de agua y en él se produce el intercambio metabólico de las plantas. En la porosidad gruesa penetran las raíces donde explorarán por agua, aire y nutrientes. Interesa que el suelo tenga un alto volumen de poros gruesos o secundarios. Este tipo de porosidad en los suelos de textura fina depende exclusivamente de la estructura.

En la figura 6 se muestran los cambios que experimenta el espacio poroso grueso debido al tráfico. Una compactación produce una pérdida cuantitativa y cualitativa del espacio poroso; se reducen los poros gruesos e incrementan los finos. Los cambios en la porosidad en el suelo debido a la cosecha forestal son menores.

Cuando el suelo superficial es húmedo se produce una fuerte pérdida en la porosidad total. En la condición saturada, el suelo superficial pierde cerca de un 30% de porosidad total. Esto corresponde a un asentamiento o a una compactación. 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 a las estratas más profundas mientras más húmedo es el suelo.

Para un adecuado desarrollo vegetal se requiere entre 12 y 15% de poros gruesos a muy gruesos para garantizar una aireación e infiltración adecuadas. Una cantidad inferior propende al anegamiento, condiciones de reducción e insuficiente intercambio de gases metabólicos, lo cual restringe el desarrollo vegetal. La falta de poros gruesos favorece la susceptibilidad del suelo a erosionarse debido a un aumento en el escurrimiento superficial. La cantidad de porosidad gruesa remanente

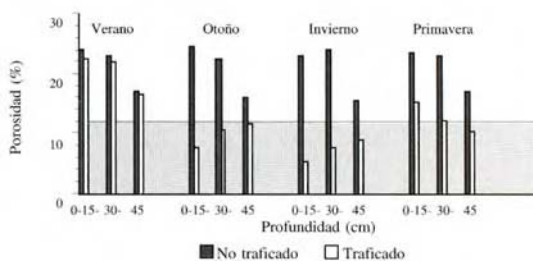


Figura 6. Cambios en la macroporosidad de un Rhodoxeralf (Rojo Granítico) sujeto al tráfico en distintas condiciones climáticas.

Changes in the amount of coarse pores of a Rhodoxeralf submitted to traffic during different climatic seasons.

después del tráfico en condiciones húmedas es menor al mínimo requerido. La mayor destrucción es en los sitios más húmedos y alcanza considerables profundidades.

La figura 7 muestra los cambios estacionales que experimenta el sistema poroso de un suelo Rojo Arcilloso una vez para un sitio compactado y otro subsolado. El espacio poroso se fracciona según tamaño en poros gruesos, o con un diámetro > de 10 μm, poros de agua útil con un diámetro entre 10 -0.2 μm y poros muy finos o inútiles < 0.2 μm de diámetro.

Las primeras dos fracciones de poros afectan el desarrollo vegetal. Este tipo de poros en suelos de textura sólo se generan junto a la estructura. Estas fracciones de poros son muy variables ya que dependen del manejo del suelo. Un cambio estructural necesariamente implica un cambio en el sistema poroso. La cantidad y combinación ideal de las distintas fracciones de poros útiles depende de las condiciones climáticas. En sitios con pocas precipitaciones se requieren una mayor cantidad de poros medios (agua útil) y con abundantes precipitaciones un predominio de poros gruesos.

Con la subsolación del suelo compactado efectuada a fines de verano disminuye la densidad aparente e incrementa notoriamente la fracción de poros gruesos. Esta nueva distribución en el tamaño de los poros no es estable. Con las primeras lluvias invernales se pierde cerca del 50% de la porosidad gruesa. El efímero efecto de una subsolación se debe a que los terrones o agregados formados no son resistentes a la acción dispersora del agua. Los terrones generados con la subsolación se hidratan fácilmente y luego se disgregan a unidades menores. Para que el efecto de una subsolación sea más duradero ésta debe realizarse cuando el suelo se encuentra muy seco, donde el resquebrajamiento produce unidades mayores. Estas unidades al disgregarse con la lluvia disgregan a unidades menores, que en todo caso son mayores que aquellas que resultarían al disgregar un suelo con terrones pequeños.

La figura 8 muestra la capacidad de soporte del suelo Rojo Granítico en distintas condiciones de humedad. La magnitud y sentido de los cambios en las propiedades mecánicas del suelo, después de aplicar una presión sobre él, dependen del contenido de humedad. La capacidad de soporte en verano es alta y llega hasta 230 kPa en sitios no transitados. La presión que ejerce el cargador supera en el suelo superficial ligeramente a este va-

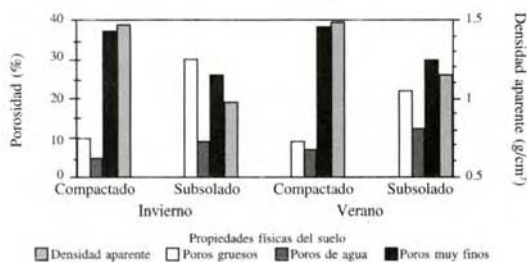


Figura 7. Evolución estacional del sistema poroso en un Palehumult (Rojo Arcilloso) compactado y subsolado. Seasonal evolution of the pore space system of a compacted, subsoiling Palehumult.

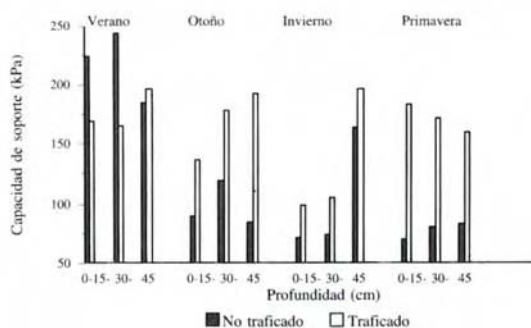


Figura 8. Cambios en la capacidad de soporte de un Rhodoxeralf (Rojo Granítico) sujeto al tráfico en distintas condiciones climáticas.

Changes in the bearing capacity of a Rhodoxeralf submitted to traffic during different climatic seasons.

lor (figura 3) y debido a esto no se producen grandes cambios en el sistema poroso. La capacidad de soporte disminuye ligeramente con el tráfico, porque se produce una molienda de la estructura del suelo superficial.

Durante el otoño la capacidad de soporte de los sitios no transitados baja. La presión que ejerce el cargador hasta 45 cm de profundidad supera a la capacidad de soporte y explica los cambios volumétricos en el sistema poroso. El ancho de la huella de una rueda llega hasta 80 cm (figura 3).

La capacidad de soporte del suelo saturado en la época invernal es muy baja. Sin embargo, las tensiones provocadas por una carga no llegan a valores altos en profundidad (figura 3), porque el peso en parte es soportado por el agua. Esto explica también el mayor ahuellamiento, lo que equivale a un amasado o destrucción de la estructura.



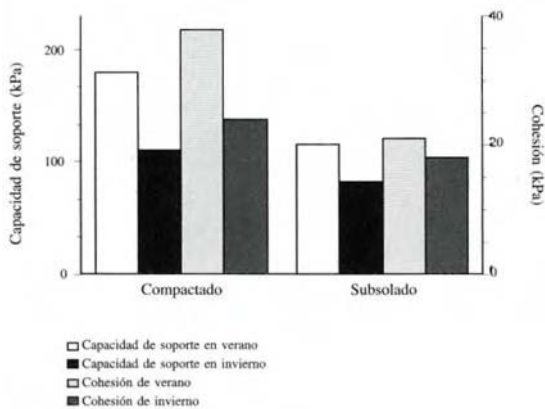


Figura 9. Modificaciones estacionales de la capacidad de soporte y cohesión de un Palehumult (Rojo Arcilloso) compactado y subsolado.

Seasonal evolution in the bearing capacity and internal cohesion of a compacted and a subsoiling Palehumult.

Al transitar sobre un suelo con humedad media aumenta notoriamente la capacidad de soporte; esta mayor resistencia mecánica del suelo se produce a expensas del sistema poroso. Para que el sistema no se modifique, la presión que ejerce la maquinaria debe ser inferior a la capacidad de soporte.

La figura 8 muestra los cambios estacionales de la capacidad de soporte y la cohesión de un Rojo Arcilloso subsolado y compactado. La capacidad de soporte disminuye con un aumento en el contenido de agua en el suelo, pero también con el subsolado incrementa la porosidad. Un incremento en la porosidad gruesa favorece el crecimiento vegetal pero se pierde estabilidad mecánica.

La cohesión determinada con ensayos de corte directo expresa el grado de unión o ligazón que existe entre las partículas primarias. Esta tiene una componente variable o cohesión textural que depende del contenido de humedad y otra más permanente o cohesión estructural. Cuando la textura de un suelo es más fina la cohesión incrementa a medida que éste se seca.

La cohesión permanente o estructural depende de los ligantes efectivos entre las partículas primarias (materia orgánica, óxidos de fierro y aluminio, carbonates, etc.), del arraigamiento y del grado de encaje entre las partículas. Un mayor encaje incrementa la densidad aparente. Para fines de calidad de sitio interesa que la cohesión estructural de un suelo sea alta, ya que ésta se altera menos con los contenidos de humedad.

## CONCLUSIONES

- La profundidad de penetración de las líneas de presión en el suelo aumenta con la humedad, con una estructura deteriorada y en sitios subsolados.
- El coeficiente de concentración aumenta con el contenido de humedad en el suelo.
- El tráfico con maquinaria pesada produce cambios cuantitativos y cualitativos del sistema poroso, se reduce la porosidad total y la porosidad gruesa.
- La porosidad gruesa lograda con una subsolación es efímera.
- La capacidad de soporte del suelo disminuye con un aumento en el contenido de humedad y debe tomarse en cuenta en las faenas de maderero.

## BIBLIOGRAFIA

- ELLIES, A., M. FUNES. 1982. "Morphology and stability of aggregates from Chilean volcanic ash soils", *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd* 143: 530-536.
- ELLIES, A., K.H. Hartge. 1990. "Erfassung der Gefügeveränderung infolge Inkulturnahme von Sekundärurwald in Südchile durch Multivarianzanalysen", *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung*. 31: 380-388.
- ELLIES, A., C. RAMIREZ, R. McDONALD, H. FIGUEROA. 1994a. "Modificaciones estructurales por efecto del tiempo de uso en un Hapludand", *Agro Sur* 22(1): 23-32.
- ELLIES A., R. HORN. 1996. "Mechanische Druckfortpflanzung in vulkanischen Aschenböden bei unterschiedlicher Bewirtschaftungsweise", *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd*. 159: 113-120.
- GAYOSO, A., A. ELLIES. 1984. "Vorbelastung und Verformung als Folge unterschiedlicher Bewirtschaftung von einigen Böden Süchiles", *Z. f. Kulturtechnik u. Flurbereinigung* 25: 39-46.
- GAYOSO, J., A. IROUME, A. ELLIES. 1991. Degradación de suelos forestales asociada a operaciones de cosecha. En: Actas III Taller de Producción Forestal. Grupo de Producción Forestal Fundación Chile. Concepción, 27-29 noviembre, s.p.
- GUPTA, S., L. RAPER. 1994. Prediction of soil compaction under vehicles. En: SOANE and VAN OUWERKERK (ed.): *Soil compaction in crop production*, 71-90 p.
- HARTWIG, F. 1994. *La tierra que recuperamos*. Editorial Los Andes. Serie medioambiente y desarrollo. Santiago, 256 p.
- HORN, R. 1980. "Die Ermittlung der vertikalen Druckfortpflanzung in Böden mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen", *Z. f. Kulturtechnik, u. Flurber.* 21: 343-349 p.
- HORN, R. 1981. Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für mechanische belastbarkeit in dem fuer Tritt relevanten Auflasbereich. Schriftreihe TU. Berlin 200 p.
- HORN, R. 1983. "Die Bedeutung der Aggregierung für die Druckfortpflanzung in Böden", *Z. f. Kulturtechnik, u. Flurber.*, 24: 238-243 p.



- HORN, R. 1986. "The effects of different types of soil management on the mechanical loading of agricultural soils", *Z. Pflanzenmähr. Bodenkunde*, 149: 9-18.
- HORN, R., M. LEBERT. 1994. Soil compactability and compressibility. En: SOANE and VAN OUWERKERK (ed.): *Soil compaction in crop production*, 45-69 p.
- KINNEY, G., D. ERBACH, J. BERN. 1992. American Society of Agricultural Engineers. 4: 1135-1139.
- MOEHRING, D. 1970. "Forest soil improvement through cultivation", *Journal of Forestry* 42: 328:331.
- SOMMER, C. 1979. Trafficability and workability. *Mitt. Dtsch. Bodenkde. Ges.*, 29: 1090-2004.
- WÄSTERLUND, I. 1992. "Extent and causes of site damage due to forestry traffic", *Scand. J. For. Res.* 7: 135-14.