

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA DE AGRONOMIA

**Efecto de dos intensidades de pastoreo sobre las propiedades físico-hidráulicas
de un suelo Trumao durante la temporada primavera-verano**

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Agronomía.

Carlos Roberto Alarcón Villegas

VALDIVIA – CHILE

2008

PROFESOR PATROCINANTE:

José Dörner F.

Ing. Agr., Dr. sc. agr.

PROFESOR COPATROCINANTE:

Ignacio López C.

Ing. Agr., Ph. D.

PROFESOR INFORMANTE:

Oscar Balocchi L.

Ing. Agr., M. Sc., Ph. D.

"If you ever get close to a human

And human behaviour

Be ready to get confused....."

Björk

En memoria de

Don Carlos Villegas y Doña Jovina Avila Shäff

(Tata)

(Mámi Jovi)

*Mis recordados y queridos abuelitos, quienes
me entregaron los principales valores de la vida.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios todopoderoso por permitirme alcanzar este objetivo profesional. Terrenalmente deseo agradecer en forma especial a mi Tía Raquel V. por ayudarme siempre, sobre todo en mi “vida universitaria” y también a mi querido hermano Helmuth (Mutti), por darme fuerzas cuando me sentía agobiado con el estudio. A mis Padres les agradezco su esfuerzo por haberme dado educación. A mis queridas Tías Nancy y Oriana además de mis Tíos Carlos Hernán y Fredy por aconsejarme y apoyarme en momentos difíciles y puntuales de mi vida. También a mis primos Angelo y Alejandro (mis hermanos menores) por hacerme reír con sus “travesuras”

No puedo dejar de expresar mis agradecimientos al profesor José Dörner por instruirme en las ciencias físicas del suelo y guiarme en ésta tesis la cual “llegó a buen puerto.....”. También a los profesores I. López y O. Balocchi por sus aportes constructivos para está investigación.

Además debo agradecer a todo el personal del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos que incluye al cuerpo docente, laboratoristas (física y química), auxiliar y administrativos, quienes siempre se mostraron dispuestos para ayudarme a resolver cualquier inquietud o consulta técnica, son todas personas muy amables y atentas. En forma especial a Maritza del IIAS y también a Cristián O. candidato a doctore en Ciencias Agrarias.

Quiero agradecer a compañeros-amigos que hice en la Facultad y sobre todos a los de la mención como Mauricio H. Cesar L. Alex M. Patty P. Carolina O. y J. Pablo S. Además de mis amigos de “carrete”; David M, Cristian A, Marcelo, G. Nelson U. Alejandro M. y Jorge V.

Y a todas aquellas personas que me brindaron su sincera y desinteresada amistad durante esta larga etapa de mi vida. Por último agradecer a mi fiel y extinto perro "Güber" quien me acompañó durante largos 16 años.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Manejo de pastoreo directo.	3
2.1.1	Intensidad del pastoreo en la producción animal	5
2.1.1.1	Manejo de la intensidad de pastoreo sobre el rebrote y la persistencia	6
2.1.2.		7
	Frecuencia de pastoreo	
2.1.3	Carga animal	7
2.1.4	Carga animal instantánea	7
2.2	Efectos del pastoreo directo sobre el sistema pastoril.	8
2.2.1	Efecto del pastoreo directo sobre el suelo	9
2.2.1.1	Capacidad de soporte del suelo	10
2.2.1.2	Precipitaciones y humedad del suelo	11
2.2.2	Efecto de la compactación sobre parámetros cuantitativos del sistema poroso	13
2.2.3	Efectos de la compactación sobre parámetros cualitativos del sistema poroso	14
2.2.3.1	Permeabilidad de aire en el suelo	14
2.2.3.2	Conductividad hidráulica en fase saturada	15
3	MATERIAL Y METODO	17
3.1	Material	18
3.1.1	Material edáfico	18
3.1.2	Material de terreno	18
3.1.3	Material de laboratorio	18
3.2	Método	19
3.2.1	Manejo de pastoreo	19

3.2.2	Recolección de muestras de suelo	20
3.2.3	Análisis de laboratorio para caracterización del suelo	21
3.2.3.1	Análisis textural	21
3.2.3.2	Determinación del contenido de materia orgánica	21
3.2.3.3	Medición de pH al agua	21
3.2.3.4	Medición de pH al cloruro de calcio	21
3.2.4	Análisis físico de suelo	21
3.2.4.1	Determinación de la curva de retención de agua	21
3.2.4.2	Permeabilidad de aire	23
3.2.4.3	Índice de continuidad de poros	24
3.2.4.4	Conductividad hidráulica en fase saturada	25
3.2.5	Análisis probabilístico de precipitaciones	26
3.2.6	Análisis estadístico	26
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	28
4.1	Caracterización general del sitio del experimento	28
4.1.1	pH del suelo	28
4.1.2	Materia orgánica del suelo	28
4.1.3	Textura del suelo	29
4.1.4	Distribución de precipitaciones	30
4.2	Efecto de la intensidad de pastoreo sobre la densidad aparente, espacio poroso y distribución de porosidad	32
4.3	Permeabilidad de aire del suelo	39
4.4	Conductividad hidráulica en fase saturada	44
5	CONCLUSIONES	47
6	RESUMEN	48
7	SUMMARY	49
8	BIBLIOGRAFIA	50

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Clasificación de poros	13
2	Caracterización química y textural del suelo que sustenta la pradera	30
3	Distribución de precipitaciones acumuladas en bisemanas	31
4	Resultados de densidad aparente y espacio poroso según intensidad de pastoreo	34
5	Distribución de porosidad según intensidad de pastoreo	35
6	Comparación de rectas de regresión ka/ϵ_{α} para dos intensidades de pastoreo.	43

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Interacción entre el suelo, la planta y el animal dentro del sistema de pastoreo	5
2	Efecto de la altura sobre el crecimiento neto de una pradera	6
3	Factores que regulan la intensidad y duración de efectos del pastoreo	8
4	Esquema del sistema suelo en forma trifásica	9
5	Determinación de la capacidad de soporte de un suelo (Valor de preconsolidación)	11
6	Capacidad de soporte de suelos a diferentes niveles de	12
7	humedad	17
8	Parcela experimental. Sector Santa Rosa	20
9	Esquema de la parcela experimental	31
10	Precipitación acumulada bisemanal para la ciudad de Valdivia	35
11	Curva de retención de agua para las dos intensidad de pastoreo	39
12	Permeabilidad de aire para dos intensidades de pastoreo a distintas tensiones mátricas	41
13	Permeabilidad de aire en función del volumen de poros llenos con aire para las dos intensidades de pastoreo	44
	Conductividad hidráulica para las dos intensidades de pastoreo	

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Análisis de Varianza para la densidad aparente en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	63
2	Análisis de Varianza para el espacio poroso en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	63
3	Análisis de Varianza para los PDR en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	63
4	Análisis de Varianza para los PDL en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	64
5	Análisis de Varianza para los PAU en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	64
6	Análisis de Varianza para los PAI en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	64
7	Análisis de Varianza para permeabilidad de aire a -60 hPa de presión en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	65
8	Análisis de Varianza para permeabilidad de aire a -150 hPa de presión en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	65
9	Análisis de Varianza para permeabilidad de aire a -330 hPa de presión en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	65
10	Análisis de Varianza para permeabilidad de aire a -500 hPa de presión en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	66
11	Análisis de Varianza para el índice de conductividad de aire en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	66
12	Análisis de Varianza para Ks (hora 1) en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	66
13	Análisis de Varianza para Ks (hora 6) en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	67
14	Análisis de Varianza para Ks (hora 12) en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	67

15	Análisis de Varianza para Ks (hora 24) en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	67
16	Comparación de las Rectas de Regresión en dos tratamientos 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo	68

1 INTRODUCCION

La función principal de la pradera es sustentar al ganado en producción, pero a su vez es el suelo quien sustenta éste sistema productivo. Siendo así, se hace necesario realizar un manejo sostenible, minimizando el impacto ambiental que provoca ésta actividad, principalmente sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, las que en conjunto son capaces de sustentar al sistema pastoril.

El pastoreo directo es una práctica comúnmente utilizada en la zona sur de nuestro país, siendo además la forma más económica de alimentación para el ganado en producción. Esto implica técnicas propias del manejo de praderas, las cuales tienen como fin principal optimizar la utilización de las especies prateras para obtener una alta productividad por unidad de superficie. Para lograr una mayor eficiencia de la pradera se utiliza un variable conocida como intensidad de pastoreo, la cual puede ser expresada de acuerdo a la altura de residuo. A una menor altura de residuo el animal aprovecha de mejor forma la pradera pero a su vez permanece por mayor tiempo transitando y pisoteando el suelo. Por el contrario, a una mayor altura de residuo el animal se va a retirar antes del sitio, por lo que dejará una proporción de fitomasa mayor no aprovechada, pero el tránsito y pisoteo será menor.

El análisis físico es una herramienta para evaluar el suelo, ya que ante un pastoreo directo y continuo en el tiempo el resultado puede ser la compactación, lo que ocurrirá si la presión ejercida en la superficie del suelo supera la capacidad de soporte de éste, quedando sujeto al contenido de agua en el suelo. El tránsito y pisoteo animal provoca una destrucción de la estructura del suelo obligando a una redistribución de la porosidad pudiendo verse afectada la capacidad de intercambio gaseoso, el movimiento de agua y el transporte de calor.

La realización de esta tesis es parte de un estudio a largo plazo que tiene por objetivo determinar criterios para alcanzar una alta eficiencia de pastoreo, en donde esta investigación evaluará el efecto del pastoreo intensivo sobre atributos físicos del suelo.

Basándose en estos antecedentes, se ha establecido como hipótesis que:

- Un incremento en la intensidad de pastoreo durante la temporada primavera-verano no disminuye significativamente la porosidad de un suelo Trumao.

De la hipótesis se desprende el siguiente objetivo general:

- Determinar el efecto de dos intensidades de pastoreo sobre las características cuantitativas y aspectos funcionales del sistema poroso.

Y como objetivos específicos de esta tesis se plantean evaluar el efecto de la altura de residuo sobre:

- La densidad Aparente, el espacio poroso y su distribución.

- La permeabilidad de aire y conductividad hidráulica.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manejo del pastoreo directo.

Para FULKERSON y DONAGHY (2001), corresponde a la interacción entre las plantas de la pradera y el pastoreo animal. Sin embargo, el manejo del pastoreo ha sido separado en las disciplinas de agronomía versus la producción animal. En el plano agrícola, generalmente se ha centrado en la satisfacción de los requerimientos nutritivos de los animales en lugar de comprender la manera en que la planta responde al manejo que se le impuso, y cómo esto es modificado por las condiciones ambientales.

Según el FONDO PARA LA INNOVACION AGRARIA (FIA) (2006), el manejo del pastoreo es una herramienta eficaz para mejorar la utilización de las praderas y obtener una elevada producción animal por hectárea. La eficiencia en la utilización de las praderas para pastoreo en la zona sur de Chile, se identifica como uno de los principales factores que determinan su productividad, con repercusiones sobre la rentabilidad y competitividad de las explotaciones ganaderas.

CUEVAS (1980), señala que el control del pastoreo consiste en el manejo de los animales en un conjunto de pasturas, con el objetivo de cubrir los requerimientos de los animales mediante los siguientes objetivos:

- a) Incrementar al máximo la utilidad económica.
- b) Mantener un sistema productivo estable.
- c) Reducir al mínimo los momentos de “stress” del animal.

BALOCCHI *et al.* (2002), señalan que en el sur de Chile, los sistemas de producción lechero basan la alimentación principalmente en el pastoreo directo de praderas permanentes. MAYNE Y THOMAS (1986), citados por BALOCCHI *et al.*

(2002), mencionan que la producción en estos sistemas es dependiente, del consumo y calidad del forraje disponible, además del número y productividad de los animales utilizados.

PARGA (2006), señala que, existen dos aspectos importantes que debe considerar la gestión técnica de una explotación lechera. Uno de ellos es maximizar la producción de forraje de alta calidad por hectárea, y optimizar su oportuna utilización por el ganado. Por lo tanto, la producción de leche por hectárea, constituye uno de los elementos claves de la rentabilidad predial, siendo la resultante de la interacción entre la capacidad sustentadora de la pradera y el rendimiento individual de los animales que la consumen.

El manejo del pastoreo lleva implícito el control de un sistema complejo que incluye animales, pastizales y suelos, los cuales están íntimamente relacionados siendo además afectados por las condiciones climáticas. El hombre debe manejar una cantidad de factores para que este sistema tan complejo, sea productivo, eficiente y sobre todo sostenible en el tiempo. El éxito en el manejo del pastoreo se logrará cuando se logre una ponderación verdadera, real, equilibrada y armónica de los factores que comandan al sistema (PIZZIO y PALLARES, 2002).

GREENWOOD y MCKENZIE (2001), señalan que en los sistemas de pastoreo en base a praderas permanentes, existen escasas oportunidades para mejorar las condiciones físicas del suelo a través de la labranza, por lo tanto, es importante comprender los efectos del pastoreo sobre las propiedades físicas del suelo y los efectos consiguientes de esas propiedades sobre el crecimiento de la pradera y su composición. El mantenimiento de una pradera vigorosa debe ser un objetivo importante en el manejo de la pradera, además de mantener las condiciones físicas del suelo en forma aceptable.

Todas las prácticas agrícolas deben reducir al mínimo la compactación, erosión, contaminación, las emisiones de gases de efecto invernadero y por sobre todo maximizar la salud de los suelos; que corresponde a la capacidad que un suelo tiene para cumplir con las variadas funciones que existen en un ecosistema y su entorno. A

su vez las praderas también deben ser manejadas para mantener un pasto saludable que pueda maximizar la productividad, y, que al mismo tiempo, minimice los efectos negativos sobre el suelo (FARM MANAGEMENT ISSUES, 2002).

Las interacciones entre el suelo las plantas y los animales en los sistemas de pastoreo directo (Figura 1), hacen que sea difícil tratar por separado los efectos que produce el pisoteo-tránsito animal, la defoliación y el retorno por excretas (GREENWOOD y MCKENZIE, 2001).

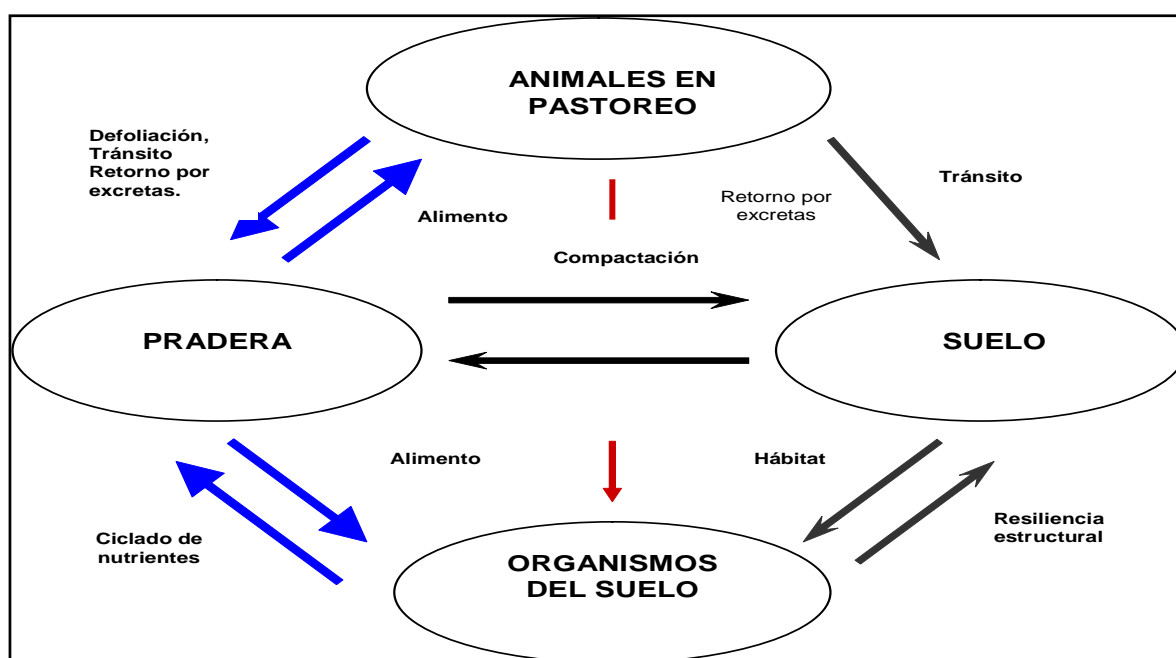


FIGURA 1. Interacción entre el suelo, la planta y el animal dentro del sistema de pastoreo.

FUENTE: GREENWOOD y MCKENZIE (2001).

2.1.1 Intensidad del pastoreo en la producción animal. ROMERO (1993), define la intensidad de pastoreo, como la cantidad de hierba o residuo que es dejado después del pastoreo. Esto puede ser expresado como altura de residuo o área foliar residual. HERNANDEZ (2005), complementa diciendo que la intensidad de corte o de pastoreo depende del número de animales en pastoreo, variable que a su vez depende de la decisión de la persona que administra los recursos del predio.

Según PARGA (2006), a medida que aumenta la altura o fitomasa del residuo, aumenta el consumo de forraje por animal producto de la menor presión de pastoreo pero simultáneamente disminuye la eficiencia de la utilización de la pradera y la calidad de los rebrotes subsiguientes. Por el contrario, pastoreos muy intensos además de reducir severamente el consumo y rendimiento animal individual, dejan un residuo muy escaso que es insuficiente para sostener un rebrote vigoroso.

2.1.1.1 Manejo de la intensidad de pastoreo sobre el rebrote y la persistencia. Según FULKERSON y SLACK (1995), citados por FULKERSON y DONAGHY (2001), alturas de defoliaciones cercanas a los 5 cm optimizan el crecimiento y la persistencia en Ballica inglesa (*Lolium perenne*), a su vez, severas defoliaciones (2 cm), remueven demasiados carbohidratos, afectando la capacidad de rebrote y persistencia de la especie; mientras que defoliaciones más suaves (12 cm), se transforman en una pérdida de materia seca disponible producto de la senescencia de hojas, (Figura 1).

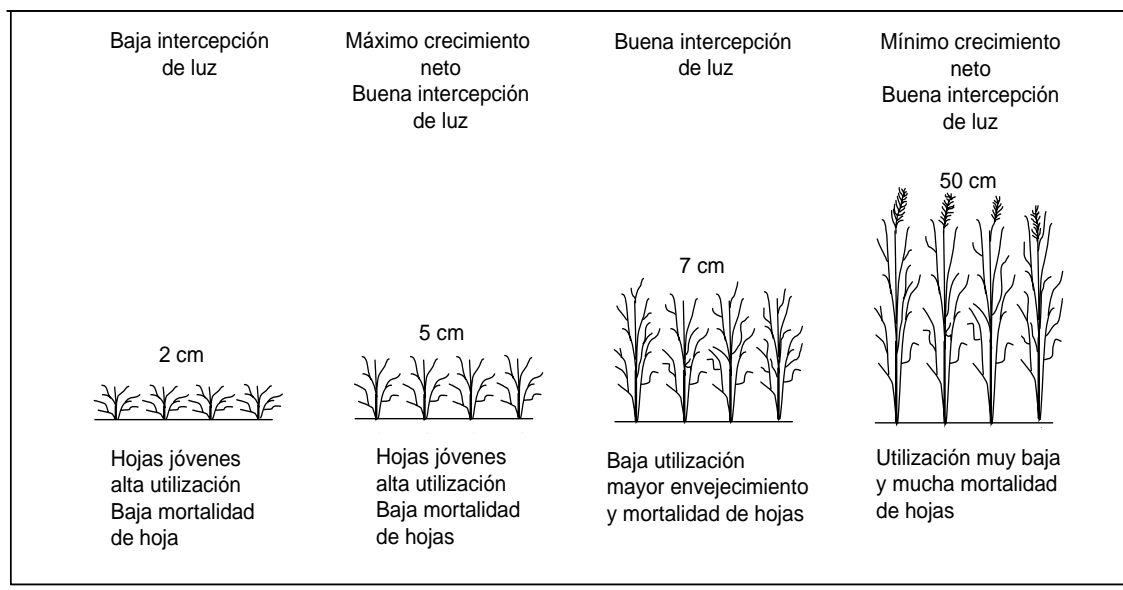


FIGURA 2. Efecto de la altura sobre el crecimiento neto de una pradera.
FUENTE: HILL FARMING RESEARCH ORGANIZATION (1985) adaptado por BALOCCHI (2001).

Además FULKERSON y DONAGHY (2001), recomiendan que la altura de residuo o intensidad de pastoreo en *Lolium perenne* debiera ser hasta los 5 cm, ya que bajo esta altura se encuentran los carbohidratos de reserva y el pastoreo bajo este nivel afectaría inevitablemente el rebrote.

2.1.2 Frecuencia de pastoreo. Es el intervalo de tiempo entre sucesivas defoliaciones. Puede ser expresado a través de un periodo de tiempo dado, de una cierta altura de la pradera, o de una cierta cantidad de residuo o hierba masa (ROMERO, 1993).

PARGA (2006), indica que la frecuencia determina la fitomasa pre-pastoreo y con ello, la composición morfológica (proporción de hojas tallos, material muerto) y el valor nutritivo del forraje. Además determina cuando pastorear y, por lo tanto, la calidad nutritiva del forraje y la facilidad o velocidad con que este puede ser consumido por el animal.

2.1.3 Carga animal. Corresponde al número de animales (de un tipo dado) por unidad de superficie y por un tiempo definido. Muchas veces el término es impreciso, ya que no especifica la unidad de tiempo ni el tipo de animal, especialmente el peso (RUIZ, 1988).

Según CARRILLO (2001), el concepto de "carga animal", corresponde al número de animales presentes en un campo y más exactamente, referidos a la unidad de superficie es decir cabezas por hectárea.

2.1.4 Carga animal instantánea. Se refiere a la carga en un periodo corto de tiempo dentro de la superficie que pastorean los animales (RUIZ, 1988). Esto lo complementa GREGORINI *et al.* (2007), diciendo que la carga animal instantánea, se refiere al número de animales por unidad de área que realmente está siendo usada para pastoreo en un tiempo determinado. La frecuencia y la intensidad de defoliación dependen directamente de la carga animal instantánea, la duración del período de pastoreo y la disponibilidad de forraje, las que son características variables del diseño o elección del método de pastoreo.

2.2 Efectos del pastoreo directo sobre el sistema pastoril.

BEGUET (2001), señala que el animal actúa perjudicialmente sobre la pradera de las siguientes formas:

- a) Por pisoteo el animal compacta el suelo, disminuyendo la aireación e infiltración de agua. Además provoca lesiones a las plantas, lo que significa una disminución del forraje cosechable.
- b) Por alteración del balance natural entre especies por selectividad.
- c) Por alteración en el crecimiento de las plantas debido a las deyecciones.

Además, TABOADA (2007), complementa diciendo que el pastoreo directo por ganado ejerce dos tipos de efectos sobre el suelo: la defoliación causada por la ingesta de forraje por los animales; y el pisoteo causado por el tránsito de ganado en la pradera y el suelo. Ambos efectos pueden generar importantes cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo. Los efectos del pastoreo por ganado difieren en su magnitud, entendiéndose por tal a la intensidad y a la duración del efecto causado (Figura 3).

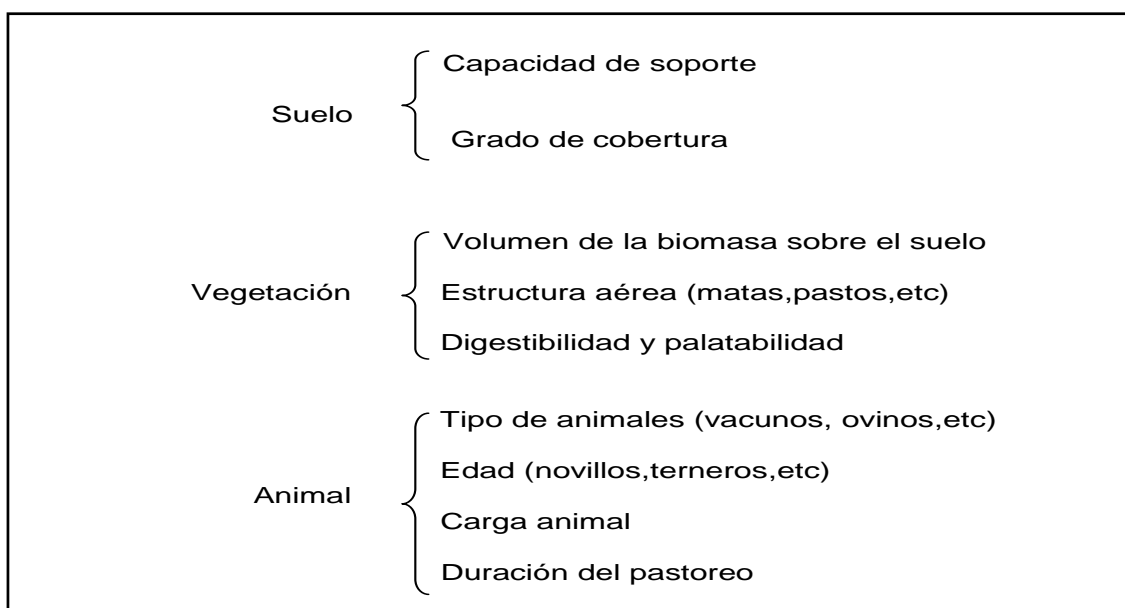


FIGURA 3. Factores que regulan la intensidad y duración de efectos del pastoreo.

FUENTE: Adaptado de TABOADA (2007).

El pastoreo intensivo incrementa la densidad del suelo, disminuyendo la porosidad y continuidad entre los poros, además provoca la eliminación de las especies pratenses lo que ocasiona un aumento en la susceptibilidad a la erosión, que a su vez produce una reducción en la infiltración del agua la cual traerá como consecuencia la disminución del crecimiento de las plantas (BLASER, 1966; GREENWOOD y MCKENZIE, 2001).

2.2.1 Efecto del pastoreo directo sobre el suelo. DREWRY *et al.* (2000), mencionan que el tránsito de ganado, con una alta carga animal y particularmente en condiciones de humedad, puede causar daño a la condición física del suelo.

El suelo es un medio trifásico (Figura 4), que presenta una fase sólida, líquida y gaseosa. El ordenamiento de estas fases es una consecuencia de la generación de estructura (HARTGE y HORN, 1991). Esta propiedad del suelo corresponde a un arreglo u ordenamiento de las partículas primarias y secundarias en ciertos modelos o patrones que incluyen el espacio poroso acompañante (BULLOCK *et al.*, 1985). Las variaciones en la relación entre las distintas fases del suelo dependen en gran medida de su capacidad de soporte.

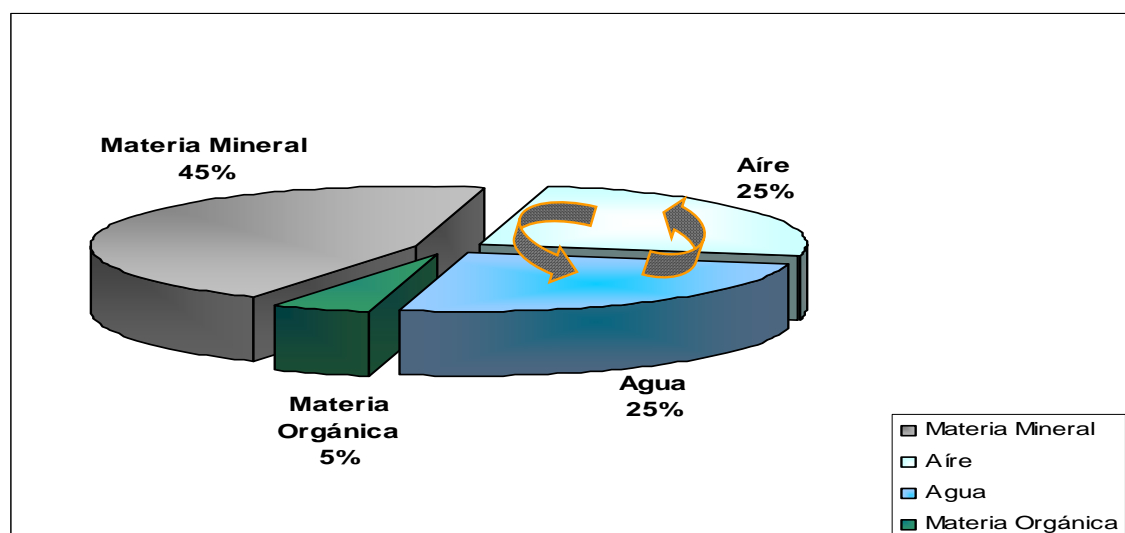


FIGURA 4. Esquema del sistema suelo en forma trifásica.

FUENTE: Adaptado de DAMPIER (2008).

2.2.1.1 Capacidad de soporte del suelo. Propiedad del suelo que también es conocida como valor de preconsolidación (P_v), y corresponde al esfuerzo máximo que es capaz de soportar un suelo sin que se produzca una reducción irreversible del volumen poroso, en otros términos corresponde a una alteración irreversible de la estructura (HORN, 1981).

La compactación del suelo ocurre cuando es sobrepasada su capacidad de soporte (o valor de preconsolidación) lo que genera un aumento en la densidad aparente, se produce además una redistribución del volumen poroso, afectando su funcionalidad expresada a través de la capacidad para conducir agua y aire. Lo anteriormente descrito se traduce finalmente en una reducción en la capacidad de infiltración y de almacenamiento de agua en el suelo, incrementándose al mismo tiempo el riesgo de erosión hídrica (HARTGE y HORN, 1991; HILLEL, 1998).

La compactación esta asociada con fenómenos de deformación interna en el suelo. Ningún cuerpo en la naturaleza es completamente rígido y todos se deforman en mayor o menor grado, dependiendo de la magnitud de la fuerza aplicada sobre ellos. Es importante resaltar que la compactación significa una deformación plástica, que ocurre a expensas del sistema poroso y se traducen en una pérdida de calidad del suelo (CUEVAS *et al.*, 2004).

La capacidad de soporte de un suelo, junto con la cohesión entre las partículas y el ángulo de fricción entre ellos definen la estabilidad mecánica del suelo, propiedades que depende de la textura, estructura, densidad aparente, materia orgánica y del contenido de agua en el suelo (HARTGE y HORN, 1991).

La resistencia del suelo varía en función de la tensión del agua, ya que la estabilidad y la capacidad de soporte se basa en la forma de los meniscos que se forman en torno a los puntos de contactos, predominando las uniones sólido-agua-sólido (HARTGE, 2000). El aumento de la resistencia ocurre tanto por el mayor número de puntos de contacto, en función del arreglo de los agregados como por la mayor resistencia de estos (HORN, 1995).

Según HORN (1981), el manejo silvoagropecuario puede afectar notablemente la estructura del suelo. La magnitud de un cambio estructural depende de la relación existente entre la carga aplicada (σ_n) y la capacidad de soporte del suelo (P_v) (Figura 5).

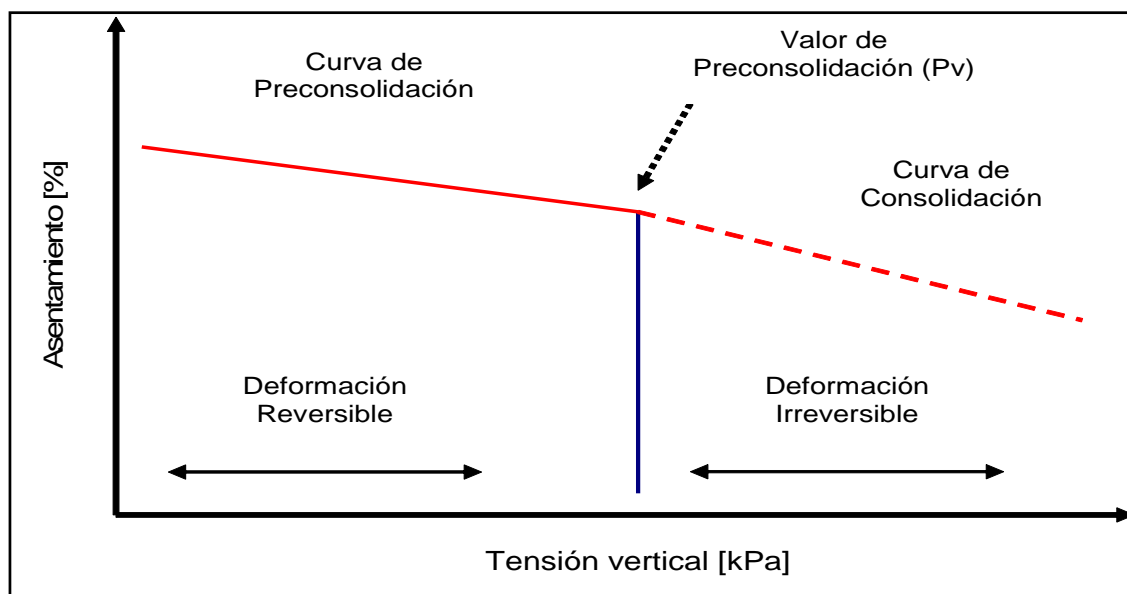


FIGURA 5. Determinación de la capacidad de soporte de un suelo (Valor de preconsolidación)

FUENTE: Adaptado de HORN (1981).

2.2.1.2 Precipitaciones y humedad del suelo. El tránsito y pisoteo animal están íntimamente relacionados a la dinámica del agua, factor que depende principalmente de las precipitaciones según la estación del año, por lo que éstas determinaran el contenido de agua, y el grado de saturación en el suelo (GAVANDE, 1972; KIESSLING, 2005).

Por lo tanto, la capacidad de soporte del suelo, o sea, el comportamiento del suelo frente a una carga (tránsito de maquinaria, animales, etc) depende del contenido de agua en el momento que sea transitado. La influencia del pisoteo animal es principalmente de tipo físico-mecánico, pues afecta el estado de compactación de los primeros centímetros del suelo (TABOADA, 2007). Con humedades elevadas en condiciones invernales, el impacto de la pezuña puede provocar la disminución

volumétrica y la deformación de la superficie del suelo, generándose un medio relativamente inadecuado para la productividad de la pradera (WEIGEL *et al.*, 1990).

Con la disminución del contenido de agua en el suelo aumenta su capacidad de soporte, lo que generalmente ocurre en la época de verano. Bajo estas condiciones, si el tránsito y pisoteo causan la compactación del suelo (cuando la presión ejercida es mayor a P_v), esta se asocia generalmente con una pérdida de macroporosidad dejando una escasa evidencia visual de su daño. En cambio, el pastoreo en altas condiciones de humedad, (época del año con mayor precipitación) da lugar a la ocurrencia de daño por huellas, provocando un suelo totalmente amasado (TABOADA, 2007).

Los Andisoles son suelos que presentan una baja densidad aparente, alta porosidad y una gran cantidad de microagregados, por lo que estas propiedades le confieren excelentes características físico-mecánicas capaces de sobrellevar diferentes manejos agropecuarios. Además pueden presentar una alta capacidad de soporte, con un buen comportamiento ante cargas externas en un amplio rango de humedad (Figura 6). Si bien son suelos altamente compresibles (especialmente cuando están semisaturados), su alta porosidad les asegura mantener un buen nivel de poros posterior a un evento de compresión (SEGUEL, 2004).

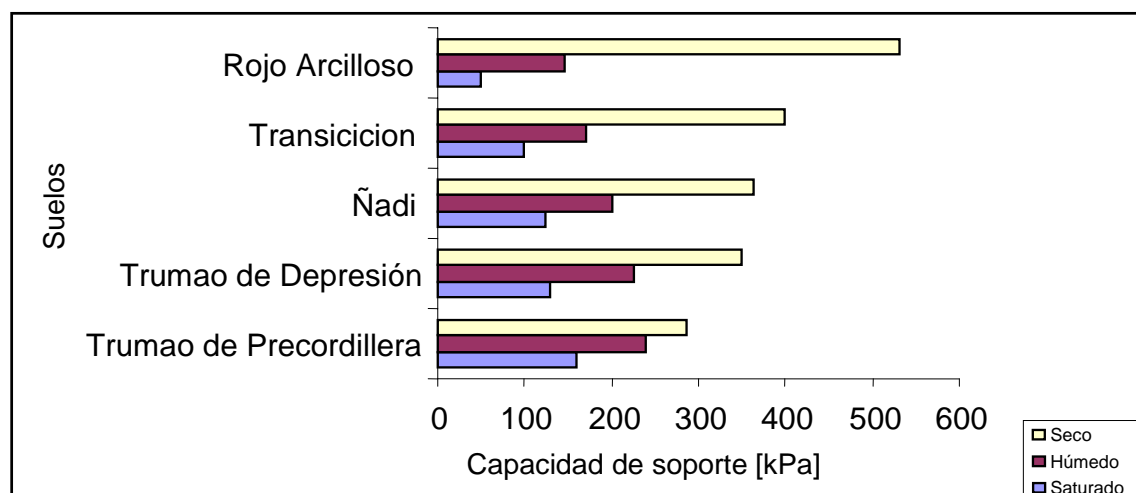


FIGURA 6. Capacidad de soporte de suelos a diferentes niveles de humedad

FUENTE: Adaptado de ELLIES (2003).

2.2.2 Efectos de la compactación sobre parámetros cuantitativos del sistema poroso. El espacio no ocupado por la fase sólida constituye el espacio poroso del suelo que es ocupado por las fases líquidas y gaseosas. La porosidad corresponde a la fracción del volumen total (aparente) que está constituida por poros (SALGADO, 2001).

Una adecuada distribución de poros en el suelo la cual está determinada por el tamaño de los mismos, garantiza la entrada de agua y aire, su circulación, almacenamiento y redistribución entre los horizontes y el óptimo aprovechamiento de los nutrientes (WILSON *et al.*, 2007).

La conectividad del espacio poroso es una importante propiedad topológica del suelo, que junto con la porosidad, el tamaño y la distribución de los poros rigen el transporte de agua, solutos y gases (NEDOREZOVA *et al.*, 1996). El espacio entre los agregados define el tamaño y forma de los macroporos, donde el agua del suelo se almacena y se mueve (TSCHAPEK, 1969; MURAOKA y TZI, 2000).

La distribución de los poros del suelo se obtiene de la curva de retención de agua, de acuerdo a ello la clasificación de los poros se basa en los valores de tensión de las constantes hídricas (Cuadro1).

CUADRO 1. Clasificación de poros de acuerdo a su diámetro equivalente.

Tamaño de los poros [μm]	Clasificación	Tensión [hPa]
> 50	Poros de drenaje rápido	0 - 60
50 - 10	Poros de drenaje lento	60 - 330
10 - 0,2	Poros de agua útil	330 - 15.000
< 0,2	Poros de agua inútil	> 15.000

FUENTE: HARTGE (1971), citado por VYHMEISTER (1980).

Según DEXTER y BIRD (2001), la degradación física del suelo ocurre cuando éste es compactado por fuerzas externas (lluvia o riego, labranza, y pisoteo animal, etc.), provocando una reducción en el volumen ocupado por los poros, en especial aquellos de mayor diámetro. Este efecto produce una resistencia mecánica mayor al

crecimiento de las raíces, limitaciones al intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera.

La labranza y el tránsito modifican la porosidad del suelo, la distribución del tamaño de los poros, y la retención de agua del suelo dando lugar a cambios en las propiedades hidráulicas no saturadas de la capa arable (RICHARD, 2001; STARTSEV y McNABB, 2001).

La degradación de la estructura del suelo, que influye en esta relación, se asocia con el aumento de la densidad aparente y con el cambio en la distribución por tamaño de los poros, de esta forma el sistema radical presenta un desarrollo superficial, poco difuso, con lo cual disminuye la eficiencia de absorción de nutrientes y el aprovechamiento del agua del sub-suelo (ALLENDE, 1993; ELLIES, 1994).

2.2.3 Efectos de la compactación sobre parámetros cualitativos del sistema poroso. Para DÖRNER y HORN (2006), la evaluación de un medio poroso no debe realizarse tan solo a través de sus volúmenes o como se distribuyen los poros sino también a través de la capacidad de transmitir fluidos, como el agua o gases. Esta función de los poros se conoce como conductividad o permeabilidad. La conductividad depende de los atributos del suelo y de los fluidos, mientras que la permeabilidad (también conocida como la permeabilidad intrínseca) considera sólo la propiedad del material. Por lo tanto es una exclusiva propiedad del medio poroso y la geometría de los poros (HILLEL, 1998).

2.2.3.1 Permeabilidad de aire (k_a) en el suelo. Corresponde a un parámetro utilizado para evaluar aspectos funcionales de los poros del suelo (DÖRNER y DEC, 2007).

ROSEBERG y McCOY (1990), señalan que la medición de la k_a del suelo es una herramienta para determinar la influencia de la geometría de los poros en los procesos de transporte en donde sólo los macroporos son los encargados de conducir el aire. Además la k_a también regula la convectividad de aire y el transporte de gas en el suelo dependiendo de los poros llenos con aire que presente el suelo (MOLDRUP, 2003).

A su vez BLACKWELL *et al.* (1990), mencionan que la k_a se relaciona específicamente con la macroporosidad y la organización del espacio poroso. Las características de la porosidad del suelo determinan el transporte de aire y agua a través del suelo. Asimismo, el control de la aireación en los micrositos habitables por organismos en el suelo (GUERIF, 1990).

BALL *et al.* (2000), mencionan que la compactación del suelo es principalmente evaluada mediante el aumento de la densidad aparente, pero además existen una serie de otras mediciones para evaluar las propiedades estructurales tales como la resistencia al penetrómetro de cono, esfuerzo cortante, macroporosidad, permeabilidad al aire y difusividad de gases los cuales también se ven afectados.

Las investigaciones en medios porosos han estado relacionadas principalmente con la caracterización del efecto del cultivo y tránsito sobre el suelo (BALL *et al.*, 1988; ELLIES y MAcDONALD, 1984). Para O'SULLIVAN *et al.* (1992), la compactación disminuye la capacidad de aire (poros llenos con aire a capacidad de campo).

La k_a también puede resultar muy interesante en relación a las emisiones de gases de efecto invernadero, podría ser un posible indicador de las tasas de oxidación de metano en la superficie del suelo (BALL *et al.*, 1997).

Para COREY (1986), factores geométricos como la porosidad total, distribución del tamaño de los poros, la forma del sistema poroso, la continuidad y tortuosidad de los poros, influyen sobre la conducción de fluidos en el suelo. Dichos factores que pueden ser razonablemente bien descritos a través de la permeabilidad de aire del suelo, cambian con el manejo del suelo y afectan la habilidad del suelo para transmitir fluidos (GROENEVELT *et al.*, 1984).

2.2.3.2 Conductividad hidráulica en fase saturada (K_s). DIRKSEN (1999), define la K_s como la habilidad del suelo para transmitir agua, y es un factor importante pues permite conocer el movimiento del agua hacia las raíces de las plantas, la entrada de agua en el suelo y el flujo de agua de drenaje, entre otras situaciones. LU *et al.*, (2004); VANDERVAERE *et al.* (2000), citados por SANDOVAL *et al.* (2007), consideran que K_s

es uno de los descriptores dinámicos y fundamentales de la naturaleza de un suelo, utilizándose a menudo para estimar otros parámetros más complejos de determinar como infiltración y redistribución de agua en el perfil.

REICHARDT (1985), menciona que la K_s es afectada por la textura y estructura del suelo, siendo mayor en suelos altamente porosos, fracturados o agregados y menor en suelos densos y compactados.

La conductividad hidráulica en fase saturada de un suelo describe la funcionalidad de su sistema poroso, englobando propiedades tales como, cantidad, tamaño, morfología, continuidad y orientación de los poros. Debido a que la K_s depende en gran medida de la forma y continuidad del sistema poroso, varía fuertemente de un sitio a otro, y difiere también para las distintas orientaciones del suelo, ya sea vertical u horizontal (ELLIES, 1997; DÖRNER y HORN, 2006).

Además HELAL (1990), citado por SEGUEL (2004), señala que la K_s es un indicador de la calidad y continuidad del sistema poroso. Una consolidación antropogénica que se produce con el tránsito, pisoteo, y laboreo del suelo se refleja en un cambio de la morfología del espacio poroso. Estos se traducen en una pérdida de la porosidad total y en un incremento de la porosidad fina, a expensas de la gruesa.

Autores como GALLICHAND *et al.*, (1990); IVERSEN (2001), señalan que la K_s además de expresar la capacidad de un suelo saturado para transmitir agua, es un parámetro esencial en el análisis de fluidos de agua, transporte químico en el suelo y a menudo se necesita como parámetro de entrada en modelos hidrológicos. Además su estimación facilitaría la solución de problemas que se asocian a la irrigación, drenaje, recarga, y conservación del suelo (REICHARDT, 1985).

HOPMANS *et al.* (2005), señalan que las características del control de flujo y los procesos de transporte en el suelo están dados en gran medida por la estructura del suelo y la geometría de los poros, existiendo además una falta general de experimentos que estudien los efectos de la estructura del suelo y el espacio poroso sobre las características de permeabilidad del aire y del agua.

3 MATERIAL Y METODO

3.1 Material.

La presente investigación se realizó en la estación experimental Santa Rosa propiedad de la Universidad Austral de Chile, coordenadas UTM*, 5.594.808 m Norte y 651.625 m Este, a una altitud 12 m.s.n.

Las parcelas fueron sembradas el 17 de marzo de 2006; las especies correspondieron a Ballica Inglesa (*Lolium perenne* cv. *Arrow*) (25 kg/ha) en mezcla con dos variedades de Trébol blanco (*Trifolium repens* cv. *Will*) (2 kg/ha) y *Trifolium repens* cv. *Huia* (2 kg /ha). Los animales corresponden a vacas en lactancia Frisón negro con un peso aproximado de entre 500 – 600 kg de peso.



FIGURA 7 Parcela experimental. Sector Santa Rosa.

* coordenadas referidas al elipsoide internacional, datum sudamericano 1956.

3.1.1 Material edáfico. El suelo utilizado correspondió a la serie Valdivia derivado de cenizas volcánicas, miembro de la familia media métrica de los Duric Hapludands (Andisol). Ocupa una posición de terrazas remanentes en la depresión de San José, a una altura de 9 a 20 m.s.n.m. Además presenta una textura superficial franco limoso y color pardo oscuro en el matiz 7.5 YR y textura arena francosa y color pardo oscuro en el matiz 7.5 YR en profundidad. El substrato corresponde a una toba, depósito de materiales volcánicos de fuerte compactación y mezclado con clastos alterados, se denomina localmente canagua. El suelo es moderadamente profundo, la topografía es compleja, suavemente ondulada con 5 a 8% de pendiente y con buen drenaje (CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS NATURALES (CIREN), 1999).

3.1.2 Material de terreno. Para obtener las muestras no alteradas se necesitaron los siguientes materiales:

- Palas
- Extractor de cilindros
- Chipote
- Cilindros de acero inoxidable (250 cm³)
- Papel alusa
- Cajas porta-cilindros
- Bolsas polietileno

3.1.3 Material de laboratorio. El estudio se desarrolló en Laboratorio de Física de Suelos Profesor Achim Ellies Schmidt del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos de la Universidad Austral de Chile.

Se utilizaron los siguientes materiales.

- Ollas a presión
- Bandejas de arena
- Permeámetro de agua
- Permeámetro de aire

3.2 Método

La presente investigación necesitó de trabajo en terreno que incluyó la recolección de muestras de suelos. El trabajo de laboratorio consistió en realizar distintas mediciones de tipo físico-hidráulico a las muestras obtenidas, para posteriormente determinar y analizar los resultados.

3.2.1 Manejo de pastoreo

El lugar del experimento presenta una superficie de 3600 m², la que fue dividida en tres bloques y cada bloque quedó subdividido en 6 parcelas de 200 m² de superficie cada uno (Figura 8). Antes de realizar el primer pastoreo, el día, 27 de Octubre de 2006, se realizó un corte de homogenización a la pradera experimental con el objetivo de que las especies pratenses tengan una altura muy similar al momento de entrar a pastorear. El primer pastoreo con animales se realizó el día 13 de Noviembre de 2006.

El manejo del pastoreo para el experimento consistió en seleccionar al azar un número de 7 vacas de la lechería del predio. Las vacas provienen de la primera ordeña del día (en la mañana), las cuales son llevadas a pastorear en el predio experimental en donde entran a una parcela de 200 m². El criterio de entrada para que los animales realicen el pastoreo en las parcelas, se determinó mediante la frecuencia de pastoreo, la cual se encuentra determinada en este experimento por el número de hojas de la ballica inglesa (*Lolium perenne* cv. *Arrow*) que para éste caso es de 2,5 hojas para los macollos. Posteriormente los animales son retirados del sector cuando la pradera logra alcanzar la altura de residuo provocada por la defoliación de los animales que para este experimento corresponde a 5 y 8 cm en la pradera experimental.

La carga animal utilizada en el pastoreo fue de 350 equivalente animal por hectárea. De esta forma, el tiempo necesario para alcanzar la altura de residuo de 5 cm es de aproximadamente 8 horas, y para la altura de residuo de 8 cm se necesitan de 5 horas aproximadamente.

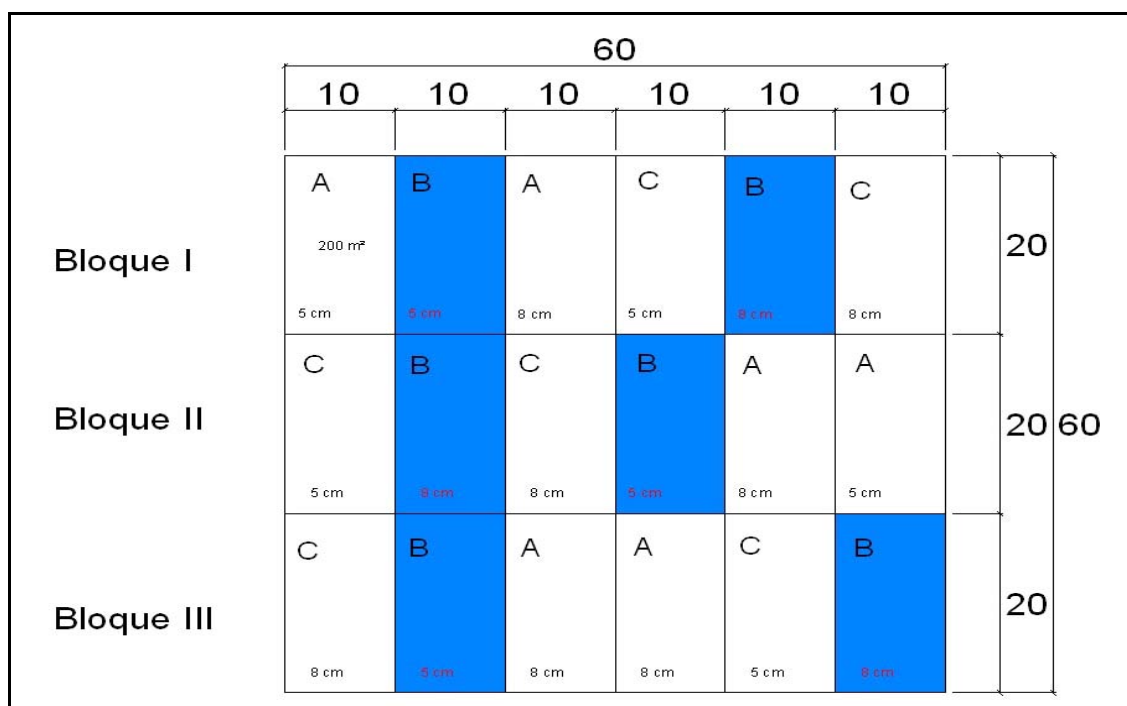


FIGURA 8 Esquema de la parcela experimental.

3.2.2 Recolección de muestras de suelo. El muestreo de suelos, se realizó el 15 de marzo de 2007, recolectando muestras no disturbadas para análisis físico y muestras disturbadas para análisis químico.

Los sectores donde se procedió a tomar las muestras para el análisis físico (parcelas de color azul), correspondieron a parcelas con frecuencias de pastoreo de 2,5 hojas (Figura 8). Por lo que el experimento se compone de dos tratamientos con tres repeticiones.

Se recolectaron un total de 96 cilindros de 250 cm³ (muestras no disturbadas) del horizonte superficial del suelo 0 - 10 cm de profundidad. Del total de cilindros, 36 se utilizaron para elaborar la curva de retención de agua, específicamente 6 cilindros por parcela, lo que da un total de 18 cilindros por tratamiento (5 y 8 cm de altura de residuo). Los otros 60 cilindros restantes se usaron para determinar la conductividad hidráulica en fase saturada, específicamente 10 cilindros por parcela, lo que da un total de 30 cilindros para cada tratamiento.

3.2.3 Análisis de laboratorio para caracterización del suelo

3.2.3.1 Análisis textural. Este se realizó con el propósito de determinar la distribución de partículas que constituyen el suelo. Para la determinación de la textura se utilizó el método de Day (FORSYTHE, 1974).

3.2.3.2 Determinación del contenido de materia orgánica. Se utilizó el método de digestión húmeda, suelo secado a 25° C por 24 hrs y tamizado a 0,5 mm (SADZAWKA, 2006).

3.2.3.3 Medición de pH al agua. De acuerdo a lo descrito por SADZAWKA (2006), se realizó la determinación del pH (proporción suelo: agua 1:2,5) con suelo secado a 25° C por 24 hrs y tamizado a 2 mm.

3.2.3.4 Medición de pH al cloruro de calcio. De acuerdo a lo descrito por SADZAWKA (2006), se realizó la medición de pH al Cloruro de Calcio (CaCl_2) con suelo secado a 25° C por 24 hrs y tamizado a 2 mm.

3.2.4 Análisis físico de suelo. Con las muestras recolectadas en terreno, se procedió a realizar los análisis que se detallan.

3.2.4.1 Determinación de la curva de retención de agua. Las 36 muestras no disturbadas de suelo, fueron saturadas mediante humectación gradual por medio de ascenso capilar de agua con el objetivo de evitar inclusiones de aire en los poros del suelo. La saturación tomó aproximadamente cuatro días.

Posteriormente, las muestras fueron equilibradas a los potenciales mátricos de: -10, -20, -30 hPa (1 hPa = 1 cm columna de agua) en bandejas de arena, -60, -150, -300; -500 hPa por medio de platos cerámicos. Una vez que las muestras alcanzaron un equilibrio con el potencial mátrico aplicado, se determinó el contenido gravimétrico de agua por medio de pesaje (HARTGE y HORN, 1991).

Para determinar la densidad aparente, después del último nivel de tensión (- 500 hPa), las muestras se secaron en una estufa a 105°C por 24 horas (FORSYTHE, 1974).

Para determinar la densidad real se utilizó el método del pesaje sumergido. El volumen se obtiene por la diferencia entre el peso en seco y el peso sumergido (desplazamiento o volumen). Para realizar este experimento se utilizó suelo disturbado secado a 105° C por 24 horas (FORSYTHE, 1974).

Conocidas ambas densidades, se determinó el espacio poroso en forma analítica mediante la siguiente ecuación:

$$E_p = \left(1 - \frac{D_a}{D_r} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

E_p = Espacio Poroso [% Volumen]

D_a = Densidad Aparente [$g \cdot cm^{-3}$]

D_r = Densidad Real [$g \cdot cm^{-3}$]

Los porcentajes de agua, asociados a cada fracción de poros o potencial mátrico, se obtienen de la siguiente forma:

a) El Porcentaje de agua retenida (base volumen) a -60,-150,-330,-500 hPa:

$$\frac{P_{sh}(\psi_m) - P_{ss}}{V_c} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Donde:

$P_{sh}(\psi_m)$ = Peso del suelo húmedo en función del potencial mátrico

P_{ss} = Peso suelo seco

P_c = Peso del cilindro

V_c = Volumen del cilindro

De ésta forma conocido el contenido volumétrico de agua retenido a cada potencial mátrico (ψ_m) se puede elaborar la curva pF. Donde a partir de dicha curva se puede determinar la distribución de poros, según lo exponen HARTGE y HORN (1992).

3.2.4.2 Permeabilidad de aire. La permeabilidad de aire se midió a potenciales mátricos de -60, -150, -330, -500 hPa utilizando el permeameómetro de aire. Esta medición consistió en hacer circular aire con una presión menor a 1 hPa, en forma ascendente a través de la muestra de suelo, con el objetivo de permitir y conservar un flujo laminar. Para esto se trabajó con los mismos cilindros que contenían las muestras no disturbadas de suelo de la curva de retención de agua, de manera que se utilizaron 18 cilindros por tratamiento. La determinación de la permeabilidad de aire k_a se calculó a partir de la conductividad de aire k_l mediante la siguiente ecuación.

$$k_a(\varepsilon_a) = k_l(\varepsilon_a) \cdot \frac{\eta}{\rho_1 \cdot g} \quad (3.3)$$

Donde:

k_a = Permeabilidad del aire [μm^2]

ε_a = Volumen de poros con aire

k_l = Conductividad de aire [cm s^{-1}]

η = Viscosidad del aire [$\text{g}^{-1} \text{cm}^{-1}$]

ρ_1 = Densidad del aire durante la medición [kg /m^3]

g = Aceleración de gravedad 9,81 [m/s^2]

3.2.4.3 Índice de continuidad de poros. Este cálculo se realizó con el objetivo de evaluar aspectos funcionales del medio poroso, mediante la siguiente ecuación propuesta por GROENEVELT *et al*, (1984).

$$K_1 = \frac{k_a}{\varepsilon_a} \quad (3.4)$$

Donde:

K_1 = Índice de continuidad de poros

k_a = Permeabilidad de aire

ε_a = Fracción de poros llenos con aire

Otros índices que permite caracterizar la geometría del medio poroso, que se pueden derivar de la relación entre k_a y ε_a como lo proponen BALL *et al*. (1988), de la siguiente manera:

$$\log (k_a) = \log (M) + N \log (\varepsilon_a) \quad (3.5)$$

k_a = Permeabilidad de aire

ε_a = Fracción de poros llenos con aire

M = Intercepto de la recta de regresión

N = Pendiente de la recta de regresión

Donde M y N son parámetros empíricos. N es un índice de continuidad de poros que refleja el incremento de la permeabilidad del aire en función del aumento de los poros con aire AHUJA *et al*, 1984; BALL *et al*, 1988, citados por DÖRNER y DEC (2007). El mismo parámetro representa la disminución de la tortuosidad de los poros y del área superficial con el incremento de la fracción de poros disponibles para el flujo.

Un índice que permite estimar el volumen de poros bloqueados (ε_b) que no participan del flujo de aire por convección es propuesto por BALL *et al*, 1988 citados por DÖRNER y DEC (2007). Los autores mencionan que suelos que presentan una permeabilidad de aire igual o menor a $1 \mu\text{m}^2$ pueden ser considerados como impermeables; por lo tanto, el intercepto en la abscisa corresponde a un estimador de (ε_b), tal que:

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N} \quad (3.6)$$

ε_b = Volumen de poros bloqueados [% v/v]

3.2.4.4 Conductividad hidráulica en fase saturada. Para la medición de la conductividad hidráulica en fase saturada se utilizó un permeámetro de carga constante, que permite determinar K_s de acuerdo a la ley de Darcy, mediante la siguiente ecuación.

$$Q = K_s \cdot \frac{\Delta\Psi}{\Delta L} \quad (3.7)$$

Donde:

Q = Caudal o flujo por unidad de área [ml min^{-1}]

K_s = Conductividad hidráulica [cm s^{-1}]

$\Delta \psi$ = Diferencia de potencial [---]

ΔL = Distancia [cm]

Los cilindros con las muestras no disturbadas de suelo fueron saturados mediante humectación gradual por ascenso capilar. Posteriormente se hizo circular agua a través de las muestra durante 1 hora, al cabo del cual se determinó el volumen de agua por unidad de tiempo, con esto se obtuvieron valores absolutos de conductividad hidráulica. Manteniendo una circulación de agua constante por las muestras, se realizó una segunda medición a las 6 horas, una tercera medición a las 12 horas y finalmente una última medición a las 24 horas de iniciada la medición. Para todas las mediciones se realizaron tres repeticiones por muestra.

3.2.5 Análisis probabilístico de precipitaciones. Con el fin de caracterizar la distribución de precipitaciones, de un año normal en la zona en estudio, en especial durante la estación primavera-verano, se analizaron datos diarios de precipitaciones de 20 años de estudios, proporcionado por la Estación meteorológica de la Universidad Austral de Chile.

Para su ordenamiento y posterior trazado de la curva se empleó el análisis de frecuencias acumuladas de Weibull (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 1985).

Se ordenaron los años de los eventos en relación con sus respectivas semanas, independientes de su ubicación diaria en los 20 años. Estos valores se ordenan de mayor a menor, considerándose el valor de las medianas y asignándoseles la siguiente probabilidad de excedencia:

$$P = \frac{m}{[N+1]} \quad (3.8)$$

Donde N correspondería al número de valores y m al orden asignado a cada valor de la serie ordenada.

Esta probabilidad asignada, es uniformada por el promedio de las probabilidades asociadas con valores ordenados. El valor de la probabilidad correspondería a la ocurrencia del evento en un total determinado de años.

3.2.6 Análisis estadístico. El diseño del experimento correspondió al de Bloques completos al azar, que se define mediante la siguiente formula:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (3.9)$$

Donde:

μ = Media poblacional

τ_i = Efecto de los tratamientos

β_j = Efecto del bloque

ε_{ij} = Efecto del error

En cuanto al ordenamiento preliminar de datos, se empleó el programa Microsoft Excel XP. Posteriormente los resultados se analizaron estadísticamente mediante un Análisis de Varianza (ANDEVA), utilizando el programa Statgraphics Plus 5.1 en donde se consideró un P - valor $\leq 0,05$ para determinar que si existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

Los coeficientes de regresión (3.5) fueron comparados entre tratamientos utilizando el programa Statgraphics Plus 5.1 en donde se consideró un P - valor $\leq 0,05$ para determinar que si existen diferencias. Además se realizó la comparación de supuestos que incluyó el test de normalidad de Chi-cuadrado y el test para la homogeneidad de varianza Contraste de Bartlett, para lo cual se utilizó el mismo programa estadístico.

4 PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Caracterización general del sitio del experimento.

La determinación de algunas propiedades químicas del suelo corresponde a un análisis complementario al experimento. Para el caso de la materia orgánica ésta influye en las propiedades físicas del suelo, por lo que su cuantificación es necesaria para estudios de suelo.

4.1.1 pH del suelo. Los valores de pH del suelo al agua y al cloruro de calcio (Cuadro 2), son entre 2 y 5 décimas más altos en comparación con lo descrito por RODRIGUEZ (1993), quien señala que suelos Trumaos y Ñadis de la Décima Región presentan valores promedio de pH al agua (1:2,5) de 5,2 a 5,5. Este aumento se debe a que la preparación de suelo incluyó la incorporación de cal; previo análisis de suelo. De esta forma se puede lograr un buen desarrollo de las especies pratenses que componen la pradera, las cuales necesitan de un pH entre 5,4 y 5,8 para las ballicas y para el trébol blanco (*Trifolium repens*) entre 5,8 y 6,2 (SUAREZ, 2003).

4.1.2 Materia Orgánica del Suelo (MOS). El contenido de materia orgánica promedio por tratamiento se aprecia en el Cuadro 2. Estos valores indican un contenido de materia orgánica muy similar a lo descrito por RODRIGUEZ (1993), quien señala que los suelos de la Décima Región presentan contenidos promedio de materia orgánica que van desde los 13,70 a 31,24 (g M.O /100g de suelo), algo característico en suelos Trumao.

Por otro lado VAN HAVEREN (1983), señala que el contenido de materia orgánica en la superficie es un factor muy importante para medir el grado de compactación de un suelo. Niveles altos de MOS generalmente son asociados con buenas propiedades físicas, debido al aumento de la actividad biológica, la cual se encarga de moldear y agregar las partículas que componen el suelo. Esto es corroborado por CHAN y PRATLEY (1998), citados por SOUTHORN y CATTLE (2004),

quienes señalan que suelos con alto contenido de materia orgánica benefician la agregación y estabilidad del suelo.

Algunos autores van más allá, diciendo que la MOS además de mejorar la agregación y estructuración del suelo, contribuye a una reducción de la densidad aparente, mejora la conductividad hidráulica, la infiltración y retención de agua. La fauna presente en el suelo depende de ella para alimentarse, y al mezclarla con el suelo forman galerías otorgándole una mejor condición física (ALEGRE *et al.*, 1996).

Esta descripción atribuye buenas propiedades físicas a los suelos Trumao los cuales derivan de cenizas volcánicas y presentan altos contenidos de materia orgánica. Bajo las condiciones en que se desarrollan los Trumao, éstos poseen un alto contenido de carbono orgánico, íntimamente asociado a la microestructura, aunque restringido a los horizontes superficiales (ZUNINO y BORIE, 1985). Esta relación con la materia orgánica les confiere una alta estabilidad al agua y resistencia mecánica (ELLIES, *et al.*, 2000).

4.1.3 Textura del suelo. En el Cuadro 2, se presentan los porcentajes de las partículas que componen el suelo, valores que permiten inferir algunas propiedades físico-hidráulicas del suelo.

El suelo en estudio presenta una distribución de partículas que corresponde a la clase textural franco limosa. Este resultado coincide con lo descrito por CIREN (1999), el cual menciona que la textura superficial de la serie Valdivia es de tipo franco limoso. GERDING *et al.* (2006), también describe que en un perfil de suelo (100 cm) la textura para la serie Valdivia corresponde a franco-limoso a franco-arcilloso en todo el perfil.

El suelo de condición franco-limoso indica una distribución similar entre arena y arcilla pero destacando principalmente el contenido de limo. Esta heterogeneidad es importante ya que permite que exista un buen encaje tridimensional e interacción entre las partículas. Por lo tanto existirá una menor pérdida de suelo ante un evento externo (precipitaciones, labranza, tránsito animal, etc), debido a que la formación de la macroestructura, se aseguraría con la inclusión de altos niveles de materia orgánica

algo muy característico en los suelos Trumao. Esto es corroborado por LUZIO *et al.* (1990), quienes ratifican la presencia de texturas franco limosa o franco arcillosa para suelos Trumao, con un elevado contenido de materia orgánica en el horizonte superficial que disminuye en profundidad. Estas características permiten que estos suelos posean una elevada capacidad de retención de agua y buena permeabilidad, siendo suelos que no presentan problemas de drenaje.

CUADRO 2. Caracterización química y textural del suelo que sustenta a la pradera.

Intensidad de pastoreo	% M.O.S	pH H ₂ O	pH Ca Cl ₂
5 cm	17,2	5,7	5,2
8 cm	15,8	5,7	5,1
Análisis Textural			
Distribución de partículas	Arena	Limo	Arcilla
%	16	63	21

Nota: * Valores promedio

4.1.4 Distribución de precipitaciones. El conocer la distribución de los eventos de lluvia para una zona agrícola es una información importante ya que condiciona de una u otra forma las actividades que normalmente se realizan en el predio. Puntualmente para este estudio es relevante ya que la capacidad de soporte del suelo se encuentra dada por el contenido de agua que éste presente en el momento que sea utilizado. De ésta forma el efecto que causen los animales en los potreros a distintas intensidades de pastoreo con sus respectivas cargas animales, también dependerá de las estaciones del año en que se realice.

En la Figura 9, se presenta la precipitación acumulada bisemanal de 20 años para la ciudad de Valdivia, la cual se complementa con el Cuadro 3 en donde las precipitaciones se encuentran acumuladas en bisemanas. Se puede apreciar que las lluvias en la temporada de primavera van disminuyendo, hasta llegar a la época de verano donde las precipitaciones son casi imperceptibles, y por el contrario en la temporada otoño-invierno es donde se concentran la mayor cantidad de eventos.

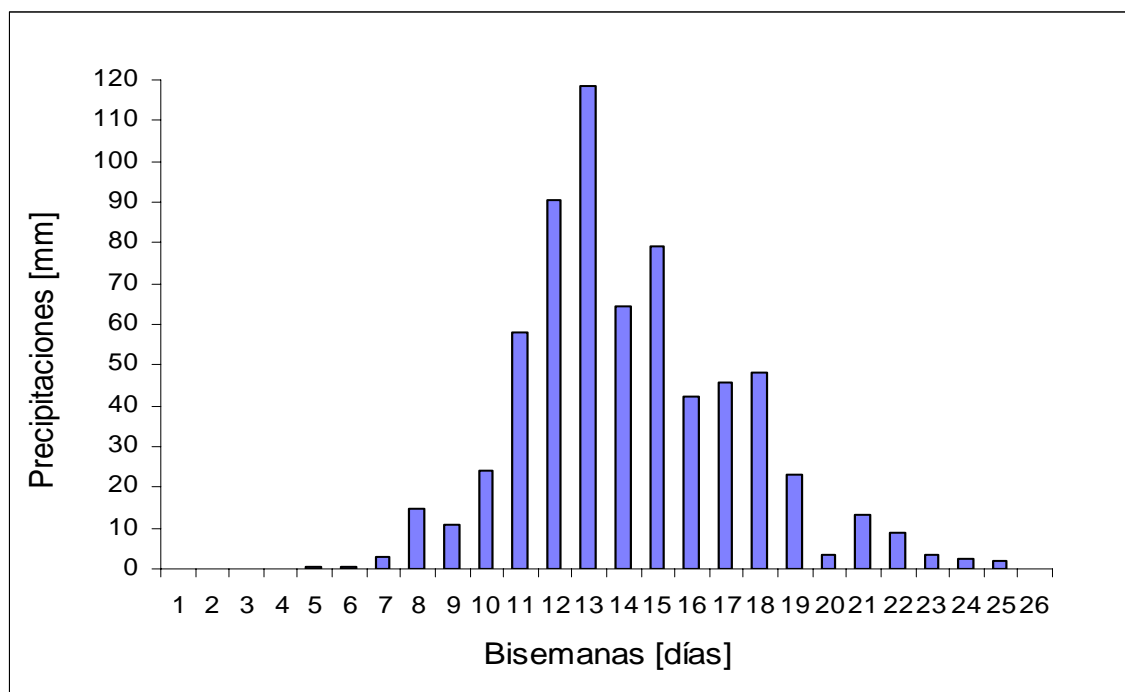


FIGURA 9 Precipitación acumulada bisemanal para la ciudad de Valdivia.

CUADRO 3. Distribución de precipitaciones acumuladas en bisemanas.

Fecha	Precipitación [mm]	Fecha	Precipitación [mm]
1 - 14 Enero	0,1	2 -15 Julio	64,6
15 - 28 Enero	0	16 - 29 Julio	79,2
29 Enero - 11 Febrero	0	30 Julio -12 Agosto	42,5
12 - 25 Febrero	0	13 - 26 Agosto	45,8
26 Febrero -11 Marzo	0,4	27 Agosto -9 Septiembre	48,2
12 - 25 Marzo	0,6	10 -23 Septiembre	23,3
26 Marzo - 8 Abril	2,9	24 Septiembre -7 Octubre	3,2
9 - 22 Abril	15	8-21 Octubre	13,3
23 Abril - 6 Mayo	11	22 Octubre - 4 Noviembre	8,7
7 - 20 Mayo	24	5-18 Noviembre	3,2
21 Mayo - 3 Junio	58,1	19 Noviembre -2 Diciembre	2,7
4 -17 Junio	90,5	3 Diciembre -16 Diciembre	2
18 Junio -1 Julio	118,5	17 - 31 Diciembre	0

GAVANDE (1972), señalan que el contenido de agua de un suelo dependerá del monto de las precipitaciones las que varían de acuerdo al régimen estacional. Si bien las ganancias o pérdidas de agua del suelo se equilibran a largo plazo, la reserva hídrica fluctúa en respuesta al desequilibrio de corto plazo entre oferta y demanda de agua (REBORI, 1997).

De acuerdo a esto se puede decir que la macroestructura del suelo, en la temporada primavera-verano sería menos susceptible a una deformación mecánica frente a una alta intensidad de pastoreo, debido a que el suelo presenta una mayor capacidad de soporte (Figura 6), la que se explica por la mayor superficie de contacto entre las partículas sólidas. Por el contrario en la temporada otoño-invierno, aumenta el contenido de agua en el suelo con las precipitaciones, lo que disminuye la capacidad de soporte del suelo quedando éste más susceptible a sufrir una deformación mecánica frente a una alta intensidad de pastoreo, donde la macroestructura podría sufrir modificaciones.

Cabe señalar que en días anteriores a la toma de muestras se presentaron algunos eventos de lluvia que contribuyeron al contenido hídrico del suelo, pero se apreció visualmente que el agua no llegó a infiltrar en profundidad ya que fue rápidamente evaporada o utilizada por las especies pratenses del sitio. De esta forma el suelo estaría en condiciones de resistir altas intensidades de pastoreo.

4.2 Efecto de la intensidad de pastoreo sobre la densidad aparente, espacio poroso y distribución de porosidad.

Debido a su sencillez, la densidad aparente es la medición más utilizada para medir las propiedades físicas del suelo en estudios de pastoreo (GREENWOOD y McNAMARA, 1992).

En el Cuadro 4, se presentan los resultados de la densidad aparente para las dos intensidades de pastoreo, las cuales no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El incremento en la intensidad de pastoreo no significó un aumento en la densidad aparente, demostrando que el suelo fue capaz de soportar el tránsito y pisoteo animal sin producir una deformación significativa del volumen del suelo.

ELLIES (1986) y (1988), determinó valores de densidad aparente para la serie Valdivia de 0.68 g cm^{-3} , correspondiente a explotaciones pecuarias. Además el mismo autor ELLIES (2000), citado por CUEVAS *et al.* (2004), menciona que suelos de origen volcánico presentan valores de densidad aparente de entre 0,2 y $0,75 \text{ g cm}^{-3}$, siendo así, se puede decir que el suelo que sustenta la pradera, inicialmente no presentó modificaciones importantes en su densidad aparente con respecto a suelos de la misma serie y otros suelos de origen volcánicos sometidos a similares usos.

Algunos autores como GREENWOOD y CAMERON (1990), citado por DREWRY *et al.* (2000), señalan que la densidad aparente puede ser insensible a pequeños cambios en la compactación del suelo, lo que podría expresar el por qué no se han presentado cambios en la densidad aparente, considerando además la etapa inicial de este estudio, en donde los animales pastorearon por un periodo aproximado de cuatro meses. Por otro lado GREENWOOD y McKENZIE (2001), señalan que la densidad aparente es un buen indicador de los cambios del suelo sometido a pastoreo en el tiempo y tiene la ventaja de ser fácil de medir. De esta forma se puede decir que la densidad aparente no fue capaz de detectar diferencias entre las intensidades de pastoreo a corto plazo si es que las hubo, pero sí sería capaz de detectar cambios en etapas posteriores del estudio.

La ausencia de diferencias entre los tratamientos se debe principalmente a las excelentes condiciones físicas que presentan los suelos Trumao, siendo esto en el corto plazo, pero algunos autores mencionan que, una alta intensidad de pastoreo sobre la pradera en sucesivos años podría modificar la estructura, desfavoreciendo el espacio poroso y la densidad aparente, por lo tanto, esta evaluación se debe repetir en el tiempo, especialmente cuando el suelo presente un mayor contenido de humedad.

Se debe mencionar que para éste experimento no se determinó la densidad aparente del suelo antes de ser sometido a pastoreo directo, por lo tanto, no se podría realizar comparaciones de acuerdo a un estado inicial del suelo que sustenta a la pradera.

CUADRO 4. Resultados de densidad aparente y espacio poroso según intensidad de pastoreo.

Tratamientos	Densidad aparente		Espacio poroso		
	Altura residuo [cm]	[g cm ⁻³]	E.S	[%]	E.S
5	0,69 a	[+/-] 0,01	70,22 a	[+/-] 0,56	
8	0,68 a	[+/-] 0,01	70,53 a	[+/-] 0,35	

* Letras distintas indica diferencias significativas entre los tratamientos. Valores promedio sometidos a análisis de varianza; (P - valor \leq 0,05).

El espacio poroso, que depende de la densidad aparente, no mostró diferencias estadísticamente significativas. Los valores obtenidos se asemejan a lo descrito por ELLIES (2000), citado por CUEVAS *et al.* (2004), quién menciona que los suelos de origen volcánico (Trumao) tienen un espacio poroso promedio de 69 %.

Ante esto se desprende que el suelo en la temporada primavera-verano fue capaz de soportar el peso de los animales, sin que se produjera alguna alteración estructural significativa con el incremento en la intensidad de pastoreo debido a que la capacidad de soporte aumenta con el menor contenido de humedad del suelo. CUEVAS (2002), corrobora lo anterior, diciendo que un suelo Trumao (Hapludand) seco, tiene mayor resistencia que uno con un contenido mayor de humedad.

ELLIES *et al.* (1988), determinó la capacidad de soporte para un suelo Trumao (Duric Hapludands) seco, húmedo y saturado con valores de 214 kPa, 190 kPa y 164 kPa de presión respectivamente.

NOBLE y TONGWAY (1986), citados por GREENWOOD y McKENZIE (2001), proponen que una vaca de un sistema lechero en base a praderas con un peso vivo de entre 500 a 600 kg, ejerce una presión estática de 110 a 130 kPa. De ésta forma se puede entender como el suelo Trumao es capaz de soportar el peso animal y no presentar cambios en sus propiedades físicas en la temporada primavera-verano.

Con respecto a la distribución de poros ésta fue obtenida a partir de la curva pF (Figura 10).

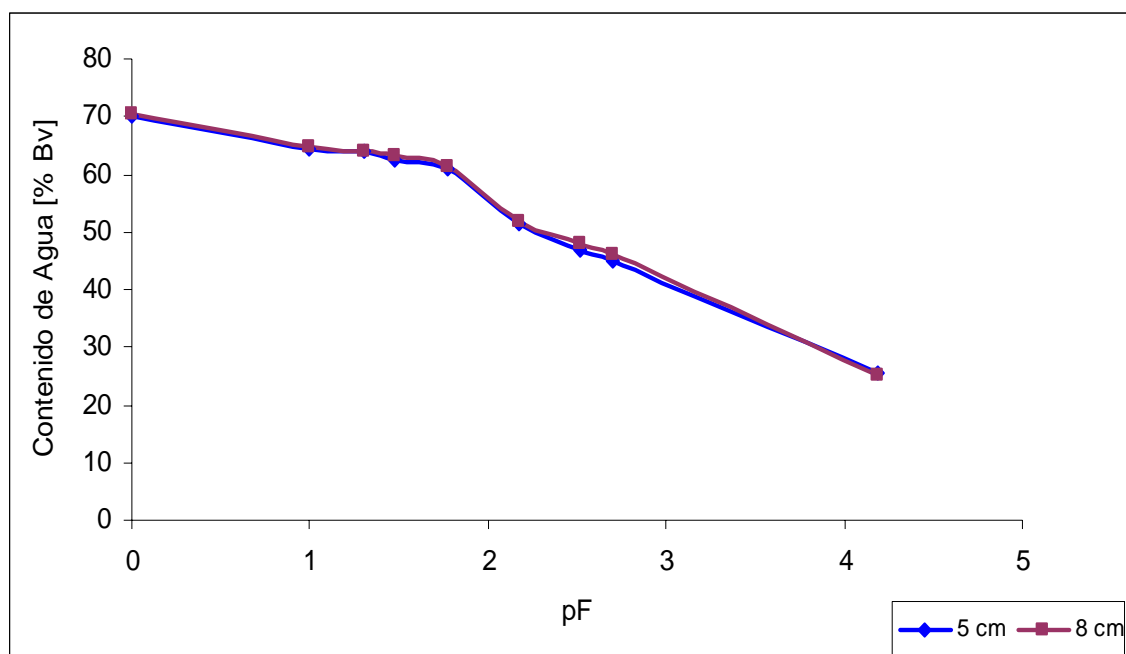


FIGURA 10 Curva de retención de agua para las dos intensidades de pastoreo

La distribución de los poros según su tamaño se presenta en el Cuadro 5. De la misma manera que lo observado en densidad aparente y porosidad total no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

CUADRO 5. Distribución de porosidad según intensidad de pastoreo.

Tratamientos	PDR		PDL		PAU		PAI	
	[%]	E.S	[%]	E.S	[%]	E.S	[%]	E.S
5	9,25 a	± 0,37	13,98 a	± 0,67	21,39 a	± 0,71	25,60 a	± 0,25
8	9,38 a	± 0,39	13,10 a	± 0,62	22,74 a	± 0,46	25,53 a	± 0,16

* Letras distintas indica diferencias significativas entre los tratamientos. Valores promedio sometidos a análisis de varianza (P - valor $\leq 0,05$).

Nota: PDR = Poros drenaje rápido, PDL = Poros drenaje lento, PAU = Poros de agua útil, PAI = Poros de agua inútil. E.S = Error estandar.

El volumen de poros de drenaje rápido (PDR) en los tratamientos de 5 y 8 cm de intensidad de pastoreo (Cuadro 4), no superaron el 10 %, valores que se pueden considerar bajos para el tipo de suelo. VELASQUEZ (1983), determinó en un suelo Trumao serie Valdivia bajo pastoreo (en el mismo campo experimental del actual experimento) valores promedio para PDR de un 15 % (5 -15cm de profundidad), en un suelo bajo pastoreo directo. Esta diferencia en PDR se puede asociar al manejo y uso constante en el tiempo de éste suelo, el cual durante los últimos 10 años o más, siempre ha sido utilizado para pastoreo directo.

TORRES (1994), determinó en un suelo Trumao serie Pelchuquín valores de PDR de un 15% para una pradera destinada a lechería, con 50 años de uso. Para una pradera reciente (6 años), obtuvo un 11% de PDR, y para un sector manejado bajo silvopastoreo valores de PDR cercanos a un 8% (14 años de uso). También obtuvo valores de PDR cercanos a un 10% para una pradera en rotación (cultivos) donde este manejo llevaba alrededor de 120 años. Además determinó valores de PDR para bosque donde obtuvo un valor promedio de 34%. Todos los valores fueron obtenidos de muestras no disturbadas de 0 -10 cm de profundidad.

De acuerdo a los valores señalados se puede decir que tanto el manejo y el tiempo influirían en la modificación de la estructura, por lo que es recomendable realizar un manejo sustentable del sistema pastoril, ya que se beneficiaría directamente al sistema trifásico del suelo.

Por lo tanto, al evaluar la intensidad de pastoreo sobre las propiedades físicas del suelo se obtendría información relevante de acuerdo a cómo estaría influyendo directamente el manejo.

Cabe mencionar que la utilización de valores de distribución de porosidad en bosque se realizó con el fin de mostrar que los suelos Trumao pueden presentar altos valores de PDR, debido una baja intervención antrópica, sin embargo pueden verse afectados a sufrir modificaciones por un manejo agropecuario intensivo.

Los resultados determinados pueden ser comparados con los obtenidos por NISSEN *et al.* (2006), quienes determinaron valores de PDR de 9,3 % en un suelo Trumao (Typic Hapludands) serie Osorno bajo pradera, y de 23,9 % en el mismo suelo bajo bosque. Esto indica que suelos en condiciones no intervenidas antrópicamente, como es el caso del bosque, tienden a presentar una mayor proporción de PDR que suelos utilizados para producción pecuaria y cultivos agrícolas tradicionales.

BAVER (1973), señala que la labranza convencional y el manejo intensivo deterioran la estructura, disminuyen los poros grandes (macroporos) aumentando los microporos, y consecuentemente el tiempo de entrada de agua al perfil del suelo, disminuyendo la aireación.

La disminución de los PDR no deja de ser importante ya que, autores como GRABLE (1971); CANNELL (1977); CARTER (1988), citados por GREENWOOD y McNAMARA (1992), mencionan que una macroporosidad de menos del 10% indica limitaciones para las condiciones de salud de las plantas y la aireación del suelo. Los valores observados en este estudio se encuentran por encima de 6% (en relación al volumen total del suelo) en donde el aire en el suelo constituye una fase continua que no afecta la difusión de aire en el suelo FLUHLER (1973), citado por HARTGE y HORN (1991).

Los poros de drenaje lento (PDL) no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Cuadro 5). Estos valores son levemente mayores en comparación a lo determinado por VELASQUEZ (1983), quién para un suelo de la serie Valdivia (Duric Hapludands) sometido a pastoreo, determinó valores de PDL entre un 8% y 12 %. NISSEN *et al.* (2006), determinaron valores de PDL de 10 y 13% para pradera y bosque respectivamente en un suelo Trumao de la serie Osorno (Typic Hapludands). Al comparar el valor obtenido en bosque por NISSEN *et al.* (2006), con los resultados determinados en el experimento, se aprecia que son valores bastante cercanos y similares lo que indicaría que su proporción no ha sido tan afectada como el caso de los PDR.

En el caso de los poros de agua útil (PAU), éstos tampoco mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 5). Este resultado nos indicaría que el suelo presentó una proporción de poros adecuada para el almacenamiento y la posterior entrega de agua hacia las plantas.

VYHMEISTER (1980), determinó que para un suelo Trumao de la serie Valdivia (Duric Hapludands) los PAU alcanzaron un valor de 14 % en una pradera de la misma estación experimental del presente experimento. Además NISSEN *et al.* (2006), determinó en un suelo Trumao (Typic Hapludands), sometido a pradera y bosque valores de PAU de 19,5% y un 14,6%, respectivamente. Se puede apreciar que dichos valores son menores a los obtenidos en este experimento, lo que indicaría que debido al uso agropecuario constante y repetitivo en el tiempo la proporción de poros ha sido modificada incrementando considerablemente los PAU.

En cuanto a los poros de agua inútil (PAI), las dos intensidades de pastoreo evaluadas, tampoco mostraron diferencias estadísticamente significativas. ELLIES (1986) y (1988), determinó un 29,2% y 28,1% de PAI en un suelo de la serie Valdivia, respectivamente. Estos resultados son 3 a 4 puntos porcentuales más altos que los observados en los tratamientos. Esta diferencia se debe al menor contenido de arcilla determinado en este experimento (21%) en comparación con los resultados obtenidos por ELLIES (1986) y (1988), donde el contenido de arcilla fue de un 34%.

Sintetizando lo expresado anteriormente se puede decir que no existe mayor diferencia entre intensidades de pastoreo para valores de densidad aparente, espacio poroso y distribución de poros, la carga animal utilizada, no ha provocado aún cambios significativos en el sistema poroso del suelo bajo pradera, esto debido principalmente a las óptimas cualidades que poseen los suelos Trumao durante el período de medición y al corto período de tiempo que lleva el presente estudio.

4.3 Permeabilidad de aire del suelo.

BEAR (1972), señala que la permeabilidad está estrechamente relacionada con factores geométricos del sistema poroso como la porosidad total, la distribución de los poros por tamaño, la forma del sistema poroso, la continuidad y tortuosidad de los poros del suelo. Por lo tanto, la permeabilidad de aire permite caracterizar el sistema poroso funcionalmente (DÖRNER y DEC, 2007).

En la Figura 11, se presentan los valores de permeabilidad de aire a distintas tensiones mátricas para cada intensidad de pastoreo, no presentando diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

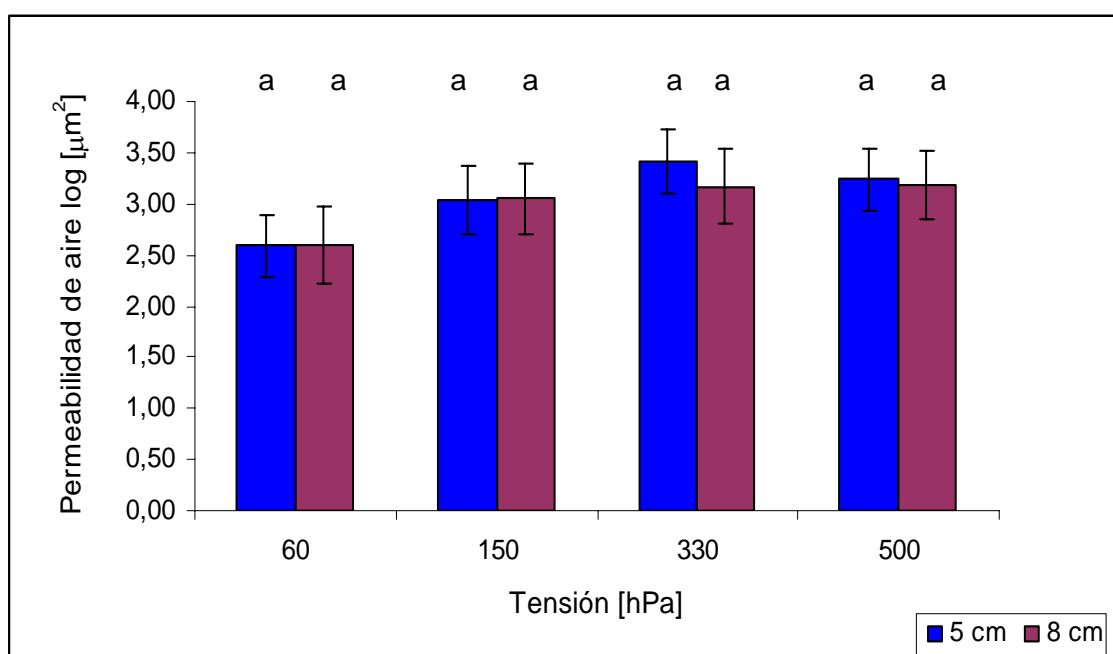


FIGURA 11 Permeabilidad de aire para dos intensidades de pastoreo a distintas tensiones mátricas. Las barras de error indican error estándar (n = 3).

* Letras diferentes indica diferencias significativas entre los tratamientos. Valores promedio sometidos a análisis de varianza; (P - valor $\leq 0,05$).

GREENWOOD y MACNMARA (1992), determinaron en un experimento con una alta y baja carga animal, en la temporada de invierno (800-2000 ovejas/ha/1-3

días) que la permeabilidad de aire disminuyó en al menos un orden de magnitud bajo pastoreo intensivo, en comparación con un pastoreo liviano. La intensidad de pastoreo para tal experimento dependía sólo de la carga animal además fue realizada sólo en los meses de invierno y durante dos años consecutivos, por lo tanto, la capacidad de soporte del suelo no fue capaz de sustentar la carga.

Ante lo mencionado, podría esperarse que la permeabilidad de aire en el actual experimento disminuya a medida que transcurra el tiempo, ya que se vería modificada la geometría de los poros, en especial con el pastoreo que se realice en las temporadas invernales, cuando la capacidad de soporte es menor a la presión ejercida por los animales.

Autores como ALDERFER y ROBINSON (1947); CHANCELOR *et al.* (1962); BERTOL *et al.* (1998), citados por BERTOL *et al.* (2000), señalan que generalmente las modificaciones sobre las propiedades físicas del suelo causada por el manejo de animales sobre praderas, se expresan a mediano y largo plazo.

De acuerdo a esto se podría entender porque no se han encontrado diferencias entre las dos intensidades de pastoreo debido al carácter inicial del experimento, pero también no se debe dejar de lado la oportunidad en que se realice el pastoreo, ya que cuando el suelo se encuentre saturado con agua, la probabilidad de romper la estructura por el pisoteo animal es alta, generando una pérdida y amasado del suelo.

Esto también es mencionado por DREWRY (2008), quién señala que la incidencia de la compactación del suelo está directamente relacionada con las características del suelo, la humedad del suelo y la intensidad del tránsito y pisoteo animal.

En la Figura 12, se presenta la permeabilidad de aire en función de los poros llenos con aire para las dos intensidades de pastoreo 5 cm y 8 cm.

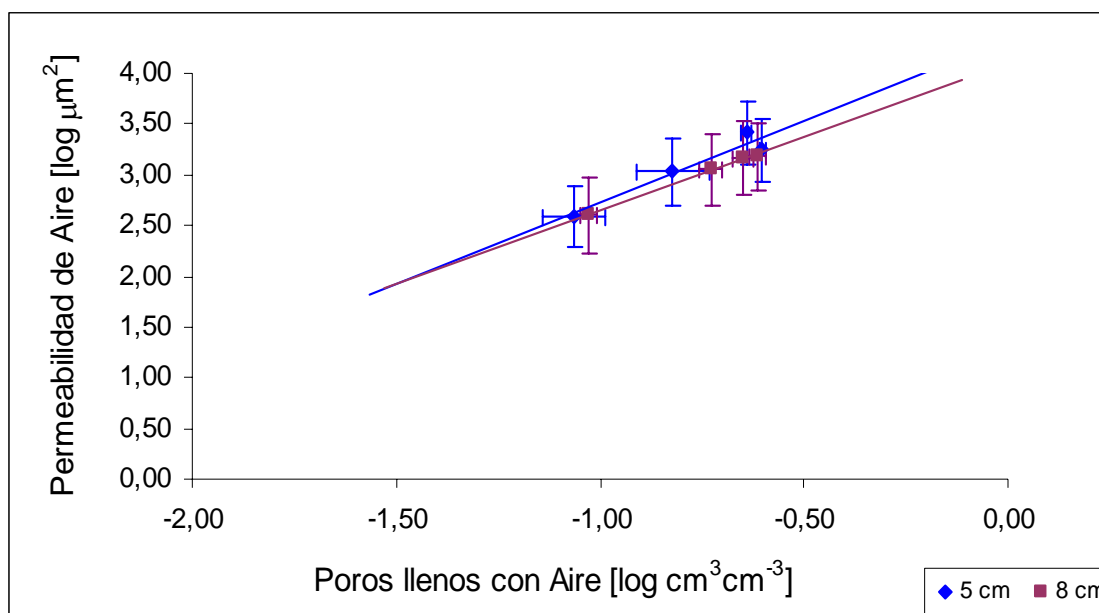


FIGURA 12 Permeabilidad de aire en función del volumen de poros llenos con aire para las dos intensidades de pastoreo. Las barras de error indican error estándar (n = 3).

Esta relación se ajustó de acuerdo a la ecuación propuesta por BALL *et al.*, (1988). La permeabilidad aumenta a medida que aumenta el volumen de poros que están ocupados por aire (BALL *et al.*, 1988; DÖRNER y HORN, 2006).

Al realizar el análisis estadístico de comparación de las rectas podemos apreciar en el Cuadro 6, que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las pendientes de las dos rectas (P-valor > 0,05). Para el caso de los interceptos, estos tampoco presentaron diferencias estadísticamente significativas (P-valor > 0,05). Por otro lado, TANNER y MAMMARIL (1959), citados por GREENWOOD y McKENZIE (2001), señalan que la permeabilidad de aire es una medida de continuidad de poros que es más sensible a los cambios estructurales del suelo en comparación a otras propiedades como densidad aparente, resistencia del suelo, etc. Ante esto se esperaría que a futuro la k_a fuera el primer indicador en expresar diferencias debido a la intensidad de pastoreo.

El índice de continuidad de poros K1 (ecuación 3.9), para las dos intensidades de pastoreo (Cuadro 6), no presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Altos valores de K1 indican que el medio poroso tienen una alta capacidad para transmitir fluidos debido a una gran continuidad y baja tortuosidad entre los poros SCHJØNNING *et al.*, citado por DÖRNER y DEC, (2007). Numéricamente la intensidad de pastoreo de 5 cm es levemente mayor lo que indica que estos poros se encuentran menos interrumpidos, por lo que pueden transmitir aire en forma más continua. Esto no deja de ser importante ya que la continuidad y tortuosidad de los poros influyen en el sistema de transporte de agua, solutos y gases en el suelo (MOLDRUP *et al.*, 2001).

DÖRNER y DEC (2007), determinaron índices de continuidad a -60 hPa en suelos Luvisoles (alto contenido de arena) del norte de Alemania, estos presentaron valores de $3,12 \mu\text{m}^2 10^2$ para un cultivo de trigo (*Triticum aestivum*) en asociación con trébol blanco (*Trifolium repens*) bajo manejo conservacionista (catena I, sector I); de $4,41 \mu\text{m}^2 10^2$ bajo el mismo manejo y cultivo anterior, pero en otro sitio (catena I, sector II) y de $0,44 \mu\text{m}^2 10^2$ con un manejo convencional para el mismo cultivo (catena II, sector II). Todas las muestras fueron obtenidas a 15 cm de profundidad.

La comparación con los valores obtenidos en éste estudio debe ser discreta ya que, como se mencionó, existen diferencias de suelo, manejo y profundidad de muestreo, pero si se puede tomar como referencia sólo para efectos de comparación.

De acuerdo a los valores obtenidos en este experimento éstos presentan una mayor K1 con respecto a lo determinado en Alemania por DÖRNER y DEC (2007), por lo que se puede decir que la pradera del experimento habría permitido un arreglo de la estructura y continuidad de los poros del suelo en forma momentánea, donde además se suman factores como M.O.S, fauna del suelo y actividad radical que en conjunto permiten un desarrollo rápido de la porosidad y su continuidad. Sería prudente esperar futuras mediciones y resultados los cuales nos indicarían si las intensidades de pastoreo presentan diferencias entre sí, además del tiempo de uso de la pradera.

La determinación del volumen de poros bloqueados (Cuadro 6) propuesta por BALL *et al.* (1988), indica que la menor intensidad de pastoreo presenta una menor cantidad de poros bloqueados, aunque no significativa estadísticamente, lo que significa que existe un mayor número de poros dispuestos a contribuir en el flujo de aire en el suelo, que indica un mayor continuidad de los poros. En forma contraria sucede para el tratamiento de mayor intensidad de pastoreo.

CUADRO 6. Comparación de rectas de regresión k_a/ϵ_a para dos intensidades de pastoreo.

Modelo: $\log(K_a) = \log M + N \log(\epsilon_a)$				K1(60 hPa)	ϵ_b
Intensidad de pastoreo	M	N	r	$\mu\text{m}^2 \cdot 10^2$	(% v/v)
5 cm	4,34 a	1,63 a	0,95	30 a	0,22 a
8 cm	4,08 a	1,43 a	0,99	24 a	0,14 a

* Letras iguales indica diferencias no significativas entre los tratamientos.

* M corresponde al intercepto y N a la pendiente de las respectivas rectas.

En el caso de los poros bloqueados DÖRNER y HORN (2006), determinaron valores de 7.96 v/v % para el cultivo de trigo con manejo convencional, de 0.31 y 0,29 v/v % para el mismo cultivo bajo manejo conservacionista (sector I). Los valores obtenidos para éste experimento son similares a lo obtenido por DÖRNER y HORN (2006), en el manejo conservacionista (sector I y II), y además alejándose bastante de valores que presenta el manejo convencional determinados por DÖRNER y HORN (2006), en donde el suelo al ser laboreado cada año la continuidad del sistema poroso se interrumpe existiendo la posibilidad de que el número de poros bloqueados aumente. Esto, sugiere que un manejo conservacionista permitiría que la continuidad de los poros se mantenga en el tiempo.

DREWRY y PATON (2000), señalan que la permeabilidad de aire se vería disminuida en una pradera después de tres años de utilización donde además el manejo del pastoreo influiría directamente en la recuperación natural del suelo. Autores como DEXTER (1991); WHALLEY *et al.* (1995); GREENWOOD *et al.* (1998), citados

por DREWRY *et al.* (2000), describen que los efectos perjudiciales de la compactación del suelo pueden ser mejorados por la recuperación natural de éste, que incluiría procesos de congelación-deshielo, ciclos de humectación-secado, actividad de la macrofauna (preferentemente lombriz) y la actividad radical.

4.4 Conductividad Hidráulica en fase saturada.

En investigaciones sobre suelos de origen volcánico se ha destacado la eficiencia de este valor para caracterizar la estructura de los mismos. Además se debe tener en cuenta que la K_s depende en gran medida del monto de poros gruesos y de la forma y continuidad del sistema poroso, que varía fuertemente de un sitio a otro difiriendo además en las distintas orientaciones del suelo ya sea vertical u horizontal (ELLIES, 1997; DÖRNER y HORN, 2006).

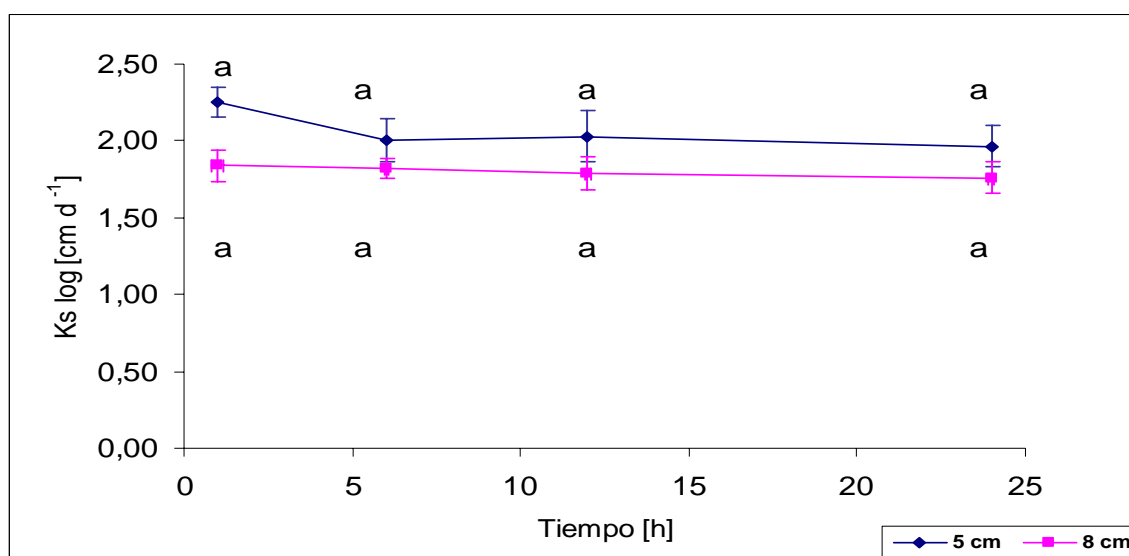


FIGURA 13. Conductividad hidráulica para las dos intensidades de pastoreo. Las barras de error indican error estándar (n=3).

En la Figura 13, se presenta el efecto de las dos intensidades de pastoreo sobre la conductividad hidráulica en fase saturada (K_s). Del gráfico se desprende que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos intensidades de pastoreo.

También se puede apreciar (Figura 13), que numéricamente la K_s de la intensidad de 5 cm es mayor a la otra intensidad durante todo el experimento (24 horas), lo descrito podría resultar contradictorio debido a que los animales se encuentran pastoreando y a su vez pisoteando por mayor tiempo en el tratamiento que presenta una mayor K_s (mayor intensidad de pastoreo). Esto podría deberse a que el tiempo de duración del experimento todavía no deja expresar mayores diferencias que puedan verse reflejadas en el análisis estadístico, además ELLIES *et al.* (1997), citado por SANDOVAL (2007), señala que al incrementar el grado de agregación de un suelo, la distribución de la K_s suele ser cada vez más asimétrica y discontinua.

Autores como PAPENDICK y MILLER, (1977); HILLEL (1980), citados por SINGH *et al.* (1995), señalan que la dirección, magnitud de la labranza y el manejo de residuos afectan las propiedades hidráulicas del suelo, las cuales varían de acuerdo al tipo de suelo, sin olvidar las condiciones agroecológicas que imperan en el sitio, donde los resultados pueden no ser de aplicación universal.

No deja de llamar la atención la notable variación que presentó la K_s del tratamiento de mayor intensidad; entre la primera y segunda hora de medición. Esto podría explicarse de acuerdo a que inicialmente podrían haber participado bioporos formados por el sistema radicular de las especies pratenses, donde estos bioporos tienden a ocluirse por efecto erosivo del agua que termina cambiando y modificando la estructura, la cual se expresa en una disminución en el movimiento de agua en el suelo. Esto es mencionado por ELLIES *et al.* (1997), quienes explican que la variación producida durante un flujo continuo de agua se debe a oclusiones o aperturas que provocan cambios en la continuidad del sistema poroso.

La K_s es una variable relevante ya que permite conocer cómo se mueve el agua a través del suelo en fase saturada. Esto permite conocer cómo se comporta el suelo frente a eventos lluviosos, que en algunos casos son de carácter sorpresivos y abundantes, pudiendo saturar la capacidad del suelo. Siendo así, se hace necesario monitorear K_s para ver su comportamiento ante altas intensidades de pastoreo la que no es recomendable disminuir, debido a que disminuiría el movimiento del agua

trayendo como consecuencia un aumento del tiempo para que el nivel de agua descienda, tiempo en que los animales en pastoreo no podrían utilizar la pradera.

ELLIES (2003), determinó valores de K_s en múltiples investigaciones realizadas en suelos bajo distintos usos como por ejemplo en pradera artificial donde se alcanzan valores de $250 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ y en pradera degradada valores cercanos a $80 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$. Los valores determinados en el presente experimento se asemejan a los de una pradera degradada, esto principalmente debido al uso continuo de pradera sobre pradera que se discutió en los experimentos anteriores.

Ante esto queda en evidencia que el uso continuo de un suelo con un mismo fin (pradera), causa trastornos en las propiedades hidráulicas del suelo, debido principalmente al cambio en la estructura, en donde los macroagregados se ven directamente afectados, provocando cambios en los macroporos, los cuales tienen la función de transmisión de fluidos, específicamente cuando el suelo se encuentra saturado.

5. CONCLUSIONES

Del presente estudio y de acuerdo a los resultados, se concluye lo siguiente:

Respondiendo a la hipótesis de este estudio se puede decir que un incremento en la intensidad de pastoreo en una pradera sobre un suelo Trumao en la temporada primavera-verano, no altera significativamente la porosidad del suelo, de acuerdo a los parámetros que se estudiaron.

Los valores promedio para densidad aparente y espacio poroso, no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las dos intensidades de pastoreo. La distribución de porosidad en el suelo, (PDR, PDL, PAU y PAI), tampoco mostró diferencias estadísticas significativas entre las dos intensidades de pastoreo.

Con respecto a los aspectos funcionales del sistema poroso, la permeabilidad de aire (k_a) a diferentes tensiones no evidenció diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. De igual forma el índice de continuidad de poros tampoco mostró diferencias estadísticas significativas.

Para el caso de la conductividad hidráulica (K_s), los resultados no entregaron diferencias estadísticas significativas, pero sí se evidenció que el tratamiento de mayor intensidad de pastoreo presentó numéricamente una mayor K_s durante todos los tiempos de medición.

6. RESUMEN

Con el propósito de evaluar el efecto del pastoreo directo sobre las propiedades físico-hidráulicas del suelo, se procedió a comparar las propiedades estructurales de un suelo bajo pradera con dos intensidades de pastoreo, las cuales fueron manejadas mediante la altura de residuo. Las muestras fueron recolectadas en un suelo Trumao (serie Valdivia) de la XIV Región de los Ríos el cual posee adecuadas características físicas para sustentar praderas o cultivos tradicionales de la zona, debido principalmente a su alto contenido de materia orgánica que favorece la formación de agregados estables y una buena distribución de poros.

Se determinó la curva de retención de agua, la permeabilidad de aire (K_a) y la conductividad hidráulica en fase saturada (K_s), además se calculó la distribución de poros por tamaño, la porosidad de aire, índice de continuidad de poros y el volumen de poros bloqueados. La medición de k_a entregó valores que pueden servir de referencia en investigaciones venideras, además que sirve de complemento junto a K_s para describir la estructura y funcionalidad de los macroporos.

Los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas para ninguno de los experimentos mencionados, ésto debido principalmente a las excelentes cualidades físicas que presenta el suelo Trumao, también a la temporada donde se obtuvieron las muestras y por último al corto periodo de tiempo que lleva el experimento.

De acuerdo a esto, el suelo Trumao (serie Valdivia) puede sustentar una alta intensidad de pastoreo en la temporada primavera-verano, sin ver perjudicada sus propiedades físicas. De ésta forma se cumple la hipótesis planteada para éste estudio.

7. SUMMARY

To evaluate the direct effect of grazing on the physical properties of water-soil, we proceeded to compare the structural properties of soil under a pasture with two grazing intensities, which were handled through the residual height of waste. The samples were collected in Trumao soil (series Valdivia) of the Region XIV de los Rios which have adequate physical characteristics to sustain pasture or traditional crops in the area, mainly due to its high content of organic matter that favors the formation of stable aggregates and good distribution of pores.

The water retention curve, air permeability (k_a) and saturated hydraulic conductivity (K_s). The air-filled porosity was determined, and pore-continuity indice and blocked porosities. Measuring k_a gave values that can serve as a reference to future investigations, and also K_s to describe the structure and function of the macropores

The results showed no significant statistically differences for any of the experiments, mainly due to the excellent physical qualities that show the Trumao soil, also the season where the samples were collected and finally to the short period of time it took the experiment.

Accordingly, the soil Trumao (series Valdivia) can sustain a high-intensity grazing in the spring-summer season, without depleting its seeing impaired physical properties. Therefore the hypothesis is true for this study.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ALEGRE, J. PASHANASI, B. y. LAVELLE, P. 1996. Dynamics of soil physical properties in Amazonian agroecosystems inoculated with earthworms. *Soil Science Society of America Journal*. 60:1522-1529.
- ALLENDE, P.1993. Efecto de la compactación del suelo sobre el crecimiento radicular de especies pratenses. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias 40 p.
- BALL, B. O'SULLIVAN, M. y HUNTER, R. 1988. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *Journal Soil Science*. 39: 327–339.
- BALL, B. CAMPBELL, D. DOUGLAS, J. HENSHALL, J. y O'SULLIVAN, M. 1997. Soil structural quality, compaction and land management. *European Journal of Soil Science*. 48: 593-601.
- BALL, B. CAMPBELL, D. Y HUNTER, E. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Tillage*. 57: 83 - 91.
- BALOCCHI, O.2002. Praderas y recursos forrajeros en la zona sur de Chile. In: C. Amtmann, F.Mujica y B. Vera (Eds). *Pequeña agricultura en la región de los Lagos, Chile*. Valdivia. Ediciones de la Universidad Austral de Chile. Pp.59-73.
- BALOCCHI, O. 2001. Bases fisiológicas del crecimiento de las praderas. Apuntes curso manejo de praderas.
- BAVER, L. y GARDNER, R. 1973. *Física de suelos*.1º Ed. en español, Ed. UTEHA. México. 525p.

- BEAR, J., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, New York, 764 p.
- BEGUET, H. y BAVERA, G. 2001. Relación Suelo-Planta-Animal. Curso de producción Bovina de carne. FAV UNRC. (On Line). <
http://www.produccionbovina.com/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/05-relacion_suelo-planta-animal.pdf> (11Septiembre 2007).
- BERTOL, I. ALMEIDA, J. DE. ALMEIDA, E. DE. y KURTZ, C. 2000. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem. Pesquisa. Agropecuária Brasileira. 35: 5. 11
- BLACKWELL, S. RINGROSE-VOASE, J. JAYAWARDANE, S. OLSSON, A. MCKENZIE, C. MASON, K. (1990). The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. Journal Soil Science 41:215-228 p.
- BLASER, R. 1966. Efecto del animal sobre la pastura. In: Turrialba, ed. Empleo de animales en las Investigaciones sobre pasturas. Simposio. Montevideo Uruguay. 1-24.
- BULLOCK, P. FEDOROFF, N. JONGERIOUS, A. STOOPS, G y TURSINA, T.1985. Handbook for soil thin section description. Waine research publications. International society of soil science. England.152 p.
- CARRILLO, I. 2001. Carga animal y equivalente vaca (E.V). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria Balcarce. Boletín técnico. 7620.
- CIREN (Centro de información de recursos naturales). 1999. Descripciones de suelos materiales y símbolos. Estudio agrológico de la provincial de Valdivia, X región, Chile. Santiago. 124 p.

- COREY, A. 1986. Air permeability. In: A. Klute (ed), Methods of Soil Analysis. Part 1 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 319–330. Costa Rica. IICA. 212 p.
- CUEVAS, E. 1980. Manejo y utilización de praderas. Apuntes de clases. Universidad Austral de Chile.
- CUEVAS, J. 2002. Cambios físicos y mecánicos en tres suelos bajo tránsito con diferentes humedades. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal 2 (2): 25-36.
- CUEVAS, J. DÖRNER, J. y ELLIES. A. 2004. Elementos de física y mecánica para evaluar la sustentabilidad de suelos agrícolas. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. 4: 1-13.
- DAMPIER, L. Soil components. (On Line). <[http://www.landfood.ubc.ca/soil200/components /index.htm](http://www.landfood.ubc.ca/soil200/components/index.htm)>. (7 marzo 2008).
- DEXTER, A. y BIRD, N. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil and Till. 203-212 p.
- DIRKSEN, C. 1999. Soil physics measurements. Catena Verlag. Reiskirchen. Germany. 154 p.
- DÖRNER, J. HORN, R. 2006. Anisotropy of pore functions in structural stagnic luvisols in the weichselian moraine region in Germany. Journal Plant Nutrition Soil Science 169: 212-220.
- DÖRNER y DEC. 2007. La permeabilidad del aire y conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización funcional de los poros del suelo. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. 7: 1-13.

- DREWRY, J. LOWE, H. PATON, J. 1999. Effect of subsoiling on soil physical properties and pasture production on a Pallic Soil in Southland, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 43: 269-277 p.
- DREWRY, J. LITTLE, J y PATON, R. 2000. A survey of soil physical properties on sheep and dairy farms in southern New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 43:251-258.
- DREWRY, J. 2008. (On Line). Soil compaction in pasture grazing systems <http://topicsscirus.com/Soil_compaction_in_pasture_grazing_systems.html>. (17 Agosto 2008).
- DREWRY, J. PATON, J. 2000. Effects of cattle treading and natural amelioration on soil physical properties and pasture under dairy farming in Southland, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 11: 377-386.
- ELLIES, A. GAYOSO, J. y LAMIG, J. 1982. Efecto del manejo y contenido de humedad sobre la preconsolidación en dos suelos del sur de Chile. *AgroSur*. 10 (2): 124-130.
- ELLIES, A. y Mc DONALD, R. 1984. Algunas propiedades físico-mecánicas de suelos dystrandepes del sur de Chile. *Agro Sur*. 12 (2):140-147.
- ELLIES, A. 1986. Efectos de la consolidación mecánica sobre algunos Distrandepes y Palehumultes del sur de Chile. *Ciencia del suelo*. 2:92-97.
- ELLIES, A. 1988. Mechanical consolidation in volcanic ash soils. *Catena supplement*. 11: 87-92.
- ELLIES, A. 1994. Limitantes físicas del suelo en la producción de forrajes. *In*: Avances en producción animal. Producción animal. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. Instituto de Producción Animal. pp. 23-38.

- ELLIES, A. GREZ, R. y RAMIREZ, C. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *AgroSur*. 25 (1):51-56.
- ELLIES, A. HORN, R. y SMITH, R. 2000. Effect of management of a volcanic ash soil on structural properties. *Agrophysics* 14: 377-384.
- ELLIES, A. 2003. Cátedra Manejo físico de suelos.
- FARM MANAGEMENT ISSUES. 2002. (On Line) <<http://www.ew.govt.nz/audiences/farmers/documents/farmmanagementissues2.pdf>>. (5 mayo 2008).
- FONDO PARA LA INOVACIÓN AGRARIA (FIA). Mejores prácticas de pastoreo. Informativo Técnico N° 5. Mayo 2006.
- FORSYTHE, W. 1974. Manual de laboratorio de física de suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 212 p.
- FULKERSON, W. y DONAGHY, D. 2001. Plant-soluble carbohydrate reserves and senescence-key criteria for developing an effective grazing management system for ryegrass-based pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 41:261-275.
- GAVANDE, S. 1972. Física de suelos principios y aplicaciones. México D.F, México. Editorial Limusa. 351 p.
- GALLICHAND, J. MADRAMOOTOO, C. ENRIGHT, P. y BARRINGTON, S. 1990. An evaluation of the Guelph permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 33 (4): 1179-1184.

- GERDING, V. RIVAS, J. 2006. Desarrollo de plantaciones experimentales jóvenes de *Fitzroya cupressoides* establecidas en el arboreto de la Universidad Austral de Chile, Valdivia. *BOSQUE* 27(2): 155-162.
- GREENWOOD, P. MCNAMARA, R. 1992: An analysis of the physical condition of two intensively grazed Southland soils. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 54: 71-75.
- GREENWOOD, K. y MCKENZIE, B. 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of experimental Agriculture* (41): 1231-1250 p.
- GREGORINI, P., AGNELL, L. Y MASINO, C. Producción animal en pastoreo: definiciones que clarifican significados y facilitan la comprensión y utilización de términos usados comúnmente. 2007. (On line). <http://www.produccionbobina.com/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/61-produccion_en_pastoreo.htm>. (10 enero 2008).
- GROENEVELT, P. KAY, B. y GRANT, C. 1984. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma*. 34:101-104.
- GUERIF, J. 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil Tillage Res.* 16: 167-178.
- HARTGE, K. y HORN, R. 1991. *Introduction to soil physics*. Enke. Stuttgart. Germany. 303 p.
- HARTGE, K Y HORN, R. 1992 *die physikalische untersuchungen von böden*. Ferdinand Enke, Stuttgart (RFA) 2 ed. 177 p.

- HARTGE, K. 2000. The effect of soil deformation on physical soil properties-A discourse of the common background-, in Hora, R., van den Akker, J.J.H. and Arvidson, J. (Eds.). Subsoil compaction. Distribution, processes and consequences. *Advances in Geocology* 32. p. 32-43.
- HERNANDEZ, H. 2005. Que tan importante es administrar la intensidad de pastoreo en nuestro rancho. (On line). < <http://cedhyp.uat.edu.mx/pdf/029.pdf>>. (14 febrero 2008).
- HILLEL, D. 1988. *Environmental soil physics*. Academic Press, London. 782 p.
- HILLEL, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego, California. 771 p.
- HOPMANS, J. TULI, A. ROLSTONA, D. Y MOLDRUP, P. 2005. Comparison of Air and Water Permeability between Disturbed and Undisturbed Soils. *Soil Science Society*. 69: 1361-1371 p.
- HORN, R. 1981. In: Eine methode zur Ermittlung der Druckbelastung von böden anhand von Drucksetzungsversuchen. *Z.F. Kulturtechnik und Flurber* (22) p 20-26.
- HORN, R. 1995. Aggregate strength of differently structured soils and its alteration with external stress application. p. 177-182.
- IVERSEN, B. MOLDRUP, P. SCHJØNNING, P. y LOLL, P. 2001. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. *Soil science*. 166 (10): 643-659.

- KIESSLING, R. GALANTINI, I. IGLESIAS, J. KRÜGER, H. y VENANZI, S. 2005. Efecto del pastoreo sobre la distribución del espacio poroso bajo dos sistemas de labranza Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. Boletín Técnico N° 44 (8187). Bordenave, Buenos Aires, Argentina.
- KORTE, C. 1984. Effects of the timing and intensity of spring grazing on reproductive development tillering and herbage production of perennial ryegrass dominant pasture. New Zealand. Journal of Agricultural Research. 27 (2):135-149.
- LUZIO, W. ALCAYAGA, S. 1990. Mapa de asociaciones de grandes grupos de suelos de Chile. VI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Chilena de la Ciencia del suelo y Universidad de la Frontera, Temuco. 285-294.
- MOLDRUP, P. YOSHIKAWA, S. OLESEN, T. KOMATSU, T. y ROLSTON, D. 2001. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils predictive model test and soil structure fingerprint. Soil Science Society of America Journal. 67: 32-40 p.
- MOLDRUP, P. OLESEN, T. KOMATSU, T. SCHJØNNING, P. y ROLSTON, D. 2003. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. Soil Science Society of America Journal. 65:613-623 p.
- MURAOKA, T. y TZI, E. 2000. Mejoramiento del uso del agua en la agricultura el papel de las técnicas nucleares. Centro de Energía Nuclear aplicada a la Agricultura, (CENA). Piracaiba, Brasil. 131p.
- NEDOREZOVA, P. GALASHINA, NTSVETKOVA, V. SUKHOVA, T. SARATOVSKIKH, S. DYACHKOVSKII, F. BABKINA, O. SLAUGHTER, R. VOGEL, H y KRETZSCHMAR, A. 1996. Topological characterization of pore space in soil simple preparation and image-processing. Geoderma. 73 (16): 23-38.

- NISSEN, J., QUIROZ, C., SEGUÉL, O., Mc DONALD, R y ELLIES, A. 2006. Flujo hídrico no saturado en Andisoles. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. 6 (1): 9-19.
- O'SULLIVAN, M. y BALL, B. 1993. The shape of the water release characteristic as affected by Tillage, compaction and soil type. Soil and tillage research. (25): 339-349.
- PARGA, J. 2006. Aspectos claves a considerar en el manejo de pastoreo con vacas lecheras sobre praderas permanentes. (On line) <<http://www.inia.cl/quilamapu/inproleche/articulosd/manejo%20de%20pastoreo.pdf>>. (15 diciembre 2007).
- PIZZIO, R. y PALLARES, R. Manejo del pastoreo y carga animal en pasturas. 2000 (On Line). <<http://www.inta.gov.ar/mercedes/info/Pubdiversas/Jornada%20pastura%20pizzioCargaAnimalMod.pdf>>. (4 abril 2008).
- REBORI, G. 1997. Redistribución de las lluvias y balance de agua de una plantación de Eucaliptus dunnii en el sur de Santa Fe. (On Line). <<http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0/forestacion/revistas/revista24/dunnii2.pdf>>. (4 enero 2008).
- REICHARDT, K. 1985. Processos de transferência no sistema solo-planta-amosfera 4ed. Piracicaba. Fundação. 445 p.
- RICHARD, G. COUSIN, I. SILLON, J. BRUAND, A. y GUÉRIF, I .2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties European Journal of Soil Science .52 (1):49-58 p.
- RODRIGUEZ, J. 1993. La fertilización de los cultivos: Un método racional. Colección Agricultura, Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. 291 p.

- ROMERO, O. 1993. Bases técnicas del manejo del pastoreo. In: Sociedad Chilena de Produccion animal (SOCHIPA A.G) Serie Simposios y compendios.1:5-21 p.
- ROSEBERG, R y McCOY, E. 1990. Soil Science Society of American Journal. 54(4):969-974 p.
- RUIZ, I. 1988.Carga animal (Capacidad talajera) y Presión de pastoreo. In: Ruiz, ed. Praderas para Chile. 2ª.ed. Santiago Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias 371-385 p.
- SADZAWKA, A. CARRASCO, R., GREZ, R. MORA, M. y FLORES, H. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Serie Actas INIA.
- SALGADO, E .2001. Curso relación suelo agua -planta. (On Line). <<http://www.ucv.cl/web/euv>. (6 Octubre 2007).
- SANDOVAL, M. CASTILLO, C. ZAGAL, E. STOLPE, N. UNDURRAGA, P. 2007.Parámetros hidráulicos determinados en un Andisol bajo diferentes rotaciones culturales después de diez años. Revista de la Ciencia y Nutrición Vegetal. 7 (2):32-45.
- SOUTHORN, N. y CATTLE, S. 2004.The dynamic of soil quality in livestock grazing systems <<http://www.regional.org.au/au/asssi/supersoil2004/s14/oral/1789-southornn.htm>>. (15 Agosto 2007).
- SOUTHORN, N. STEPHEN, C. The dynamics of soil quality in livestock grazing systems.(OnLine).<<http://www.regional.org.au/au/asssi/supersoil2004/s14/oral/1789-southornn.htm>>. (5 marzo 2007).
- SEGUEL, O. 2004 Influencia del potencial mátrico en la generación de estructura y resistencia mecánica de suelos derivados de materiales volcánicos. Tesis Doctoral. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. Doctorado en ciencias Agrarias.

- SINGH, B. CHANASYK, D. y MCGILL, W. 1996. Soil hydraulic properties of an Orthic Black Chernozem under long-term tillage and residue management. Canadian Journal of Soil Science. 76: 63-71.
- STARTSEV, A y Mc NABB, D.2001. Skidder traffic effects in water retention pore size distribution and van genuchten parameter of boreal forest soil. Soil Science Society of American 65: 224-231p.
- SUAREZ, D. 2003. Uso de la cal en el manejo de suelos ácidos. (On line). < <http://www.tattersall.cl/revista/rev179/agricola.htm>>. (10mayo 2008).
- TABOADA, M. 2007. Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. Cátedra de Fertilidad y fertilizantes. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires., Argentina. 19 p.
- TSCHAPEK, M.1969. El agua en el suelo. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 479 p.
- TORRES, E. 1994. Variación de la estructura del suelo por la intensidad y tiempo de uso. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias 45 p.
- VAN HAVEREN, B. 1983. Soil bulk density as influenced by grazing intensity and soil type on a shortgrass prairie site. Journal Range Management. (36) 5 p.
- VELASQUEZ, M. 1983. Efecto de la carga animal y contenido de humedad sobre la cohesión y fricción en un suelo Trumao y un suelo Rojo arcilloso de la Décima Región, Chile. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias 59 p.
- VYHMEISTER, R. 1980. Algunos hídricos aspectos de tres tipos de suelos del sur de Chile. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias 59 p.

WEIGEL, R. BRITTON, M. McPHERSON, R. 1990. Trampling effects from short-duration grazing on tobosa-grass range. *Journal Range Management*. 43:92-92.

WILSON, M. 2007. Distribución de poros en un suelo vertisólico de uso arrocero. (On Line). <http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/suelos/indicadores_cal/30222_070807_dist.PDF>. (20 Agosto 2008).

ZUNINO, H. y. BORIE, F. 1985. Materia orgánica y procesos biológicos en suelos alofánicos. Cap. 5. pp. 435- 480. In: Tosso. (ed). *Suelos Volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

ANEXOS

ANEXO 1 Análisis de Varianza para la densidad aparente en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo.

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00006667	0,00006667	0,31	0,6349
Bloque	2	0,00203333	0,00101667	4,69	0,1757
Residuos	2	0,00043333	0,00021667		
Total corregido	5	0,00253333			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	0,68666670	0,00849837	0,65010100	0,7232320	
8 cm	0,68000000	0,00849837	0,64343400	0,7165660	

ANEXO 2 Análisis de Varianza para el espacio poroso en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados en arcoseno de la raíz del porcentaje).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00001667	0,00001667	0,25	0,6667
Bloque	2	0,00040000	0,00020000	3,00	0,2500
Residuos	2	0,00013333	0,00006667		
Total corregido	5	0,00055000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	0,99333330	0,00471405	0,97305000	1,0136200	
8 cm	0,99666670	0,00471405	0,97638400	1,0169500	

ANEXO 3 Análisis de Varianza para los PDR en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados en arcoseno de la raíz del porcentaje).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente-F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00001667	0,00001667	0,02	0,9024
Bloques	2	0,00053333	0,00053333	0,31	0,7647
Residuos	2	0,00173333	0,00173333		
Total coregidos	5	0,00228333			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	0,30666700	0,01699670	0,23353600	0,37979800	
8 cm	0,31000000	0,01699670	0,23686900	0,38313100	

ANEXO 4 Análisis de Varianza para los PDL en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados en arcoseno de la raíz del porcentaje).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00026667	0,00026667	0,57	0,5286
Bloque	2	0,00173333	0,00086667	1,86	0,3500
Residuos	2	0,00093333	0,00046667		
Total corregido	5	0,00293333			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	0,38000000	0,01247220	0,32633600	0,4336640	
8 cm	0,36666700	0,01247220	0,31300300	0,4203300	

ANEXO 5 Análisis de Varianza para los PAU en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados en arcoseno de la raíz del porcentaje).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00026667	0,00026667	16,00	0,0572
Bloque	2	0,00010000	0,00050000	3,00	0,2500
Residuos	2	0,00003333	0,00001667		
Total corregido	5	0,00040000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	0,48333300	0,00235702	0,47319200	0,4934750	
8 cm	0,49666700	0,00235702	0,48652500	0,5068080	

ANEXO 6 Análisis de Varianza para los PAI en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados en arcoseno de la raíz del porcentaje).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00006667	0,00006667	0,57	0,5286
Bloque	2	0,00010000	0,00005000	0,43	0,7000
Residuos	2	0,00023333	0,00011667		
Total corregido	5	0,00040000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	0,53333300	0,00623610	0,50650200	0,5601650	
8 cm	0,52666700	0,00623610	0,49983500	0,5534980	

ANEXO 7 Análisis de Varianza para permeabilidad de aire a -60 hPa de presión en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00015000	0,00015000	0,00	0,9895
Bloque	2	0,04723330	0,02361670	0,03	0,9665
Residuos	2	1,36330000	0,68165000		
Total corregido	5	1,41068000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	2,59333000	0,47667200	0,54237700	4,6442900	
8 cm	2,60333000	0,47667200	0,55237700	4,6542900	

ANEXO 8 Análisis de Varianza para permeabilidad de aire a -150 hPa de presión en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00015000	0,00015000	0,00	0,9889
Bloque	2	0,16223300	0,08111670	0,13	0,8827
Residuos	2	1,22110000	0,61055000		
Total corregido	5	1,38348000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	3,03667000	0,45112800	1,09562000	4,9777100	
8 cm	3,04667000	0,45112800	1,10562000	4,9877100	

ANEXO 9 Análisis de Varianza para permeabilidad de aire a -330 hPa de presión en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,08881670	0,08881670	0,13	0,7507
Bloque	2	0,00903333	0,00451667	0,01	0,9933
Residuos	2	1,34063000	0,67031700		
Total corregido	5	1,43848000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	3,41333000	0,47269300	1,37950000	5,4471700	
8 cm	3,17000000	0,47269300	1,13617000	5,2038300	

ANEXO 10 Análisis de Varianza para permeabilidad de aire a -500 hPa de presión en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00481667	0,00481667	0,01	0,9322
Bloque	2	0,16230000	0,08115000	0,16	0,8652
Residuos	2	1,04203000	0,52101700		
Total corregido	5	1,20915000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	3,24333000	0,41674000	1,45025000	5,0364200	
8 cm	3,18667000	0,41674000	1,39358000	4,9797500	

ANEXO 11 Análisis de Varianza para el índice de conductividad de aire en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo.

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,00540000	0,00540000	2,08	0,2863
Bloque	2	0,01240000	0,00620000	2,38	0,2955
Residuos	2	0,00520000	0,00260000		
Total corregido	5	0,02300000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	0,30000000	0,02943920	0,17333300	0,4266670	
8 cm	0,24000000	0,02943920	0,11333300	0,3666700	

ANEXO 12 Análisis de Varianza para Ks (hora 1) en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,24806700	0,24806700	7,38	0,1130
Bloque	2	0,08223330	0,04111670	1,22	0,4498
Residuos	2	0,06723330	0,03361670		
Total corregido	5	0,39753300			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	2,24667000	0,10585600	1,79120000	2,7021300	
8 cm	1,84000000	0,10585600	1,38454000	2,2954600	

ANEXO 13 Análisis de Varianza para Ks (hora 6) en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,05041670	0,05041670	1,72	0,3201
Bloque	2	0,08110000	0,04055000	1,38	0,4196
Residuos	2	0,05863330	0,02931670		
Total corregido	5	0,19015000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	2,00667000	0,09885460	1,58133000	2,4320000	
8 cm	1,82333000	0,09885460	1,39800000	2,2486700	

ANEXO 14 Análisis de Varianza para Ks (hora 12) en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,08640000	0,08640000	5,59	0,1418
Bloque	2	0,20410000	0,10205000	6,61	0,1315
Residuos	2	0,03090000	0,01545000		
Total corregido	5	0,32140000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	2,03000000	0,07176350	1,72123000	2,3387700	
8 cm	1,79000000	0,07176350	1,48123000	2,0987700	

ANEXO 15 Análisis de Varianza para Ks (hora 24) en dos tratamientos 5 y 8cm de intensidad de pastoreo (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	CM	Cociente -F	P-Valor
Tratamiento	1	0,06406670	0,06406670	12,77	0,0702
Bloque	2	0,16590000	0,08295000	16,53	0,0570
Residuos	2	0,01003330	0,00501667		
Total corregido	5	0,24000000			
Tratamientos	Media	E.S	Límite inferior	Límite superior	
5 cm	1,96333000	0,04089280	1,78739000	2,1392800	
8 cm	1,75667000	0,04089280	1,58072000	1,9326100	

ANEXO 16 Comparación de las Líneas de Regresión (valores transformados log10).

Fuente	GL	SC	Raiz Cuadrada	F-Ratio	P-Valor
log ea	1	0,55691900	0,55691900	67,05	0,0012
Punto de corte	1	0,02453000	0,02453000	2,95	0,1608
Pendiente	1	0,00231456	0,00231456	0,28	0,6255
Modelo	3	0,58376400			