

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EVALUACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN
FORMACIONES VEGETACIONALES ESCLERÓFILAS DE LA ZONA
CENTRAL DE CHILE**

VÍCTOR ALEJANDRO VARGAS BAHAMONDE

Santiago, Chile

2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EVALUACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN
FORMACIONES VEGETACIONALES ESCLERÓFILAS DE LA ZONA
CENTRAL DE CHILE**

**EVALUATION OF SOME SOIL PHYSICAL PROPERTIES IN
SCLEROPHYLLOUS VEGETATION FORMATION IN CENTRAL AREA OF
CHILE**

VÍCTOR ALEJANDRO VARGAS BAHAMONDE

Santiago, Chile

2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EVALUACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN
FORMACIONES VEGETACIONALES ESCLERÓFILAS DE LA ZONA
CENTRAL DE CHILE**

Memoria para optar al título
profesional de Ingeniero Agrónomo
Mención Manejo de suelos y aguas

VÍCTOR ALEJANDRO VARGAS BAHAMONDE

Profesores Guías	Calificaciones
Sr. Juan Pablo Fuentes E. Ingeniero Forestal, M. Sc., Ph. D.	7,0
Sr. Cristian Kremer F. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,5
Profesores Evaluadores	
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo M.Sc., Dr.	6,6
Sr. Víctor Escalona C. Ingeniero Agrónomo Dr.	6,5

Santiago, Chile

2012

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, en particular a mis padres Víctor Hugo y Ángela, como también a mi hermano Matías, por el apoyo incondicional y sacrificio para entregarme siempre la mejor educación. A mis tíos Rene y Bernardita, mi primo Martín y padrinos Ángel y Kathy, por apoyarme siempre en mis decisiones. También dar las gracias a una persona incondicional en mi vida, con la cual comparto este momento culmine de mi etapa universitaria, Fernanda Alejandra Cerda González.

Quiero nombrar también a mis compañeros y amigos más cercanos en la Universidad y con los cuales compartí muchas anécdotas y bellos momentos; Iván, Seba, Tano, Pato, Karsu, Nacho, Manu, Canopia, Xixo, Amandita, Carlita, Nacho, Moni, Yelko, Vega, Manu Aguilera, Víctor Pavez y muchos más.

Agradecer a mi profesor guía Juan Pablo Fuentes por sus comentarios, dedicación e importantes aportes en la realización de esta investigación, aparte de toda la experiencia adquirida de su parte tanto a nivel personal como profesional. También agradecer a mi otro profesor guía Cristian Kremer por sus correcciones que sin duda permitieron realizar un mejor trabajo. Dar las gracias a mi profesor evaluador Oscar Seguel, por sus consejos y observaciones, que permitieron un mejor desarrollo de esta memoria, y a través del cual recibí un gran apoyo y formación a lo largo de mi etapa en la Universidad, y finalmente al profesor Víctor Escalona por sus comentarios siempre asertivos.

No puedo dejar de mencionar a una persona que fue el alma del laboratorio Ventura Matte, la cual fue fundamental en la realización de muchas memorias incluyendo la mía, una persona que ya no forma parte de la Universidad, pero que sin duda a dejado un gran legado y a la cual estimo mucho, por su cariño y apoyo, gracias Sra. Cristina Sáez.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Descripción general del área	7
Clima.....	7
Suelo	7
Situaciones vegetacionales.....	8
Metodología	10
Obtención de muestras de suelo.....	10
Distribución de horizontes en los perfiles	10
Análisis de laboratorio	11
Estimación de la curva característica del suelo y de la conductividad hidráulica.....	12
Análisis estadístico	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
Densidad aparente (ρ_b)	15
Curva característica.....	19
Retención de agua	21
Distribución de tamaño de poros	24
Conductividad hidráulica efectiva (K_{ef})	27
Movimiento hidráulico en el perfil (K_s)	29
Correlaciones (K_s vs ρ_b)	30
CONCLUSIONES	31
BIBLIOGRAFÍA	32
ANEXOS	36
Anexo I. Porcentaje de materia orgánica y fertilidad (N, P y K) correspondiente a cada situación vegetacional en distintos niveles de profundidad.	36
APÉNDICES	38
Apéndice I. Profundidad de los distintos horizontes para cada situación vegetacional.	38

Apéndice II. Valores de densidad aparente y retención de agua a tensiones de -33 kPa y -1500 kPa en cada horizonte	38
Apéndice III. Valores de K_{ef} (saturada), $K_{ef} (-33kPa)$ y $K_{ef} (-1500kPa)$ en cada situación vegetal.	38
Apéndice IV. Valores de conductividad hidráulica saturada (K_s) de cada horizonte en las distintas situaciones vegetacionales.	39
Apéndice V. Textura de los distintos horizontes en cada una de las situaciones vegetacionales.	39
Apéndice VI. Densidad Real (ρ_r) de los distintos horizontes correspondientes a cada una de las situaciones vegetacionales.	40
Apéndice VII. Valores de los parámetros Mualem-Van Genuchten de cada situación vegetal.	40
Apéndice VIII. Parámetros Mualem-Van Genuchten graficados en cada situación vegetal.	41
Apéndice IX. Ajuste de la curva de retención de agua estimada por la metodología Mualem-Van Genuchten para cada horizonte de forma individual de cada situación vegetal.	43
Apéndice X. Características Físicas y Morfológicas de los pedones en las distintas situaciones vegetacionales	45

RESUMEN

Los ecosistemas esclerófilos de Chile están constantemente sometidos a variados tipos de perturbaciones, con lo cual se afectan las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Este estudio se realizó en la reserva nacional Roblería Los Cobres de Loncha, donde se analizaron cuatro situaciones vegetacionales con distinto grado de perturbación: bosques de Peumo (situación de menor perturbación, *PEU*), seguido de bosques de Peumo – Litre – Quillay (*PLQ*), matorral de Quillay – Tevo – Colliguay (*QTC*) y finalmente la situación mayormente intervenida, correspondiente a una pradera abierta con Espino (*ESP*). Se analizaron propiedades físicas que influyen directamente en los procesos hidráulicos que ocurren en el suelo, como lo son la densidad aparente (ρ_b), la capacidad de retención de agua (-33kPa y -1500kPa), la distribución de tamaño de poros, la conductividad hidráulica efectiva a saturación ($K_{ef,sat}$) a -33 kPa ($K_{ef-33\text{kPa}}$) y -1500 kPa ($K_{ef-1500\text{kPa}}$), como así también se realizó la curva característica del suelo ajustada al modelo Mualem-Van Genuchten. Los mayores valores de ρ_b se encontraron en *ESP* ($1,47\text{ Mg/m}^3$), dado principalmente porque esta situación ha tenido el mayor grado de intervención, la cual ha influido en la pérdida de horizontes superficiales, resultando en una menor porosidad total y disminuyendo el flujo hídrico en el perfil. Por el contrario, *PEU* tuvo los menores valores de ρ_b ($0,99\text{ Mg/m}^3$), principalmente en superficie, producto del alto contenido de materia orgánica (*MO*), aumentando la porosidad gruesa y el flujo hídrico en el suelo. Las situaciones *PLQ* y *QTC* son medianamente perturbadas, y de acuerdo a los análisis realizados, los valores de las propiedades físicas medidas se encuentran entre los del *PEU* y los de *ESP*. Este estudio refleja la importancia de mantener un equilibrio en el sistema edáfico, la degradación del suelo altera el flujo hídrico afectando de manera directa el tipo de vegetación que se desarrolla.

Palabras Claves: Degradación del suelo, densidad aparente (ρ_b), retención de agua, distribución de tamaño de poros, conductividad hidráulica efectiva (K_{ef}), bosque esclerófilo.

ABSTRACT

Chilean sclerophyll ecosystems are constantly impacted by several disturbance processes, consequently affecting the soil physical, chemical and biological properties. We analyzed four typical sclerophyll vegetation types of Central Chile at the Reserva Nacional Roblería Los Cobres de Loncha: Peumo forests (the least perturbed vegetation type, *PEU*), followed by more perturbed Peumo – litre – Quillay (*PLQ*) and Quillay-Tevo-Colliguay (*QTC*) vegetation types, and finally the most perturbed situation, the savanna-type Espinal (*ESP*). We evaluated various soil physical properties that directly affect soil hydraulic processes, such as soil bulk density (ρ_b), soil water retention (-33kPa y -1500kPa), soil pore distribution, effective hydraulic conductivity at saturation ($K_{ef_{sat}}$), at -33 kPa ($K_{ef_{-33\text{kPa}}}$), and at -1500 kPa ($K_{ef_{-1500\text{kPa}}}$). The soil water release curve was also fitted to the Mualem-Van Genuchten model. The highest ρ_b values were found under *ESP* (1.47 Mg/m^3), which is characterized by the historical loss of surface soil horizons due to erosion. The high bulk density values have resulted in lower total soil porosities and lower hydraulic fluxes across the soil profile. In contrast, *PEU* had the lowest ρ_b values (0.99 Mg/m^3 in topsoil samples) due to the greatest amount of soil organic matter (SOM), which increased coarse porosity and consequently the hydraulic flux. Physical properties in the medium-perturbed, *PLQ* and *QTC* situations were in-between the values of *ESP* and *PEU*. This study reflects the importance of maintaining the equilibrium in the soil system. Land degradation alters the hydrological balance, thereby directly affecting vegetation development.

Key-words: Soil degradation, soil bulk density (ρ_b), soil water retention, pore size distribution, effective hydraulic conductivity (K_{ef}), sclerophyllous forest.

INTRODUCCIÓN

La reserva nacional Roblería los Cobres de Loncha se encuentra ubicada en los cordones cordilleranos transversales del valle central de Chile, al sur de la Provincia de Melipilla, en la Comuna de Alhué, Región Metropolitana. Estos suelos se encuentran circunscritos al secano interior de la cordillera de la Costa y la depresión intermedia, por lo que están principalmente determinados por las propiedades del relieve (EULA, 2004). La reserva tiene una extensión de 5.870 km², dentro de la cual se pueden identificar distintas formaciones vegetacionales, entre éstas: bosques de Peumo, bosques de Peumo – Litre - Quillay, matorrales de Quillay – Tevo – Colliguay y praderas con Espino. Cada una de estas áreas ha sido influenciada históricamente en mayor o menor grado por actividades antrópicas tales como carboneo, agricultura extensiva y ganadería (U. de Chile, 2007). Debido a estos usos, el eventual sistema de equilibrio que debiese existir en la zona se ha visto perturbado, causando una merma en el estado de conservación de los recursos vegetales y edáficos.

Entre las propiedades del suelo que pueden ser altamente influenciadas por la actividad humana se encuentra la conductividad hidráulica (K), la cual corresponde a la capacidad de un medio poroso para transmitir agua, siendo un parámetro esencial en el ámbito agrícola, hidrológico y ambiental (Hillel, 1998). La conductividad hidráulica es una propiedad muy variable, dependiente de la estructura del suelo, de la textura y de las características del sistema poroso (diámetro, continuidad y tortuosidad), pudiendo este último ser representado a través de la curva de retención de agua del suelo, o curva característica. Alteraciones en el sistema poroso tales como el sellamiento, disrupción de la continuidad o variación del tamaño de éstos generan, por ende, un cambio en la K del suelo (Honorato, 2000).

La conductividad hidráulica del suelo es una expresión de la capacidad completa del sistema edáfico para transmitir agua, la cual cobra especial atención, por cuanto su determinación es indispensable para relacionar el movimiento del agua con los procesos erosivos que a su vez pueden estar influenciando una pérdida de horizontes superficiales (Lal y Stewart, 1990). En sectores de laderas, cuando la intensidad de la precipitación es superior a la tasa de infiltración, no solo se produce la acumulación del agua en superficie, sino que se moviliza en forma de escorrentía, conjuntamente con el suelo (Dexter *et al.*, 2004). De este modo, las características de las precipitaciones naturales de la zona (intensidad, duración y frecuencia) y su relación con la tasa de infiltración del suelo, la cual es función de K , determinan la cantidad de escorrentía superficial (Soil Survey Division Staff, 1993).

Estimar la curva característica del suelo y K en distintos sectores degradados por acción antrópica, permite obtener la relación existente entre la capacidad que tiene el suelo para almacenar agua en función de la tensión ejercida y el movimiento hídrico a través del perfil, pudiendo así (Stakman, 1980): estimar valores de agua característicos de la relación suelo-agua-plantas (e.g. capacidad de campo, CC y punto de marchitez permanente, PMP); y determinar la relación entre la tensión del agua y otras propiedades físicas del suelo como

lo es la porosidad, evidenciando procesos que pudiesen estar causando una merma en el sistema edáfico, generando eventualmente una pérdida de horizontes superficiales por erosión (Dexter *et al.*, 2004).

Helal (1990) citado por Seguel (2004), señala que el transporte de agua en el suelo es un indicador de la calidad y continuidad del sistema poroso. El espacio poroso se ve afectado por una consolidación antropogénica que se produce por el tránsito, pisoteo, y laboreo del suelo, al igual que una carga animal alta que se refleja en un cambio de la morfología del espacio poroso, disminuyendo la porosidad total y aumentando la porosidad fina por sobre la porosidad gruesa, lo que determina una disminución de la capacidad de transmitir agua en el suelo.

Situaciones altamente degradadas, traen como consecuencia una alteración en la estructura del suelo (Horn y Smucker, 2005), siendo esto relevante en los factores geométricos del sistema poroso, lo que eventualmente termina por influir en una baja conductividad hidráulica (Dörner y Horn, 2006). Ellies *et al.* (1997) señalan que en suelos manejados con sistemas conservacionistas se incrementa la porosidad gruesa, aumentando la conductividad de agua; mientras que el efecto compactante del tráfico de maquinaria agrícola y del pisoteo continuo de animales disminuye este valor (Hartge y Ellies, 1990).

Torres *et al.* (2006), estudiaron el comportamiento de la conductividad hidráulica en diferentes situaciones de manejo contrastante, siendo la no perturbada una situación de bosque natural, con una K de 194,4 cm/día y una porosidad total de 45,4% promedio, en tanto una situación manejada con residuos de leguminosas medianamente intervenida, presenta en promedio una K de 96,24 cm/día y una porosidad total de 37,67%, otra situación similar consiste en un manejo con residuos de gramíneas, la cual tuvo en promedio una K de 93,48 cm/día y una porosidad total de 39,29%; también se consideró una situación sin residuos, en la que se eliminaron los restos de cosecha, en ésta la K fue de 81,48 cm/día y la porosidad total de 38,12% promedio. Finalmente la situación con mayor grado de alteración correspondió a una situación con manejo convencional, en que se obtuvieron en promedio resultados de K de 54 cm/día y una porosidad total de 35,4%.

Actualmente, producto de un mal manejo del recurso suelo, los procesos erosivos representan una gran problemática, afectando alrededor de un 46% del territorio nacional (Francke *et al.*, 1999). Las diferencias en las propiedades físicas del suelo en la reserva nacional Roblería los Cobres de Loncha, están condicionadas por las características intrínsecas de cada suelo y por el grado de perturbación antrópico al cual han sido sometido, con lo cual realizar una evaluación de las propiedades físicas se hace indispensable.

Objetivo general

Determinar las propiedades físicas asociadas al movimiento de agua en el suelo, bajo cuatro sistemas esclerófilos con distinto grado de perturbación en la reserva nacional Roblería los Cobres de Loncha.

Objetivos específicos

Para cada suelo y respectivos horizontes ubicados bajo los ecosistemas en estudio:

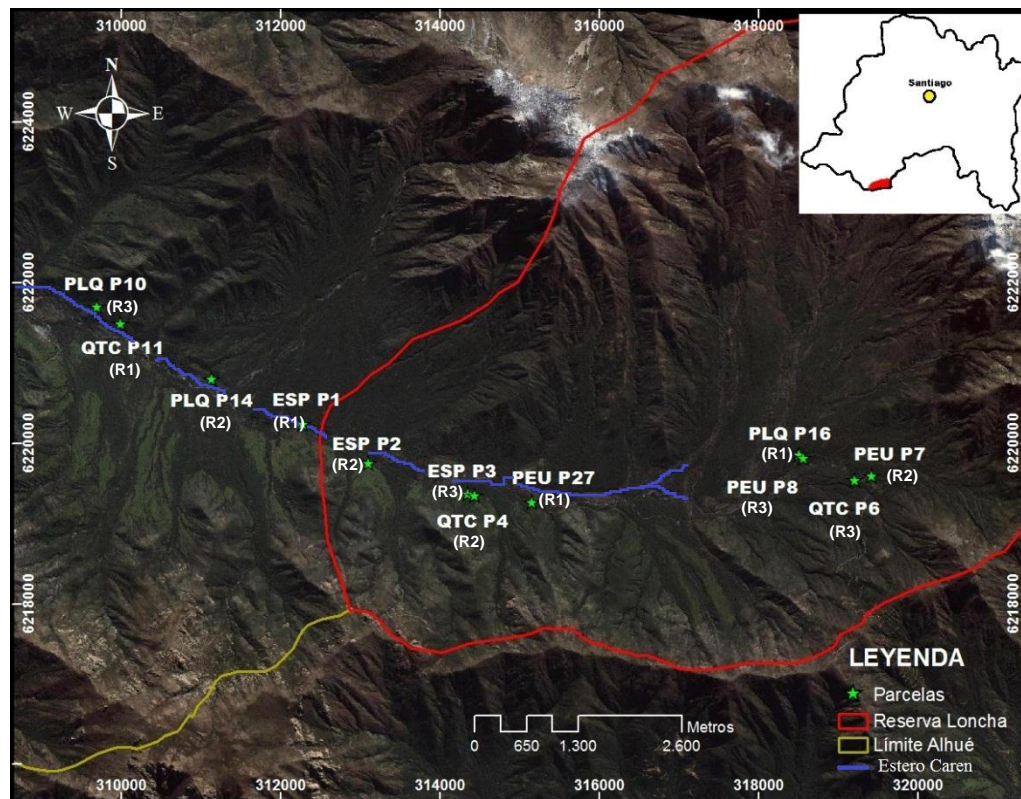
Determinar las principales propiedades físicas: densidad aparente, retención de agua a -33 kPa y -1500 kPa, textura y distribución de tamaño de poros, relacionándolas con el estado de degradación del bosque esclerófilo.

Estimar mediante el modelo de Mualem – Van Genuchten la conductividad hidráulica (K) de los distintos horizontes.

A partir de los valores individuales de la conductividad hidráulica obtenida para cada horizonte, determinar la conductividad hidráulica efectiva (K_{ef}) de cada suelo.

MATERIALES Y MÉTODO

El estudio se realizó en la Reserva Nacional Roblería los Cobres de Loncha (Figura 1), localizada en la Comuna de Alhué, Provincia de Melipilla, Región Metropolitana (34° 05 ' 34.11" S; 70° 03 ' 18.85" O; 312000-6225000 y 324000-6217000 UTM). Los análisis de las muestras de suelo se llevaron a cabo en el laboratorio Ventura Matte, dependiente de la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile.



Fuente: Fotografía recopilada a partir de proyecto FONDECYT 1090283.

Figura 1. Distribución de las distintas parcelas muestreadas en la reserva nacional Roblería Los Cobres de Loncha: Bosque de *Cryptocarya alba* (PEU); Bosque de *Lithrea caustica* - *Cryptocarya alba* - *Quillaja saponaria* (PLQ perturbado); Matorral de *Colliguaja odorífera* y *Retamilla trinervia* con árboles dispersos de *Quillaja saponaria* (QTC, altamente perturbado); y Pradera abierta con *Acacia caven* (ESP, más perturbado).

Descripción general del área

Clima

El clima se enmarca en el dominio del tipo climático templado-cálido y se caracteriza por presentar entre Noviembre y Abril temperaturas medias sobre los 25°C. En invierno es frecuente la precipitación nival sobre los 900 m.s.n.m. (CONAF 2008). El período libre de heladas es de 306 días, con un promedio de dos heladas por año. El régimen de precipitaciones presenta una media anual de 503 mm, un déficit hídrico de 956 mm y un periodo seco de 7 meses (PUC y CODELCO, 2002).

Suelo

Según EULA (2004) y U. de Chile (2007), en el área comprendida por la reserva nacional se encuentran las formaciones geológicas Lo Prado y Veta Negra, de rocas estratificadas pertenecientes al Cretácico. Además, en los sectores más bajos y planos se encuentran sedimentos fluviales cuaternarios (antiguos y recientes), asociados al cajón ocupado por el estero Carén (Figura 1). La porción superior de la cuenca del estero Carén se caracteriza por presentar un valle estrecho, rodeado de cerros graníticos de fuertes pendientes (PUC y CODELCO, 2002).

Los suelos de la reserva correspondientes al área de estudio fueron clasificados potencialmente dentro del orden de los Alfisoles. La descripción física y morfológica de los suelos se encuentran en el apéndice X. Estos suelos presentan características edáficas propias de acuerdo a su ubicación y exposición dentro de la Reserva, encontrándose cada uno con distintos grado de intervención antrópica o perturbación; por ende, se desarrollan variadas especies arbóreas y arbustivas en función del grado o intensidad histórica de perturbación (indicadas en orden creciente de acuerdo al grado de alteración) según se muestra en la Figura 2.

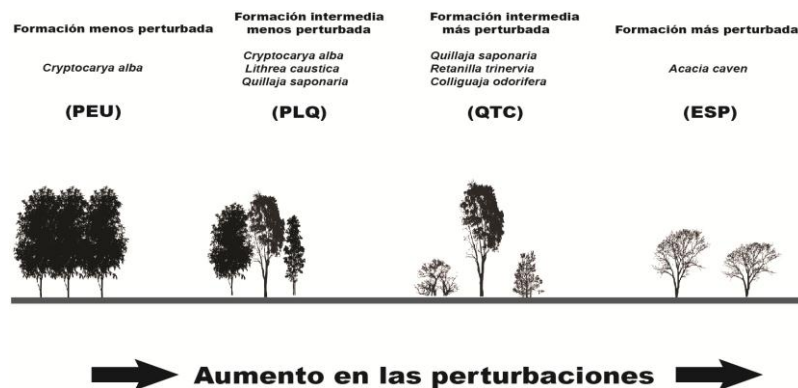


Figura 2. Modelo hipotético de degradación de suelos y vegetación en un ecosistema esclerófilo de Chile central: (i) Bosque de *Cryptocarya alba* (PEU) (ii) Bosque de *Lithrea caustica* - *Cryptocarya alba* - *Quillaja saponaria* (PLQ), (iii) Matorral de *Colliguaja odorifera* y *Retanilla trinervia* con árboles dispersos de *Quillaja saponaria* (QTC) (iv) Pradera abierta con *Acacia caven* (ESP). Fuente: Proyecto FONDECYT 1090283.

Situaciones vegetacionales:

Bosque de Peumo (*Cryptocarya alba* (Molina) Looser) (PEU)

Corresponde a una zona mínimamente alterada, su distribución en la zona involucra, en general, lugares cercanos al Estero Carén. Sube a mayores alturas (por sobre los 900 m.s.n.m.) alejándose del estero por las riberas de las quebradas del piedemonte (CONAF 2008). Se encuentra formando un bosque denso, con cobertura sobre el 90%, en donde existe una capa de hojarasca de unos 5 cm de grosor sobre el suelo. Este bosque de Peumo se ha desarrollado por más de 25 años, presenta una pendiente promedio de 13%.



Figura 3. Situación vegetacional bosque de Peumo.

Bosque de Peumo – Litre (*Lithraea caustica* (Molina) Hook y Arn.) – Quillay (*Quillaja saponaria* Molina) (PLQ)

Corresponde a una zona medianamente alterada, con pendiente promedio de 10%. Está compuesta por una estrata arbórea formada por Peumo, Litre y Quillay. La transformación de bosque a un matorral alto y denso da lugar a los primeros estados de degradación del suelo, esto debido al uso de actividades extensivas y extractivas (ganadería, producción de madera, leña y carbón) (U. de Chile, 2007).

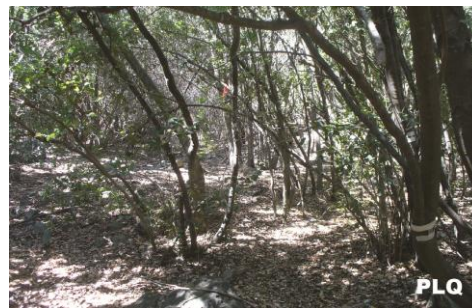


Figura 4. Situación vegetacional bosque de Peumo – Litre – Quillay.

Matorral de Quillay – Tevo (*Trevoa trinervis* Miers) – Colliguay (*Colliguaja odorífera* Molina) (QTC)

Corresponde a una zona altamente alterada, presenta una pendiente promedio de 10%. Este sistema está compuesto principalmente por vegetación arbustiva, la que está dada principalmente por vegetación herbácea acompañante. Estas formaciones vegetacionales son producto de tala, carboneo y pastoreo en mayor grado que *PLQ*.



Figura 5. Situación vegetacional matorral de Quillay – Tevo – Colliguay.

Pradera con Espino (*Acacia caven* (Molina) Molina) (ESP)

Esta formación se ubica dentro de la reserva en sectores con poca superficie y corresponde a la zona con máxima alteración, presentando una pendiente promedio de 23%. La tendencia del espino es a presentarse puro (CONAF 2008). Corresponde al sistema con mayor intervención antrópica, fue sometido a tala, carboneo, pastoreo y producción agrícola con aradura convencional durante varias décadas.



Figura 6. Situación vegetacional pradera con Espinos.

Metodología

Obtención de muestras de suelo

En terreno se procedió a tomar muestras de suelo inalteradas de volumen conocido durante el mes de Septiembre de 2010. Cada situación vegetacional (*PEU*, *PLQ*, *QTC* y *ESP*) se encontró espacialmente representada en distintas áreas de la reserva distribuidas aleatoriamente (Figura 1), con lo cuál se pudieron establecer tres repeticiones reales para cada situación vegetacional en estudio, dando un total de 12 áreas de muestreo, cada unidad experimental tuvo una superficie mínima de 200 m². En cada área se realizó una calicata hasta los 50 cm de profundidad aproximadamente. Los perfiles fueron descritos de acuerdo a la metodología establecida por el Soil Survey Division Staff (2010), identificando morfológicamente los horizontes y espesor de éstos (Apéndice X).

La obtención de muestras de suelo se realizó mediante un muestreador de núcleos (Modelo 0200, Soil Moisture Equipments, EEUU), el cual inserta cilindros (diámetro interno del cilindro = 5,4 cm y longitud = 3,0 cm) mediante un sistema de percusión manual. Se extrajo una muestra inalterada por horizonte, totalizando 33 muestras.

Distribución de horizontes en los perfiles

Dado que la posición fisiográfica varía en cada situación vegetacional, la distribución de horizontes es característica y distinta para cada caso. La Figura 7 presenta un esquema de la distribución de horizontes, a partir de lo cual se basó el muestreo y posterior análisis de los resultados.

Las situaciones *PEU*, *PLQ* y *QTC* tuvieron un desarrollo de horizonte en superficie con características minerales, mezclado con materia orgánica humificada, la que se pudo encontrar en mayor o menor cantidad. En profundidad aparecieron rasgos minerales, pero esta vez asociados a rocas meteorizadas o también a concentraciones de material iluviado.

La distribución de horizontes permitió realizar comparaciones entre situaciones vegetacionales a profundidades similares, sin embargo hay que tener en cuenta que la situación bajo Espino (*ESP*) correspondió a un perfil decapitado por erosión, presentando generalmente en superficie un horizonte Bt con acumulación de arcillas; se hizo evidente la ausencia de un horizonte A, debido al desplazamiento que sufrió el material hacia zonas más bajas, favorecido por la pendiente mayor al 20%.

Cabe señalar que para las situaciones de *P*, *PLQ* y *QTC* se obtuvieron muestras del 1°, 2° y 3° horizonte, pero en el caso de *ESP* por condiciones de elevada pedregosidad y contenido de rocas solo fue posible muestrear el 1° y 2° horizonte.

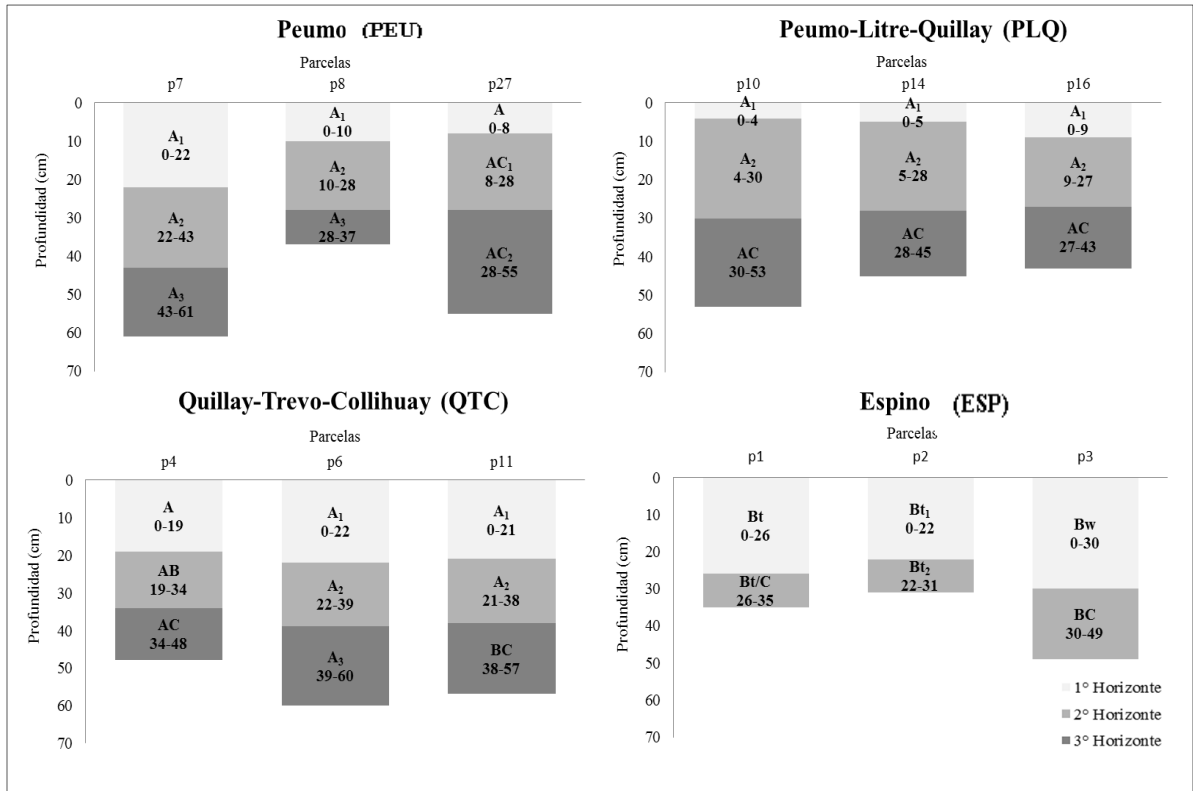


Figura 7. Esquema correspondiente a los horizontes de suelo de cada situación vegetal de las parcelas en estudio.

Análisis de laboratorio

Se estimó la curva característica del suelo a partir de las relaciones de contenido de agua volumétrico (θ_v) y potencial mátrico (ψ_m). Para esto, a cada muestra de suelo inalterada se le determinó el contenido de agua con potenciales de 0; -0,25; -1; -3,16; -6,31 y -10 kPa, utilizando para este efecto una caja de arena (Sandbox modelo 08.01, Eijkelkamp, Holanda) hidráulicamente conectada a las muestras. Posteriormente, se estableció la relación entre θ_v y ψ_m con valores de -20; -30; -40; -100; -200; -300 y -450 kPa, para lo cual el agua de los poros fue extraída mediante una olla a presión (5 Bar Pressure Plate Extraction modelo 1600, Soil Moisture Equipments, EEUU). La relación entre θ_v y ψ_m para potenciales menores a -450 kPa se determinó con un medidor de punto de rocío (WP4 Dewpoint Potentiometer, Decagon Devices, EEUU), considerando potenciales en el rango de los -1000, -1500 y -2000 kPa.

Para cada potencial, el contenido de agua gravimétrico (θ_g) fue obtenido a partir de las determinaciones de masa realizadas en cada muestra luego de haber alcanzado condiciones de equilibrio (inexistencia de pérdida de agua). Al final del proceso de extracción de agua las muestras fueron sometidas a secado en horno a temperatura de 105°C durante 24 horas, registrando la masa en una balanza antes y después del secado, de donde se obtuvieron sus correspondientes pesos húmedos y secos (Forsythe, 1975).

Posterior al secado se llevó a cabo la determinación de la ρ_b , la cual fue obtenida a partir del método del cilindro descrito por Blake y Hartge (1986a). La densidad real (ρ_r) de las partículas que constituyen al suelo se obtuvo aplicando el método de picnómetro (Blake y Hartge, 1986b).

Los contenidos de agua en función de las variaciones de masa (contenido de agua gravimétrico) fueron ponderados en función de la ρ_b de cada muestra, y de esta manera se obtuvo el θ_v necesario para la construcción de la curva característica, la cual posteriormente fue utilizada para la estimación de la distribución de tamaño de poros.

De acuerdo a Martínez *et al.* (2008) los poros del suelo fueron clasificados de acuerdo a los datos de retención de agua determinados en: poros de agua no disponible (*PAND*, potencial mátrico <-1500 kPa), poros de agua disponible (*PAD*, potencial mátrico entre valores ≥ -1500 y ≤ -33 kPa), poros de drenaje lento (*PDL*, potencial mátrico entre valores > -33 y ≤ -10 kPa) y poros de drenaje rápido (*PDR* > -10 kPa).

La distribución del tamaño de las partículas (arena, limo y arcilla) se determinó a partir de muestras alteradas de 50 g de peso por el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962). Este método implica someter las muestras de suelo a la acción de un agente dispersante y a agitación mecánica. Posteriormente, la densidad de la suspensión suelo-agua se determinó con un hidrómetro calibrado. Finalmente, las lecturas entregadas por el hidrómetro, a diferentes intervalos de tiempo, permitieron calcular los porcentajes de las diferentes fracciones de partículas sólidas (Dewis y Freitas, 1970).

Estimación de la curva característica del suelo y de la conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (K) se estimó a partir de valores de ajuste obtenidos desde la curva característica (Van Genuchten, 1980) en conjunto con el modelo de distribución de tamaño de poros (Mualem, 1976). Esta metodología es una de las más utilizadas a nivel mundial, la cual es considerada una aproximación simple de K y que se relaciona directamente al análisis de la curva característica de agua en el suelo.

Para la construcción de la curva característica, los valores volumétricos de agua (obtenidos experimentalmente) se ajustaron al modelo paramétrico Mualem – Van Genuchten con el soporte informático RETC y de esta manera se estimó la conductividad hidráulica (Van Genuchten *et al.*, 1991). La relación tensión-contenido de agua del suelo se expresa de la siguiente manera:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

θ_r = Contenido volumétrico de agua residual (cm^3/cm^3)

θ_s = Contenido volumétrico de agua a saturación (cm^3/cm^3)

α y n = Parámetros asociados a la forma de la curva

$m = 1 - 1/n$

h = Carga hidráulica (cm)

Luego se reescribe la ecuación para definir la saturación efectiva (S_e) (Shaap y Leij, 2000):

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{(\frac{1}{n}) - 1} \quad (\text{Ecuación 2})$$

La que en definitiva se utiliza conjuntamente con el modelo de distribución de tamaño de poros (Mualem, 1976) para generar el modelo Mualem – Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) y de esta manera estimar la conductividad hidráulica (Shaap y Leij, 2000):

$$K(S_e) = K_0 S_e^L \left\{ 1 - \left[1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right]^m \right\}^2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

K_0 = Punto que coincide con la saturación, similar pero no necesariamente igual a la conductividad hidráulica saturada (K_s)

L = Valor de tortuosidad de poros empírica que se estima normalmente como 0,5 (Mualem, 1976)

Finalmente, la conductividad hidráulica efectiva (Hillel, 1998) fue estimada en los sectores de muestreo correspondiente a cada sistema esclerófilo. El modelo se expresa de la siguiente manera:

$$K_{ef} = \frac{\Delta H}{R_{h1} + R_{h2} + R_{hx}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

K_{ef} = Conductividad hidráulica efectiva (cm/día)

ΔH = Carga hidráulica en todo el sistema (cm), la cual en este caso es equivalente a la profundidad total del perfil de suelo analizado

$(R_{h1} + R_{h2} + R_{hx})$ = Resistencias hidráulicas de cada horizonte o capa definida:

$$R_{hx} = Z_x / K_{sx}$$

En que Z_x corresponde al espesor del horizonte o capa x (cm) y K_{sx} es la conductividad hidráulica saturada del horizonte o capa x , la cual es obtenida con el software RETC, y que posteriormente es utilizada para estimar la conductividad hidráulica efectiva (K_{ef}) de cada perfil.

La K_{ef} permite estimar la velocidad del flujo hidráulico en profundidad, la cual es dependiente de las características intrínsecas de cada suelo, como lo es la densidad aparente (ρ_b), la capacidad de retención de agua, la cantidad de MO , y la distribución de tamaño que tengan los poros presentes en el suelo.

Análisis estadístico

Para evaluar las diferencias estadísticas significativas entre los ecosistemas en estudio (PEU , PLQ , QTC , ESP), se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con una confianza del 95%, en donde las variables medidas fueron: densidad aparente, retención de agua (-33 kPa, -1500 kPa) y conductividad hidráulica efectiva de los perfiles de suelo (K_{ef}). Las diferencias significativas en las medias de estas propiedades fueron determinadas mediante el test de diferencias mínimas significativas (LSD), con un $p \leq 0,05$. Previo al análisis, los datos fueron evaluados en términos de cumplir los supuestos de homogeneidad de varianza y distribución normal de los residuos.

Además se realizó un análisis de correlación de Pearson ($p \leq 0,001$) como un análisis de regresión lineal simple entre la ρ_b y la Ks para las distintas formaciones vegetacionales. Los análisis se llevaron a cabo con el soporte estadístico Minitab 16.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad aparente (ρ_b)

La densidad aparente fue significativamente diferente entre las situaciones de estudio, particularmente en superficie. En la Figura 8 se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los suelos de las distintas situaciones vegetacionales.

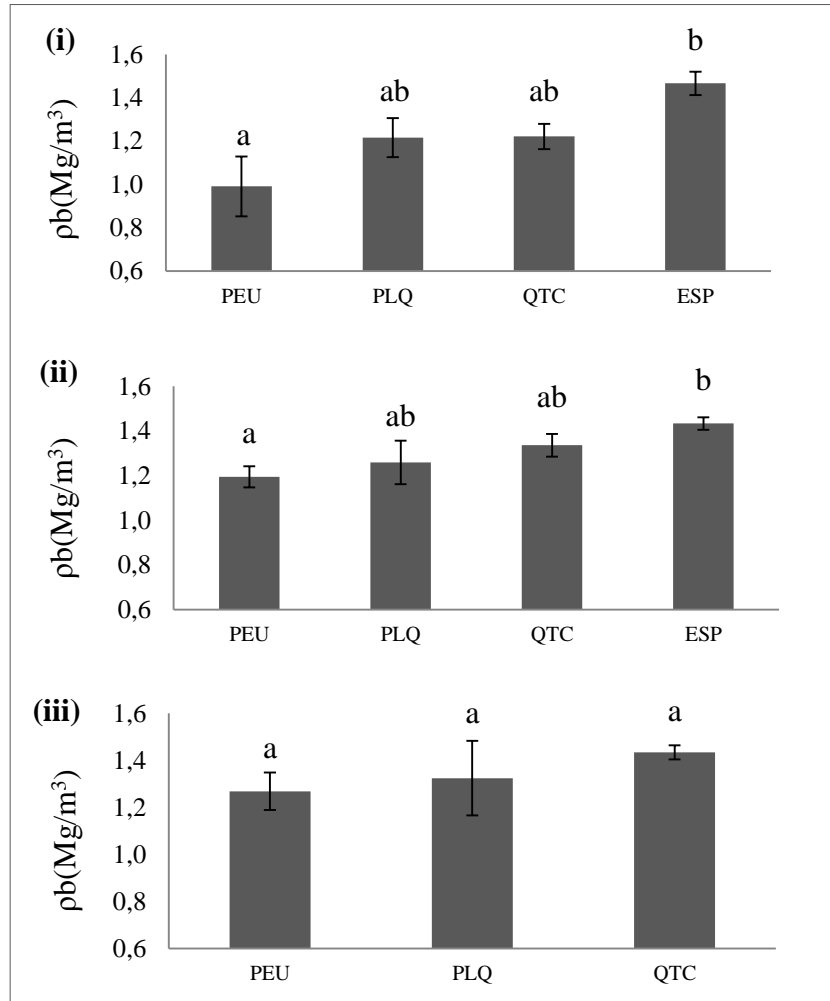


Figura 8. Valores de ρ_b (Mg/m^3) de cada horizonte: (i) 1° horizonte; (ii) 2° horizonte; (iii) 3° horizonte, correspondiente a los suelos de cada una de las situaciones vegetacionales. Las diferencias significativas se indican para un mismo horizonte con letras según comparación múltiple de promedios LSD de Fisher a un nivel de significancia del 5%. Las barras de error representan \pm un error estándar (n = 3).

La ρ_b fue un buen indicador de algunas importantes propiedades características del suelo, entre las cuales se puede contar: porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración, las cuales pueden verse afectada por factores como textura, estructura y materia orgánica.

Una ρ_b baja implicó suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y crecimiento radical, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de los árboles (*PEU*). Por otro lado, valores altos (*ESP*), correspondieron a suelos compactos o poco porosos, con baja aireación, y con baja conductividad hidráulica (*K*), pudiendo provocar anegamiento y dificultad para las raíces para poder elongarse y penetrar en el suelo. En estas condiciones, el desarrollo y crecimiento de los árboles fue impedido o retardado consistentemente (Donoso, 1992).

Según Carter (2002), niveles adecuados de *MO* contribuyen a disminuir la ρ_b y la resistencia a la compactación del suelo. Como se muestra en la figura 8i, la situación de *PEU* presentó los valores en superficie más bajos de ρ_b ($0,99 \text{ Mg/m}^3$), lo cual se debe a la alta cantidad de *MO* (anexo I) como consecuencia del aporte que genera la hojarasca, provocando así un incremento en la porosidad gruesa del suelo, siendo esto determinante en la permeabilidad y aireación de éste (Kehr, 1983); además se puede producir un incremento en la infiltración del agua (Bruce *et al.*, 1992) y en el contenido de agua aprovechable (Hudson, 1994). En el otro extremo, *ESP* evidenció el impacto causado a través de una disminución en el contenido de *MO* (Anexo I), lo que generó una alta ρ_b , sobre $1,40 \text{ Mg/m}^3$, afectando la capacidad espontánea que tiene el suelo para formar agregados. Kay (1999), establece que la perturbación de la estructura trae como consecuencias procesos de degradación como compactación y cementación, que disminuyen la productividad de los sistemas, causa del deterioro de la porosidad gruesa y el aumento de la resistencia mecánica del sistema edáfico (Bocic, 1972; Honorato, 2000).

En superficie, las situaciones *PLQ* y *QTC* tuvieron valores similares de ρ_b (Figura 8i), son situaciones medianamente intervenidas, tomando valores entre *PEU* y *ESP*. Siendo la ρ_b un indicador de la compactación del suelo, el bosque de Peumo correspondió a la situación con menor grado de perturbación y, por el contrario, la situación de Espino la que presentó mayor grado de degradación.

Respecto al análisis estadístico en el primer horizonte, *PEU* mantuvo diferencias significativas con *ESP*, sin embargo ninguno de estas situaciones presentó diferencias significativas con *PLQ* y *QTC* (Figura 8i).

En profundidad se evidencio un aumento paulatino de la ρ_b para las situaciones de *PEU*, *PLQ* y *QTC* (Figura 8iii), producto de una disminución de la *MO* (Anexo I), no así en *ESP*, en donde la ρ_b se mantuvo alta, siendo factor el pisoteo continuo de los animales que generó un alto grado de compactación (Ellies *et al.*, 1994a, 1994b).

A este respecto cabe señalar que en *ESP* existió una evidente pérdida del horizonte A superficial, producto de la fuerte pendiente existente (sobre un 20%) y a la baja cobertura vegetal, lo que eventualmente favoreció los procesos erosivos, quedando expuesto el suelo con un horizonte B con gran contenido de arcillas (Apéndice V); además la casi nula

existencia de aporte orgánico provocó un aumento de la resistencia mecánica del suelo, dificultando el crecimiento radical de las especies vegetales presentes.

La importancia de la *MO* es que actúa como ligante entre las partículas aumentando los valores de ángulo de fricción, evitando la pérdida de suelo a zonas más bajas producto de agentes erosivos (Hartge y Horn, 1992), además protege al suelo frente a acciones antrópicas (laboreo) o naturales, como el efecto del golpe de la gota de lluvia sobre los agregados de suelo cuando estos están desnudos. Evidencias de esto se presentan en estudios con aplicaciones de residuos orgánicos (Hartge, 1975; Zhang *et al.*, 1997).

Respecto al análisis estadístico del segundo horizonte, se pudo observar que *PEU* mantuvo diferencias significativas con *ESP*, sin embargo *PEU* y *ESP* no fueron totalmente distintos a las situaciones *PLQ* y *QTC* (Figura 8ii).

El tercer horizonte, para el caso de *PEU*, *PLQ* y *QTC* se presentaron valores aún más significativos de ρ_b (Figura 8iii), como consecuencia de la escasa *MO* que se encuentra a estas profundidades (Anexo I). A medida que se avanza en profundidad, los valores de densidad aparente para todas las situaciones vegetacionales tiende a semejarse, a tal punto que no existieron diferencias significativas entre sitios (*PEU*, *PLQ* y *QTC*), siendo el impacto producido por las distintas perturbaciones, pecuarias principalmente, evidenciadas solo en superficie (Ellies *et al.* 1993).

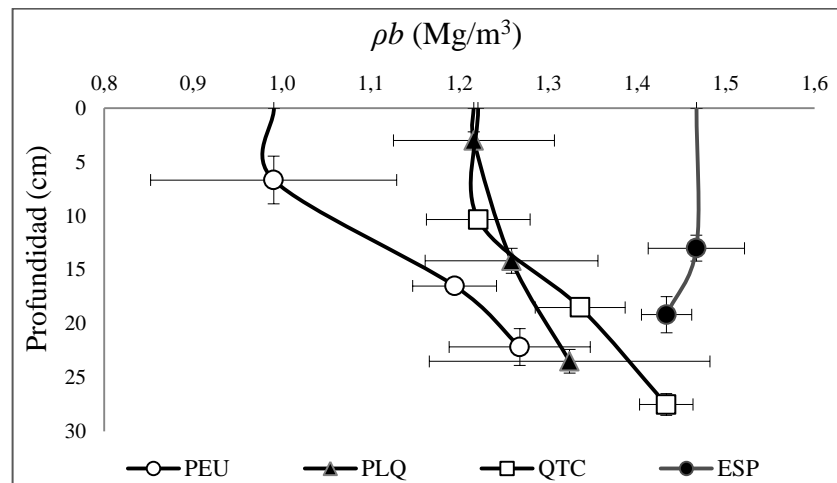


Figura 9. Densidad aparente (Mg/m^3) en profundidad para cada situación vegetacional. Las barras de error horizontales representan \pm un error estándar ($n = 3$) de la densidad aparente. Las barras de error verticales representan \pm un error estándar ($n = 3$) de la profundidad de muestreo.

En la Figura 9 se aprecia la variabilidad de la ρb en el perfil en cada una de las situaciones vegetacionales. *PEU*, *PLQ* y *QTC*, tuvieron una ρb que aumenta en profundidad, lo que se condice con menores contenidos de *MO* y mayor peso sobreyacente. Por su parte la sobreconsolidación superficial explicó la tendencia inversa en *ESP*.

Estudios realizados por Soracco (2003), han comparado la ρb en superficie en distintas situaciones con diferentes tipos de manejo. El primer caso fue un sitio poco intervenido con resultados similares a los de *PEU*, destinado al cultivo de hortalizas recientemente removidas, la cual presentó una ρb de $0,77 \text{ Mg/m}^3$. El segundo sitio correspondió a una pradera compuesta por gramíneas con 8 años de antigüedad, medianamente intervenida como lo es el caso de *PLQ* y *QTC*, la que se encontraba con muy buena cobertura y activo crecimiento, siendo la ρb para este caso de $1,15 \text{ Mg/m}^3$. El tercer sitio fue la situación mayormente degradada, siendo una pradera compactada, que había sufrido el pisoteo continuo de animales con una intensidad importante al igual que *ESP*, dando como resultado una ρb de $1,43 \text{ Mg/m}^3$.

Curva característica

En la Figura 10 se presenta la curva característica para cada horizonte correspondiente a las distintas situaciones vegetacionales.

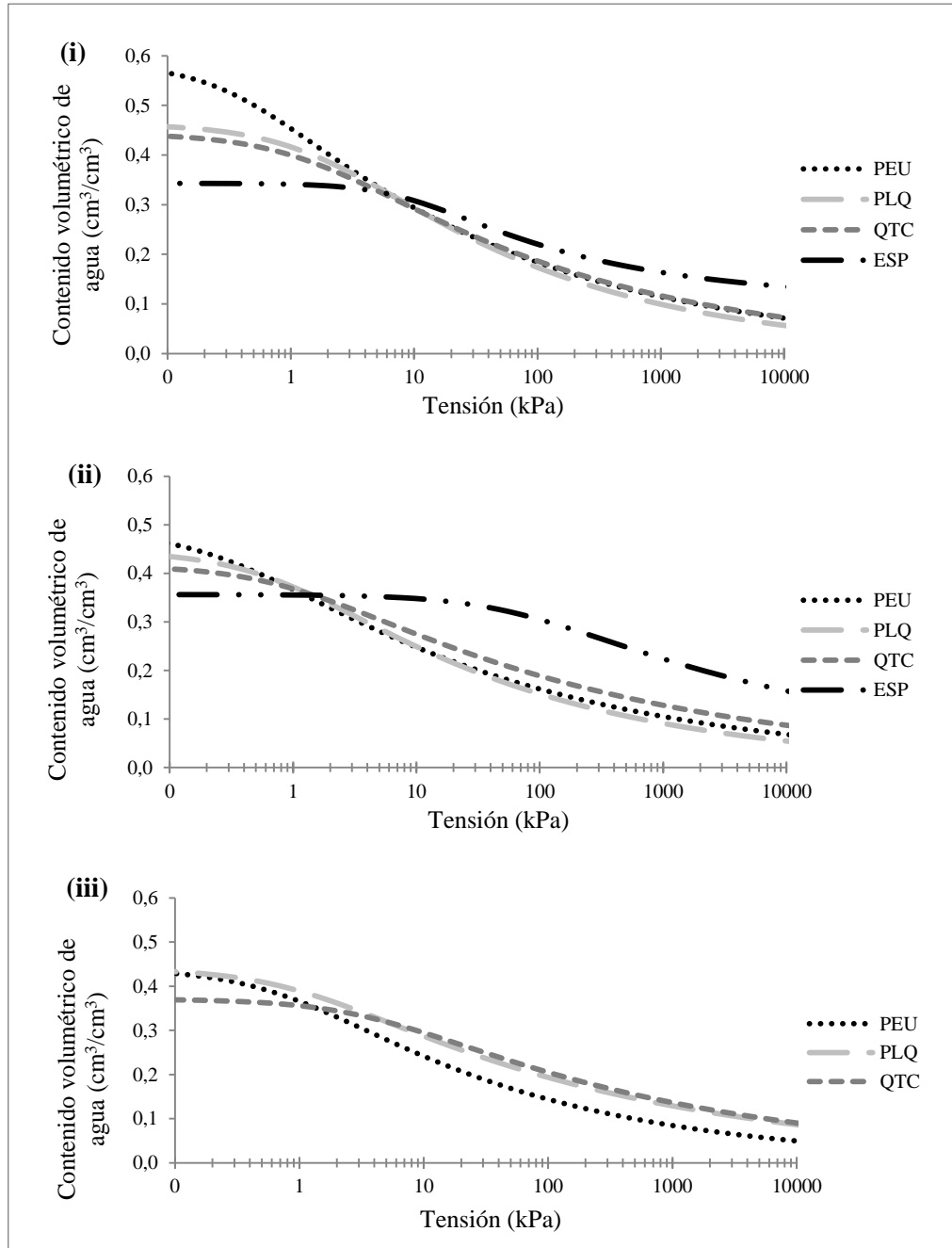


Figura 10. Curva característica de cada horizonte: (i) 1° horizonte; (ii) 2° horizonte; (iii) 3° horizonte, obtenida a partir del ajuste de los valores experimentales al modelo Mualem – Van Genuchten.

La curva característica permite relacionar la capacidad que tiene el suelo de retener agua a medida que se aplican distintas tensiones, dicho esto, se puede apuntar que la porosidad y retención de agua son dos parámetros estrechamente vinculados, ya que la retención de agua en el suelo es dependiente de la cantidad total de poros, la distribución de tamaño de éstos y de la superficie específica de las partículas (Hillel, 1998; Krull et al., 2004).

En la Figura 10i se aprecia que a saturación, al tener el mayor espacio poroso, *PEU* adquiere una gran capacidad de almacenar agua (alrededor de un 58%), lo cual refleja claramente el rol de la *MO* favoreciendo la macroporosidad y estructuración del sistema edáfico (Seguel *et al.*, 2003). Sin embargo, producto de esta porosidad gruesa y a la gran cantidad de arena presente (apéndice V), al aumentar la tensión a 10 kPa, el sistema disminuye la cantidad de agua retenida de un 58% a menos de un 30%. Pikul y Allmaras (1986) estudiaron la distribución del espacio poroso con diferentes manejos de suelo y encontraron que un aporte de residuos de cosecha aumentaba los poros de mayor diámetro, lo cuales retienen el agua con menor energía, influyendo directamente sobre el sistema hídrico del suelo.

Para el caso del primer horizonte (Figura 10i), a 10 kPa se genera un punto de inflexión, a partir de lo cual la curva de *PEU* comienza a disminuir a tasas decrecientes, lo que se debió a que los *Poros de Drenaje Rápido (PDR)* pierden influencia sobre el sistema hídrico, ya que el agua fácilmente drenada ya ha salido del sistema, quedando el agua fácilmente disponible ligada a la *MO* (Hofstede, 1997), la cual es retenida específicamente a tensiones entre capacidad de campo (-33 kPa) y punto de marchitez permanente (-1500 kPa), que es en donde las plantas alcanzan el máximo provecho del sistema hídrico.

Las situaciones vegetacionales *PLQ* y *QTC* se comportaron similares a lo largo de toda la curva característica (Figura 10i), en donde a saturación alcanzan a almacenar alrededor de un 45% de agua, manifestando una menor porosidad total respecto a *PEU*, producto de un menor aporte orgánico (Anexo I) y una mayor densidad aparente (Figura 9).

En superficie, la situación de *ESP* es la que tuvo mayores contenidos de arcillas (apéndice V), las cuales retienen más agua que los otros tipos texturales por la mayor superficie específica que presentan (Porta *et al.*, 1994). Esto explica la menor variación en *ESP* al aumentar la tensión respecto de las demás situaciones vegetacionales (Figura 10i).

En el segundo horizonte, las situaciones de *PEU*, *PLQ* y *QTC* muestran un comportamiento similar a medida que aumenta la tensión (Figura 10ii), esto se debió a que en *PEU* disminuye el contenido de *MO* en profundidad a niveles más cercanos a los de *PLQ* y *QTC* (Anexo I), por ende disminuye la macroporosidad y el grado estructural (Follett y Sewart, 1985), lo que implicó que las propiedades físicas de *PEU* fuesen cada vez más similares a las de los otras dos formaciones vegetacionales.

En *ESP*, el segundo horizonte (Figura 10ii) tuvo una tendencia a retener el agua más fuertemente que el primero (Figura 10i), debido a la cantidad de arcillas iluviadas en profundidad (60,07%), originando un horizonte Bt con gran cantidad de porosidad fina, lo que se aprecia con claridad hasta por lo menos los 100 kPa, a partir de lo cual, la curva

comienza a disminuir, pero siempre con una capacidad de retención de agua mayor que las demás situaciones vegetacionales. A tensiones de 1500 kPa la capacidad de retención de agua en *ESP* llegó alrededor del 20%, no así las demás situaciones, que no superó el 10%.

La figura 10iii (tercer horizonte) muestra una capacidad de retención de agua levemente menor para *PEU* a partir de los -2 kPa, ya que ésta presentó una mayor cantidad de arena (Apéndice V) con escasa capacidad de retener agua respecto de *PLQ* y *QTC*.

Retención de agua (cm^3/cm^3)

Los aspectos funcionales del sistema poroso están estrechamente relacionados con las propiedades hidráulicas del suelo, los cuales tienen que ver con la transmisión de fluidos (Dorner y Horn, 2006), por cuanto estimar la capacidad de retención del agua en el suelo cobra mayor importancia, en especial a niveles de -33 kPa y -1500 kPa, que corresponde al rango de tensión en que las plantas pueden disponer del agua aprovechable. La Figura 11 muestra los resultados agrupados para cada uno de los horizontes genéticos analizados.

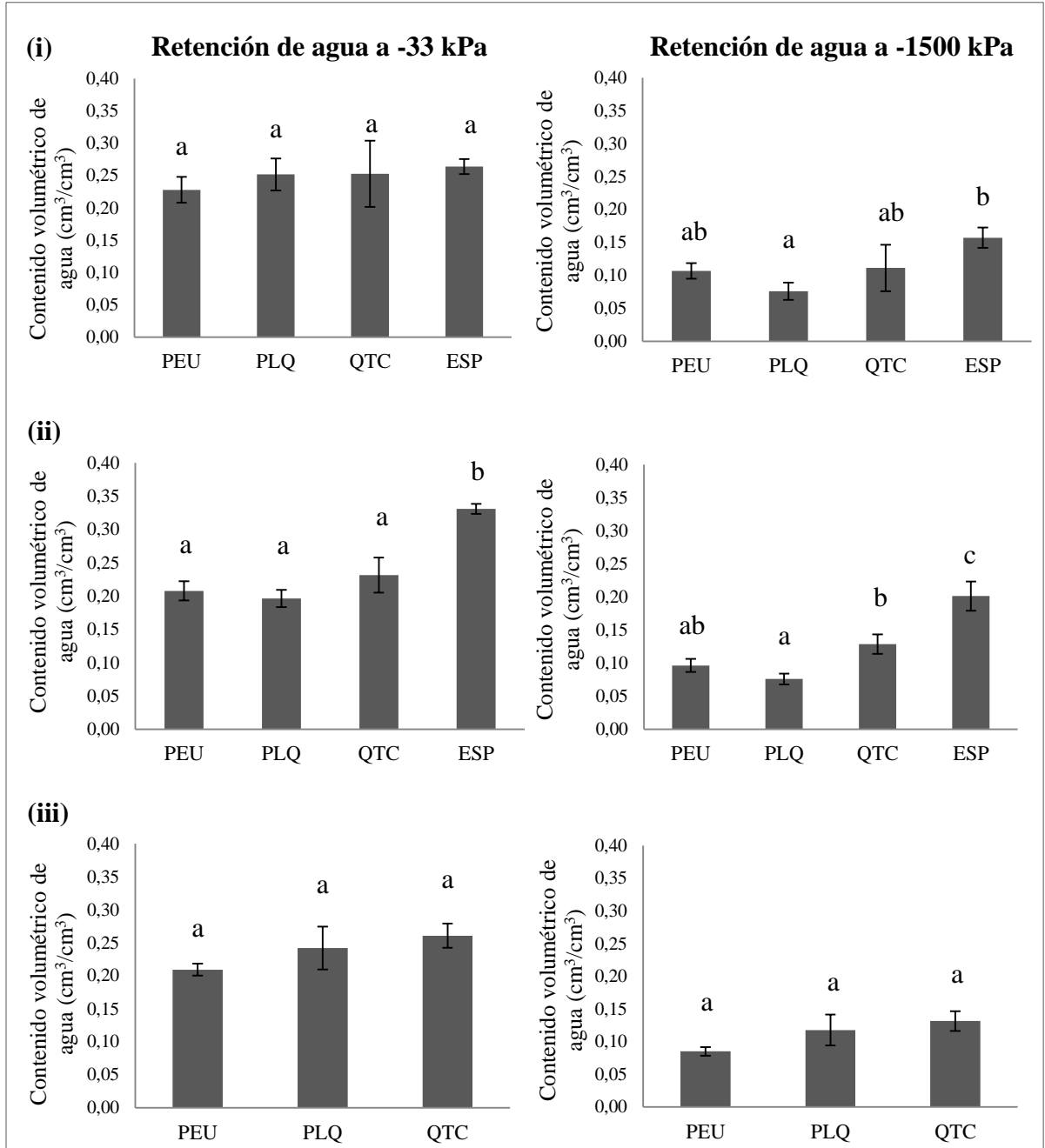


Figura 11. Valores de retención de agua volumétricos (cm^3/cm^3) para las distintas situaciones vegetacionales. Gráficos de la izquierda representan contenidos de agua en equilibrio a -33 kPa y los de la derecha contenidos de retención de agua a -1500 kPa. Los números i (1° horizonte), ii (2° horizonte) y iii (3° horizonte), indican horizontes según profundidad de muestra. Las diferencias significativas se indican con letras según comparación múltiple de promedios LSD de Fisher a un nivel de significancia del 5%. Las barras de error representan \pm un error estándar ($n = 3$).

La retención de agua a -33 kPa en el primer horizonte fue similar para todos los casos, no existiendo diferencias significativas, sin embargo se distingue una menor retención de agua en *PEU* respecto de *PLQ*, *QTC* y *ESP* (Figura 11i), siendo esto generado principalmente por la diferencia entre los poros gruesos, medios y finos existentes en cada situación. De acuerdo a la Figura 10i, a tensiones bajas (menores a -10 kPa) las curvas de todas las situaciones vegetacionales comienzan a acercarse y entrecruzarse, siendo el contenido volumétrico de agua a esas tensiones similar en todos los casos, incluso a -33 kPa.

A tensiones de -1500 kPa en el primer horizonte, se encontraron diferencias significativas entre las situaciones estudiadas, siendo el *PLQ* diferente estadísticamente a *ESP*, pero estas no presentan diferencias significativas con *PEU* y *QTC* (Figura 11i). Por su parte, *ESP* es el que tuvo la mayor capacidad de retener agua (sobre un 15%), donde a ésta tensión (-1500 kPa), la textura cobra importancia por sobre la estructura del suelo, siendo el contenido de arcilla la causante de la alta retención de agua, no sucedió lo mismo con las demás situaciones, en que predominan principalmente partículas de tamaño arena (Apéndice V).

A -33 kPa, en *PEU*, *PLQ* y *QTC* la retención de agua del segundo horizonte disminuyó levemente en relación al primero (Figura 11ii), excepto en *ESP*, en donde la retención de agua a -33 kPa aumentó de un 26% a un 33%, producto de las arcillas iluviadas y al hecho de que este segundo horizonte se encontró menos expuesto que el primero a las distintas perturbaciones compactantes.

De acuerdo al análisis estadístico para el segundo horizonte, la retención de agua a -33 kPa no presentó diferencias significativas en *PEU*, *PLQ*, y *QTC*, sin embargo éstas si fueron estadísticamente distintas a *ESP* (Figura 11ii), lo cual esta dado principalmente por las diferencias de texturas (Apéndice V), favoreciéndose la retención de agua en suelos más arcillosos (*ESP*) por sobre suelos con mayor contenido de arena (*PEU*, *PLQ* y *QTC*).

El análisis estadístico de retención de agua a -1500 kPa del segundo horizonte muestra que hubo diferencias significativas entre *PLQ*, *QTC* y *ESP*. No así *PEU*, que es estadísticamente similar a *PLQ* y *QTC* (Figura 11ii). Estas diferencias entre situaciones son atribuidas a los tamaños de partículas predominantes (Apéndice V).

La retención de agua a tensiones de -33 kPa y -1500 kPa en el tercer horizonte, muestra que no existieron diferencias significativas entre *PEU*, *PLQ* y *QTC* (Figura 11iii), predominando en estas tres situaciones partículas gruesas tamaño arena (Apéndice V).

Distribución de tamaño de poros

A partir de la curva característica, es posible derivar la distribución del tamaño de poros asociado a distintos niveles de tensión (Martínez *et al.*, 2008), resultados que se presentan en la Figura 12.

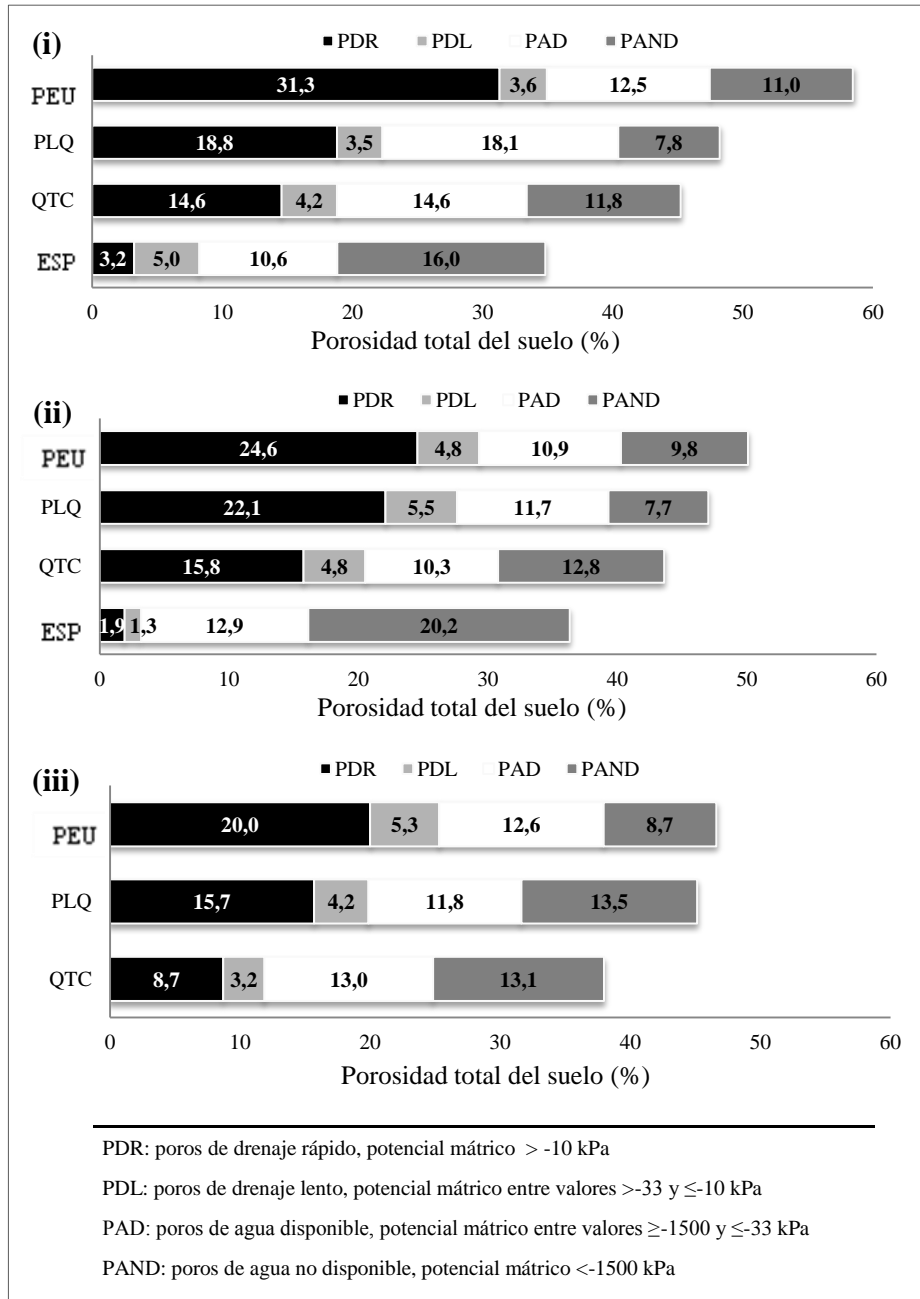


Figura 12. Distribución de tamaño de poros para cada horizonte de las distintas situaciones vegetacionales: (i) 1° horizonte; (ii) 2° horizonte; (iii) 3° horizonte.

Los medios porosos como el suelo, no son tan solo evaluados por su volumen total o por la capacidad de transmitir fluidos como el agua o el aire, sino que también por la distribución que estos tienen (Dörner y Horn, 2006). Para este estudio en particular la distribución de tamaño de poros se vio alterada fuertemente por acciones que generaron compactación del suelo. Se puede apreciar claramente que el nivel de impacto generado afectó la capacidad intrínseca que tiene un suelo para generar poros, lo que se evidencia de forma muy notoria en el caso de la pradera con espinos, con una porosidad total en general muy baja (Figura 12).

Tomando en cuenta cada situación vegetacional, el nivel de alteración antrópica causó una merma en el sistema de poros, lo que eventualmente pudo afectar la permeabilidad del suelo al paso del agua y el aire. La funcionalidad de esta porosidad depende exclusivamente de las características del material que los conforma, por ende se puede hacer la relación directa de que a mayor contenido de materia orgánica mayor será el flujo hídrico por la gran cantidad de *PDR*, y por el contrario, a mayor cantidad de arcillas, el agua se moverá de manera mucho más lenta, debido a un alto porcentaje de *PAND*, los que actúan reteniendo el agua más que favoreciendo el movimiento de ésta en el suelo. En síntesis, el paso del agua a través del perfil es una exclusiva propiedad del medio poroso y su geometría (Hillel, 1998), los cuales gobiernan la capacidad de transmitir fluidos en el suelo, estando supeditado directamente a la distribución que estos tengan en el sistema edáfico (Bear, 1972).

Los resultados del primer horizonte indican que *PEU* tuvo la mayor porosidad total (Figura 12i), con cerca de un 58%, seguido de *PLQ* con un 48%, *QTC* con 45% y finalmente la situación que fue mayormente intervenida, *ESP* con solo un 34%.

Un mayor aporte orgánico influye en una mayor agregación entre las partículas, favoreciéndose principalmente las macroporosidades, lo cual se observó en los altos porcentajes en superficie de *PDR* en *PEU*, con un 31,3%. Por el contrario *ESP* con tan solo un 3,2% de *PDR* (Figura 12i) fue reflejo de la baja cantidad de *MO* (Anexo I) y una pobre estructuración, donde predominan principalmente los *PAND* (16%).

Analizando los *PDL* de este primer horizonte (Figura 12i), es razonable pensar que el mayor porcentaje lo tendrá *ESP*, aunque la diferencia con las otras situaciones fue mínima. La porosidad clasificada como *PAD*, tendió a ser mayor en *PLQ* con un 18,1%, seguido de *QTC* con un 14,6%, *PEU* con 12,5% y *ESP* con un 10,6%. Con esto se infirió para este primer horizonte, y tomando en cuenta que los *PAD* se relacionan directamente al agua aprovechable por las plantas, que la vegetación de la situación *PLQ* debió verse favorecida en cuanto a al equilibrio agua/aire en comparación con las otras situaciones vegetacionales.

En el segundo horizonte, los *PDR* de la situación de *PEU* tendieron a disminuir en comparación al primer horizonte (Figura 12i vs. 12ii), siendo esto reflejo de una merma en el contenido orgánico en profundidad, lo cual derivó en una menor cantidad de poros gruesos. Sin embargo los poros predominantes siguieron siendo los *PDR* en *PEU*, con un 24,6% (Figura 12ii), lo que indica una continuidad porosa con el primer horizonte, asegurando un buen movimiento hídrico en el perfil. Lo mismo sucedió con los *PDR* de

PLQ y *QTC* que alcanzaron un 22,1% y un 15,8%. Esta dominancia de *PDR* desaparece en *ESP*, con solo un 1,9%.

A partir de los datos obtenidos, se puede mencionar que la pradera con Espino correspondió a la situación vegetacional con mayores problemas de movimiento hidráulico en el perfil, ya que en desmedro de los *PDR* la cantidad de *PAND* es alta, sobre un 20% (Figura 12ii), lo que implicó un flujo hídrico lento. Tomando en cuenta la alta capacidad de retención de agua de este suelo y la cantidad de agua lluvia que pudiese entrar al sistema, la pérdida de suelo en esa zona se torna un problema preocupante, donde fue evidente el desplazamiento que ha existido a través del tiempo de los horizontes superficiales hacia las zonas más bajas del valle.

Los tres sitios menos intervenidos (*P*, *PLQ* y *QTC*) presentaron en el segundo horizonte un incremento de los *PDL* y una disminución de los *PAD* en relación a la condición en superficie (Figura 12ii vs. 12i), lo que estaría sustentado en una matriz de clase textural gruesa con menos cantidad de *MO* relleno de la porosidad entre las partículas. Lo contrario ocurrió en *ESP*, con dominancia de partículas finas.

Para el caso del tercer horizonte, *PEU* fue la situación que disminuyó en mayor cantidad su porosidad total, de un 58% de poros en el primer horizonte (Figura 12i) pasó a menos del 50% en el tercer horizonte (Figura 12iii), lo que está dado por una disminución de la porosidad gruesa. Sin embargo su espacio poroso total siguió siendo mayor que *PLQ* y *QTC*.

En el tercer horizonte, la cantidad de poros *PDR* en *PEU* continuó alta con un 20%, en menor cantidad le siguió *PLQ* con un 15,7% y por último *QTC* con tan solo un 8,7% (Figura 12iii), sin embargo estos valores disminuyeron en comparación con el primer y segundo horizonte (Figuras 12i; 12ii).

En profundidad los poros *PDL* y *PAD* se mantuvieron con valores similares en todas las situaciones descritas (*PEU*, *PLQ* y *QTC*), en cambio los poros *PAND* presentaron pequeñas diferencias (Figura 12iii), atribuibles a la distribución de tamaño de partículas.

Conductividad hidráulica efectiva (K_{ef})

A continuación la Figura 13 presenta la K_{ef} estimada a distintos potenciales mátricos.

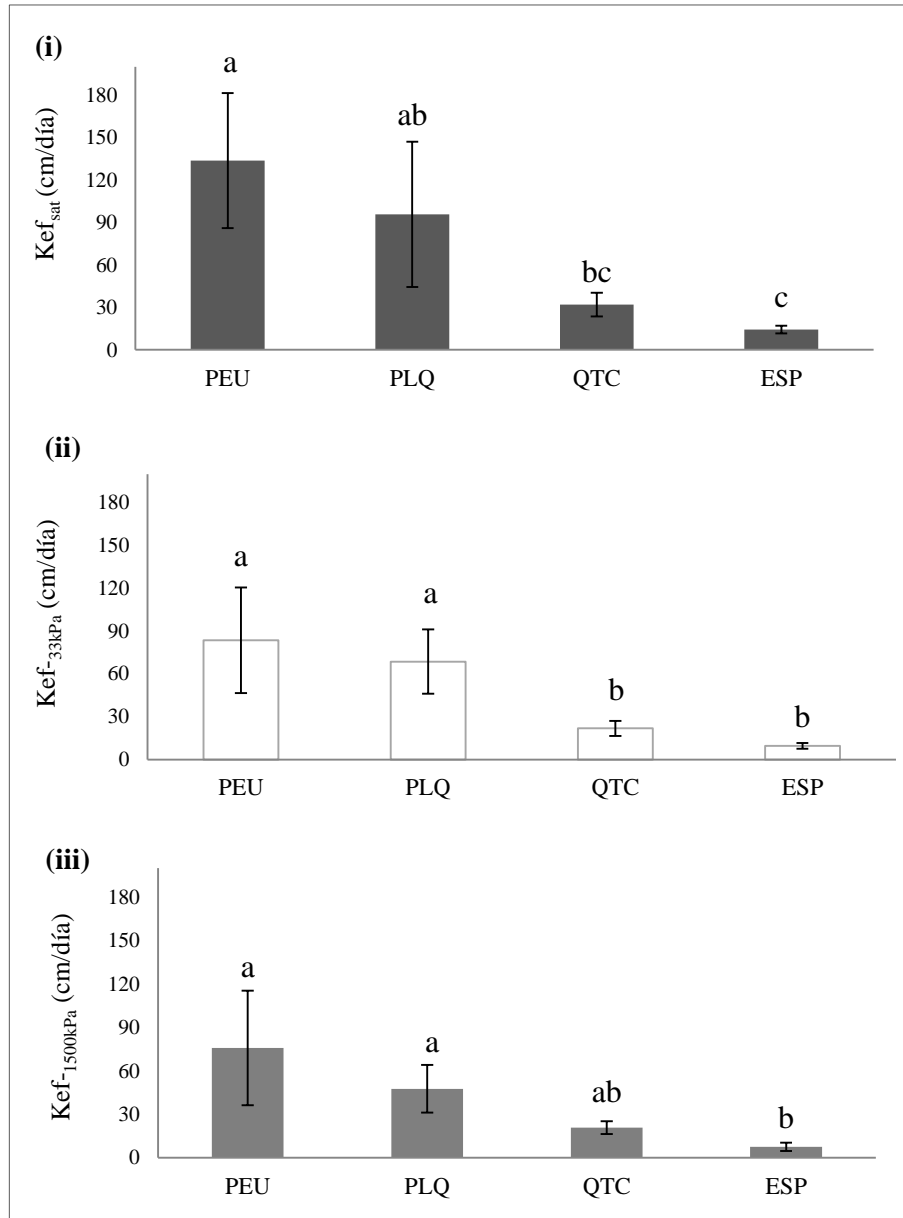


Figura 13. Conductividad Hidráulica Efectiva (K_{ef}) a Saturación, -33 kPa y -1500 kPa de tensión. Las diferencias significativas se indican con letras según comparación múltiple de promedios LSD de Fisher a un nivel de significancia del 5%. Las barras de error representan \pm un error estándar (n = 3).

La Conductividad Hidráulica Efectiva a saturación ($K_{ef_{sat}}$), y a tensiones de -33 kPa ($K_{ef_{33kPa}}$) y -1500 kPa ($K_{ef_{1500kPa}}$) fue siempre mayor para el caso del *PEU*, seguido del *PLQ*, *QTC* y finalmente *ESP*. Esta propiedad física está íntimamente ligada al espacio poroso que existe en el suelo, es decir, a la cantidad de poros capaces de drenar el agua. Respecto a esto último y como se ha mencionado a lo largo de este estudio, la *MO* juega un rol fundamental en la estructuración y porosidad que tenga el sistema edáfico, especialmente a través de los macroporos conductores de agua (Seguel *et al.*, 2003), por tanto actúa como mejorador de las propiedades hidráulicas del suelo. Además, la *MO* tiene un rol esencial en el suelo en cuanto al aporte de nutrientes esenciales, capacidad buffer, flujo de gases, capacidad de intercambio catiónico, estabilidad estructural frenando procesos de degradación, y contribuyendo al mantenimiento de la actividad biológica entre otras (Uren, 1991).

A saturación *ESP* tuvo los valores más bajos de $K_{ef_{sat}}$ (Figura 13i), lo que se relaciona de manera directa al tipo de poros que predominan, en este caso los *PAND*. Por el contrario, *PEU* obtuvo los valores más altos de $K_{ef_{sat}}$, siendo factor importante la alta cantidad de *PDR* (Figura 12). Las situaciones *PLQ* y *QTC* tuvieron un alto porcentaje de poros *PDR*, pero en menor cantidad que *PEU*, por ende su $K_{ef_{sat}}$ fue inferior. El flujo hídrico para estas situaciones (*PLQ* y *QTC*), sobre todo en profundidad, se debió netamente a los poros gruesos que le otorgan la arena presente.

Los *PAND* son preponderantes en *ESP*, los cuales influyeron en una $K_{ef_{sat}}$ lenta (Figura 13i), estos retuvieron el agua de manera tal, que se generó un movimiento hídrico lateral. La compactación del suelo que se realizó en *ESP* y la mayor proporción de partículas finas provocó una merma en la porosidad capaz de movilizar el agua, lo que posiblemente favoreció los procesos erosivos, causando una pérdida de material mineral y orgánico capaz de estructurar el suelo (Lal y Stewart, 1990).

Los resultados de $K_{ef_{-33kPa}}$ (Figura 13ii) indican que las situaciones de *PEU* y *PLQ* fueron similares estadísticamente, al igual que las situaciones de *QTC* y *ESP*. Sin embargo *PEU* y *PLQ* presentaron diferencias significativas con *QTC* y *ESP*. Al comparar los resultados de $K_{ef_{sat}}$ y $K_{ef_{-33kPa}}$ entre las distintas situaciones, se observó que a medida que aumenta la tensión en la conductividad hidráulica (-33kPa), existen situaciones que comienzan a semejarse, presentando una menor variabilidad.

Respecto de la $K_{ef_{-1500kPa}}$ (Figura 13iii), las diferencias entre situaciones tuvieron una tendencia a disminuir, adquiriendo gran importancia la textura de los suelos, más que la influencia que pudiese generar el grado estructural y el contenido de *MO*. De acuerdo al análisis estadístico de la $K_{ef_{-1500kPa}}$, *PEU* y *PLQ* fueron diferentes estadísticamente a *ESP*, sin embargo *PEU*, *PLQ* y *QTC* no presentaron diferencias significativas entre ellas, tampoco existieron diferencias entre *QTC* y *ESP*.

Movimiento hidráulico en el perfil (K_s)

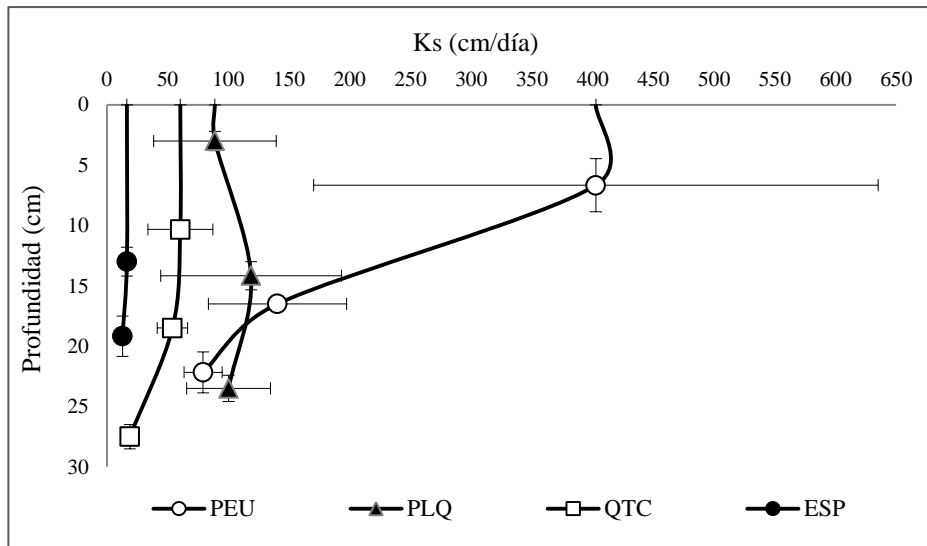


Figura 14. Conductividad hidráulica saturada (K_s) en el perfil en cada una de las situaciones vegetacionales. Las barras de error horizontales representan \pm un error estándar ($n = 3$) de la K_s . Las barras de error verticales, representan \pm un error estándar ($n = 3$) de la profundidad de muestreo.

La conductividad hidráulica saturada (K_s) tuvo una tendencia a disminuir en profundidad en la situación de *PEU* y *QTC*, sin embargo esto fue reflejado más claramente en la situación de *PEU* (Figura 14). En superficie (*PEU*) se encontró la mayor cantidad de macroporos conductores de agua (Figura 12i), donde el flujo hídrico se hace más rápido, no así en profundidad, donde la K_s disminuye de manera considerable, lo cual se debe netamente a una pérdida de poros gruesos por efecto de una disminución de la *MO*, sin dejar de mencionar el aumento de la densidad aparente y la alta pedregosidad existente. En *PLQ* la variación fue mínima, existiendo una pequeña alza en la K_s alrededor de los 15 cm por un aumento en los poros *PDR* (Figura 12i; 12ii).

En el caso de *ESP*, la K_s se mantuvo casi sin variación en todo el perfil, siendo esta baja producto de la alta cantidad de poros *PAND* (Figura 12). Esta situación fue la mayormente intervenida, con lo cual los horizontes superficiales iniciales se han perdieron, erosionándose y desplazándose a las zonas más bajas y con ello la *MO* que pudo haber existido, influenciando una merma en la estructuración y la porosidad del suelo (Dexter *et al.*, 2004).

Correlaciones

La K_s y la ρ_b son propiedades físicas altamente influenciadas por agentes antrópicos, siendo variables dependientes una de la otra, y que se encuentran representadas en la Figura 15.

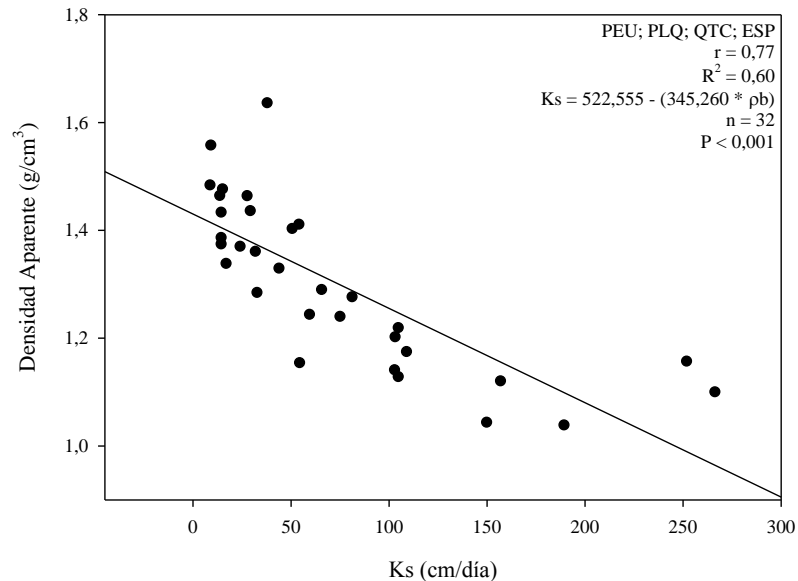


Figura 15. Correlación entre la K_s y la ρ_b de todas las formaciones vegetacionales.

A medida que la ρ_b disminuye, la K_s aumenta progresivamente, tal cual lo muestra la Figura 15, este comportamiento ocurrió en todas las situaciones vegetacionales, y se debe a que el espacio poroso de cada suelo se incrementó a densidades más bajas, con lo cual el agua pudo movilizarse más fácilmente, creando un flujo continuo, aumentando la conductividad hidráulica del suelo.

Al compactarse el suelo, la ρ_b aumenta debido a que se destruyen los poros gruesos del suelo y su conectividad (Fuentes *et al.*, 2004), siendo el caso de *ESP* el mayormente afectado, lo que se reflejó en una baja K_s . Por el contrario *PEU*, al ser la situación menos degradada, presentó una densidad aparente baja (Figura 9), lo cual se asocia a altos porcentajes de *PDR* capaces de transmitir agua (Figura 12).

CONCLUSIONES

La degradación a la cual fue sometido el suelo producto de las distintas intervenciones antrópicas, se vio reflejado en las propiedades físicas de las distintas formaciones vegetacionales, siendo el bosque de Peumo el que presentó las condiciones edáficas más favorables, y por el contrario la pradera con Espino la situación que presentó el mayor grado de alteración.

Las situaciones *PLQ* y *QTC* correspondieron a formaciones vegetacionales con grado de alteración antrópica intermedia, por ende sus propiedades físicas se vieron afectadas de la misma manera, manteniendo siempre valores entre los de *PEU* y *ESP*.

La capacidad que tiene el suelo de formar poros y estructura, está dado principalmente por la cantidad de *MO* que poseen, para lo cual *PEU* presenta las mejores condiciones, en contraste con la escasa *MO* que existe en la situación de *ESP*.

Respecto a la retención de agua, a altas tensiones (-1500 kPa y más) *ESP* es la situación que presentó los mayores porcentajes, ya que la alta cantidad de arcilla presente, generó una alta porosidad de agua no aprovechable capaz de retener el agua fuertemente, lo que afectó la capacidad de este suelo para poder movilizar el agua fácilmente.

La conductividad hidráulica se vio favorecida en suelos con altos contenidos de *MO*, generándose macroporos conductores de agua, aumentando el flujo hídrico en el perfil. Reflejo de esto fue el caso de *PEU*, con alta cantidad de *PDR* en superficie.

Los distintos cambios perturbadores que sufrió el suelo causaron una degradación en las propiedades físicas de éste, lo que determinó las condiciones edáficas para el desarrollo de las distintas especies vegetales existentes; de acuerdo a esto se pudieron identificar cuatro situaciones vegetacionales, cada una de ellas con diferente grado de alteración antrópica.

BIBLIOGRAFÍA

- Bear, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, New York. 764 p.
- Blake, G. and K. Hartge. 1986a. Bulk density. pp: 363-376. In: Klute, A. (Ed). Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph N° 9. Second Edition.
- Blake, G. and K. Hartge. 1986b. Particle density. pp: 377-382. In: Klute, A. (Ed). Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph N° 9, 2nd Edition. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America. Madison, WI 53711, USA.
- Bocic, P. 1972. Variación físico química de un suelo forestal en relación al tipo de cubierta vegetal. Memoria de título Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía. Universidad de Concepción. Chillán. Chile. 113 p.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agron. J. 54:464-465.
- Bruce, R., G. Langdale, L. West and W. Miller. 1992. Soil surface modification by biomass inputs affecting rainfall infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J. 56:1614-1620.
- Carter, M. R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. Agron. J. 94: 38-47.
- CONAF. 2008. Ficha Reserva Nacional Roblería del Cobre de Loncha. [en línea] <http://www.conaf.cl/parques/ficha-reserva_nacional_robleria_del_cobre_de_loncha_64.html> [consulta 25 de septiembre de 2010].
- Dewis, J. y F. Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín sobre suelos N° 10. FAO, Roma, Italia. 252 p.
- Dexter, A. R., E. A. Czyz and O. P. Gate. 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. Soil Tillage Research 79: 185-189.
- Donoso C. 1992. Ecología Forestal: el bosque y su medioambiente. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 368 p.
- Dörner, J. and R. Horn. 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselien moraine region in N Germany. J. Plant. Nutr. Soil Sci. 169: 213-220.
- Ellies, A., R. Grez y C. Ramirez. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada

como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur (Chile)* 25 (1): 51-56.

- Ellies, A., C. Ramirez, R. Macdonald y H. Figueroa. 1994a. Modificaciones estructurales por efecto de tiempo de uso en un Hapludand. *Agro Sur* 22(1): 15-22.
- Ellies, A., C. Ramirez y H. Figueroa. 1994b. Cambios morfológicos estacionales del espacio poroso en Hapludand. *Agro Sur* 22(1): 23-32.
- Ellies, A., C. Ramirez y R. Macdonald. 1993. Cambios en la porosidad de un suelo por efecto de su uso. *Turrialba* 43 (1): 72-76.
- EULA. 2004. Establecimiento de un ordenamiento territorial orientado a la protección y uso sustentable del área del cordón de Cantillana. Informe Final. Centro EULA, Universidad de Concepción. 213 p.
- Follett, R. F. and B. A. Stewart. 1985. *Soil Erosion and Crop Productivity*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. 533 p.
- Forsythe, W. 1975. *Física de Suelos: manual de laboratorio*. New York: University Press, 1975. 324p.
- Francke, S., R. Vargas, E. Williams, M. Pinto y B. Barría. 1999. Recuperación de suelos degradados en el Marco de la nueva Ley de Fomento Forestal. CONAF, Santiago de Chile. 11 p.
- Fuentes, J. P., M. Flury and D. Bezdicek. 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till and no till. *Soil Science Society of America Journal* 68:1679-1688.
- Hartge, K. 1975. Organic matter contribution to stability of soil structure. pp: 103-110. In: *Soil conditioners*. SSSA Spec. Publ. 7. Madison WI.
- Hartge, K. and A. Ellies. 1990. Change in soil structure as caused by land use after clearing virgin forest. *Z. F. Bodenkunde und Pflanzenernährung* 153:389-393.
- Hartge, K. and R. Horn. 1992. *Die Physikalische Untersuchung von Böden*. Ferdinand Enke Verlag, 3. Auflage, Stuttgart. 177 p.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego, USA. 772 p.
- Hofstede, R. 1997. Importancia hídrica del Páramo y aspectos de su manejo. 1^{er} Páramo Electrónico Forum, CONDESAN.
- Honorato, R. 2000. *Manual de Edafología*. Cuarta edición. Universidad Católica de Chile. Editorial Universitaria. 267 p.

- Horn, R. and A. J. M. Smucker. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil Tillage Res.* 82: 5-14.
- Hudson, B. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil Water Conserv.* 49:189-194.
- Kay, B. D. 1999. Soil structure. pp: 229-276. In: Sumner, M. F. (Ed). *Handbook of Soil Science*. CRC Press Inc., Boca Raton. FL. USA.
- Kehr, E. 1983. Efecto de diferentes enmiendas sobre la evolución de las propiedades físico-hídricas de un suelo arcilloso. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Austral, Facultad de Ciencias Agrarias, Valdivia, Chile. 67 p.
- Krull, E. S., O. J. Skjemstad and J. A. Baldock. 2004. Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Grains Research y Development Corporation Report Proyect No CSO 00029.
- Lal, R. and B. A. Stewart. 1990. Soil degradation: a global threat. *Adv. Soil Sci.* 11: xiii-xvii.
- Martinez, E., J. P. Fuentes, P. Silva, S. Valle and E. Acevedo. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research* 99: 232-244.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12: 513-522.
- Pikul J. L. Jr. and R. R. Allmaras. 1986. Physical and chemical properties of a Haploxeroll after fifty years of residue management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 214-219.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. Madrid. 792 p.
- PUC y CODELCO. 2002. Plan de ordenación territorial hacienda ecológica Los Cobres de Loncha. Pontificia Universidad Católica de Chile, Programa de Ecología y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Corporación Nacional del Cobre de Chile, Gerencia Corporativa de Desarrollo Sustentable y División El Teniente. 205 p.
- Schaap, M. G. and F. J. Leij. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-Van Genuchten model. *Soil Science Society of America Journal* 64:843–851.

- 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. Valdivia, Chile. 100 p.
- Seguel, O., V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica (Chile)* 36 (3): 287-297.
- Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook 18. 437 p.
- Soil Survey Division Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. 11thedn. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. 338 p.
- Soracco, G. 2003. Relación entre la conductividad hidráulica saturada y la densidad aparente en tres situaciones de manejo contrastantes. pp: 35-38. In: *Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo*. UNESCO. Documentos Técnicos en Hidrología del PHI, N° 71.
- Stakman, W. P 1980. Measuring soil moisture. *Drainage Principles and Applications* 3: 221-251.
- Torres, D., A. Florentino y M. López. 2006. Indicadores e índices de calidad de suelo en un Ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Guárico, Venezuela. *Revista: Bioagro* 18 (2): 83-91.
- U. de Chile. 2007. Profundización de la línea de base ambiental y ecológica del sector de mayor valor ecológico del cordón de Cantillana. Elaborado para CONAMA-GEF-PNUD. Proyecto “Conservación de la Biodiversidad en los Altos de Cantillana, Chile”. 257 p.
- Uren, N. 1991. The management of soil organic matter for sustainable agriculture. *Agricultural Science* 4(6): 45-48.
- Van Genuchten, M. T., 1980. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44:892-898.
- Van Genuchten, M. T., F. J. Leij and S. R. Yates. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. EPA/600/2-91/065. U.S. Environmental Protection Agency. Ada. OK. USA. 85 p.
- Zhang, H., K. H. Hartge and H. Ringe. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 239-245.

ANEXOS

Anexo I. Porcentaje de materia orgánica y fertilidad (N, P y K) correspondiente a cada situación vegetacional en distintos niveles de profundidad.

<i>PEU</i> N° de repetición	Profundidad (cm)	MO (%)	N	P	K
			(mg/Kg)		
R1	0-12	13,00	5,02	12,94	43,58
	12-20	4,40	3,94	4,82	26,76
	20-35	4,25	4,32	3,00	23,59
	35-49	2,64	5,74	3,00	47,03
	49-65	1,57	4,28	2,34	13,35
	65-80	1,94	3,59	3,01	16,79
R2	0-17	10,90	14,60	22,04	308,41
	17-30	6,90	7,39	29,64	34,55
	30-40	2,26	7,19	22,03	36,99
	40-57	1,47	7,15	17,48	46,84
R3	0-10	10,92	2,84	23,65	317,01
	10-27	4,79	8,57	4,16	193,68
	27-40	1,69	7,18	0,52	36,95
	40-60	0,98	4,28	0,52	33,39
<i>PLQ</i> N° de repetición	Profundidad (cm)	MO (%)	N	P	K
			(mg/Kg)		
R1	0-10	2,79	7,11	26,71	232,79
	10-20	1,39	5,68	22,20	33,18
	20-30	1,07	5,83	19,75	27,26
	30-40	0,70	4,27	17,41	29,99
	40-60	0,69	4,98	19,70	29,92
R2	0-10	5,55	10,00	7,42	190,53
	10-20	3,12	3,53	7,33	36,32
	20-30	1,80	2,82	6,29	46,13
	30-40	1,38	2,81	8,60	46,13
	40-50	1,67	6,38	6,98	46,46
	50-65	0,90	2,12	10,74	46,36
R3	0-5	19,50	15,13	16,03	276,35
	5-11	7,48	9,43	8,85	247,55
	11-19	2,08	8,47	6,56	23,11
	19-38	1,60	5,66	15,74	26,47
	38-64	0,98	6,77	10,36	126,63

QTC	Profundidad	MO	N	P	K
N° de repetición	(cm)	(%)	(mg/Kg)		
R1	0-10	5,43	7,94	6,18	67,47
	10-22	1,74	6,02	6,29	52,99
	22-45	2,05	7,81	4,14	46,51
	45-64	1,47	6,43	4,81	60,10
R2	0-13	4,35	7,73	5,38	26,28
	13-25	12,48	5,99	0,51	13,18
	25-47	0,48	5,28	ND	6,59
	47-67	0,14	3,56	ND	6,67
R3	0-10	5,15	7,16	38,80	132,94
	10-20	4,65	7,93	38,86	160,77
	20-30	0,14	3,96	34,06	67,47
	30-40	0,98	5,75	36,02	70,34
	40-57	0,36	5,50	41,46	75,46
ESP	Profundidad	MO	N	P	K
N° de repetición	(cm)	(%)	(mg/Kg)		
R1	0-10	0,07	6,48	1,70	114,47
	10-20	2,21	4,23	1,56	49,48
	20-30	0,69	5,31	0,67	39,74
	30-50	1,40	7,87	1,69	60,22
R2	0-10	5,72	14,37	0,52	221,74
	10-20	0,56	7,23	ND	16,90
	20-30	0,71	5,78	ND	94,66
	30-40	0,14	5,06	ND	23,66
	40-50	0,07	5,72	ND	24,97
	50-60	0,07	4,59	ND	21,49
R3	0-11	3,98	8,68	ND	108,29
	11-19	0,84	4,31	0,78	70,63
	19-41	0,99	7,96	2,36	23,60
	41-63	0,92	10,93	1,18	27,07

Recuadro de valores obtenidos a partir del proyecto FONDECYT 1090283, cortesía Juan Pablo Fuentes Espoz, Ing. Forestal, M. Sc., Ph.D., profesor Edafología Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, 2009 (comunicación personal).

APÉNDICES

Apéndice I. Profundidad de los distintos horizontes para cada situación vegetacional.

Profundidad (cm)	PEU	PLQ	QTC	ESP
1° Horizonte	0- 13	0 - 6	0 - 21	0 - 26
2° Horizonte	13 - 33	6 - 28	21 - 37	26 - 38
3° Horizonte	33 - 44	28 - 52	37 - 55	n. d.

(*) n.d.: no determinado

Apéndice II. Valores de densidad aparente y retención de agua a tensiones de -33 kPa y -1500 kPa en cada horizonte. Las diferencias significativas se indican con letras según comparación múltiple de promedios LSD de Fisher a un nivel de significancia del 5%. Las barras de error representan \pm un error estándar (n = 3).

	PEU	PLQ	QTC	ESP
1° Horizonte				
ρ_b (Mg/m³)	0,99 \pm 0,14 a	1,22 \pm 0,09 ab	1,22 \pm 0,06 ab	1,47 \pm 0,05 b
33 kPa	0,23 \pm 0,02 a	0,25 \pm 0,02 ab	0,25 \pm 0,05 ab	0,26 \pm 0,01 a
1500 kPa	0,11 \pm 0,01 ab	0,08 \pm 0,01 ab	0,11 \pm 0,04 ab	0,16 \pm 0,02 b
2° Horizonte				
ρ_b (Mg/m³)	1,19 \pm 0,05 a	1,26 \pm 0,10 ab	1,34 \pm 0,05 ab	1,43 \pm 0,03 b
33 kPa	0,21 \pm 0,01 a	0,20 \pm 0,01 a	0,23 \pm 0,03 a	0,33 \pm 0,01 b
1500 kPa	0,10 \pm 0,01 ab	0,08 \pm 0,01 a	0,13 \pm 0,01 b	0,20 \pm 0,02 c
3° Horizonte				
ρ_b (Mg/m³)	1,27 \pm 0,08 a	1,32 \pm 0,16 a	1,43 \pm 0,03 a	n. d.
33 kPa	0,21 \pm 0,01 a	0,24 \pm 0,03 a	0,26 \pm 0,02 a	n. d.
1500 kPa	0,09 \pm 0,01 a	0,12 \pm 0,02 a	0,13 \pm 0,02 a	n. d.

(*) n. d: no determinado

Apéndice III. Valores de K_{ef} (saturada), K_{ef} (-33kPa) y K_{ef} (-1500kPa) en cada situación vegetacional. Las diferencias significativas entre formaciones vegetacionales se indican con letras según comparación múltiple de promedios LSD de Fisher a un nivel de significancia del 5%. Las barras de error representan \pm un error estándar (n = 3).

(cm/día)	PEU	PLQ	QTC	ESP
K_{ef} (saturada)	133,76 \pm 47,72 a	95,69 \pm 51,38 ab	31,90 \pm 8,33 ab	14,27 \pm 2,70 b
K_{ef} (33 kPa)	83,52 \pm 37,05 a	68,56 \pm 22,56 ab	21,85 \pm 5,26 ab	9,55 \pm 2,04 b
K_{ef} (1500 kPa)	75,84 \pm 39,54 a	47,59 \pm 16,52 a	20,75 \pm 4,33 a	7,47 \pm 2,88 a

Apéndice IV. Valores de conductividad hidráulica saturada (K_s) de cada horizonte en las distintas situaciones vegetacionales con su respectivo error estándar ($n=3$).

		Profundidad (cm)	K_s (cm/día)
<i>PEU</i>	1° Horizonte	0 - 13	402,67 ± 276,11
	2° Horizonte	13 - 33	140,51 ± 56,87
	3° Horizonte	33 - 44	79,23 ± 15,67
<i>PLQ</i>	1° Horizonte	0 - 6	88,98 ± 50,44
	2° Horizonte	6 - 28	118,73 ± 74,49
	3° Horizonte	28 - 52	100,21 ± 34,45
<i>QTC</i>	1° Horizonte	0 - 21	60,46 ± 26,73
	2° Horizonte	21 - 37	54,02 ± 12,46
	3° Horizonte	37 - 55	18,95 ± 4,54
<i>ESP</i>	1° Horizonte	0 - 26	16,49 ± 4,35
	2° Horizonte	26 - 38	12,86 ± 1,89
	3° Horizonte	n. d.	n. d.

(*) n. d: no determinado

Apéndice V. Textura de los distintos horizontes en cada una de las situaciones vegetacionales.

		Profundidad (cm)	%			Textura
			Arena	% Limo	% Arcilla	
<i>PEU</i>	1°Horizone	0 - 13	62,13	26,93	10,93	Franco Arenoso
	2°Horizone	13 - 33	61,10	25,47	13,43	Franco Arenoso
	3°Horizone	33 - 44	61,20	23,75	15,05	Franco Arenoso
<i>PLQ</i>	1°Horizone	0 - 6	51,10	35,23	13,67	Franco
	2°Horizone	6 - 28	52,93	32,83	14,23	Franco Arenoso
	3°Horizone	28 - 52	59,60	28,00	12,40	Franco Arenoso
<i>QTC</i>	1°Horizone	0 - 21	43,26	36,69	20,05	Franco
	2°Horizone	21 - 37	42,70	39,53	17,77	Franco
	3°Horizone	37 - 55	43,97	34,67	21,67	Franco
<i>ESP</i>	1°Horizone	0 - 26	25,26	37,33	37,41	Franco Arcilloso
	2°Horizone	26 - 38	9,97	29,97	60,07	Arcilloso
	3°Horizone	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.

(*) n. d: no determinado

Apéndice VI. Densidad Real (ρ_r) de los distintos horizontes correspondientes a cada una de las situaciones vegetacionales con su respectivo error estándar (n=3).

	Profundidad (cm)	ρ_r
1° Horizonte	0 - 13	2,41 ± 0,07
<i>PEU</i> 2° Horizonte	13 - 33	2,40 ± 0,06
3° Horizonte	33 - 44	2,38 ± 0,05
1° Horizonte	0 - 6	2,35 ± 0,04
<i>PLQ</i> 2° Horizonte	6 - 28	2,37 ± 0,08
3° Horizonte	28 - 52	2,34 ± 0,04
1° Horizonte	0 - 21	2,24 ± 0,07
<i>QTC</i> 2° Horizonte	21 - 37	2,37 ± 0,01
3° Horizonte	37 - 55	2,31 ± 0,05
1° Horizonte	0 - 26	2,25 ± 0,04
<i>ESP</i> 2° Horizonte	26 - 38	2,25 ± 0,02
3° Horizonte	n. d.	n. d.

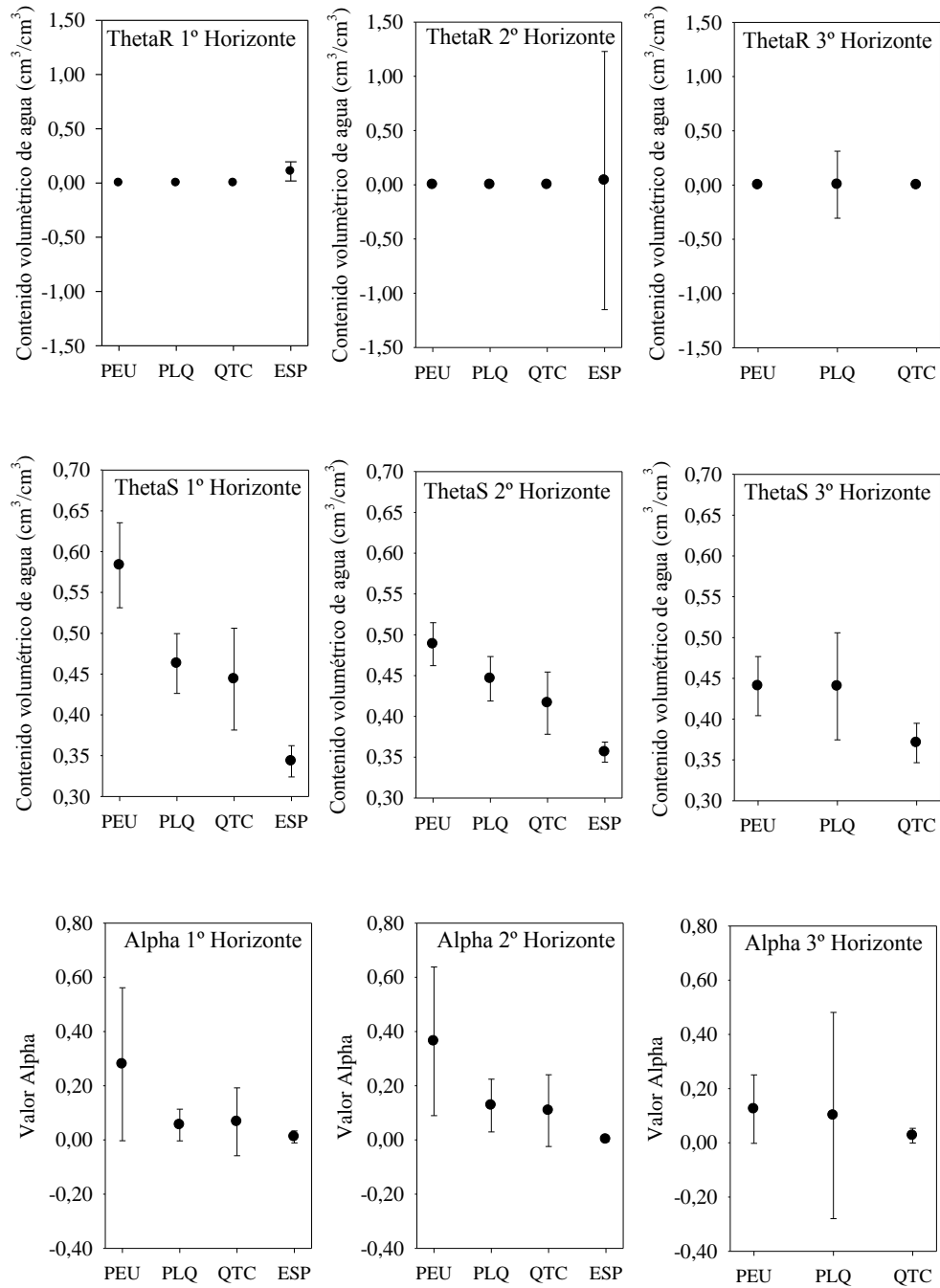
(*) n. d: no determinado

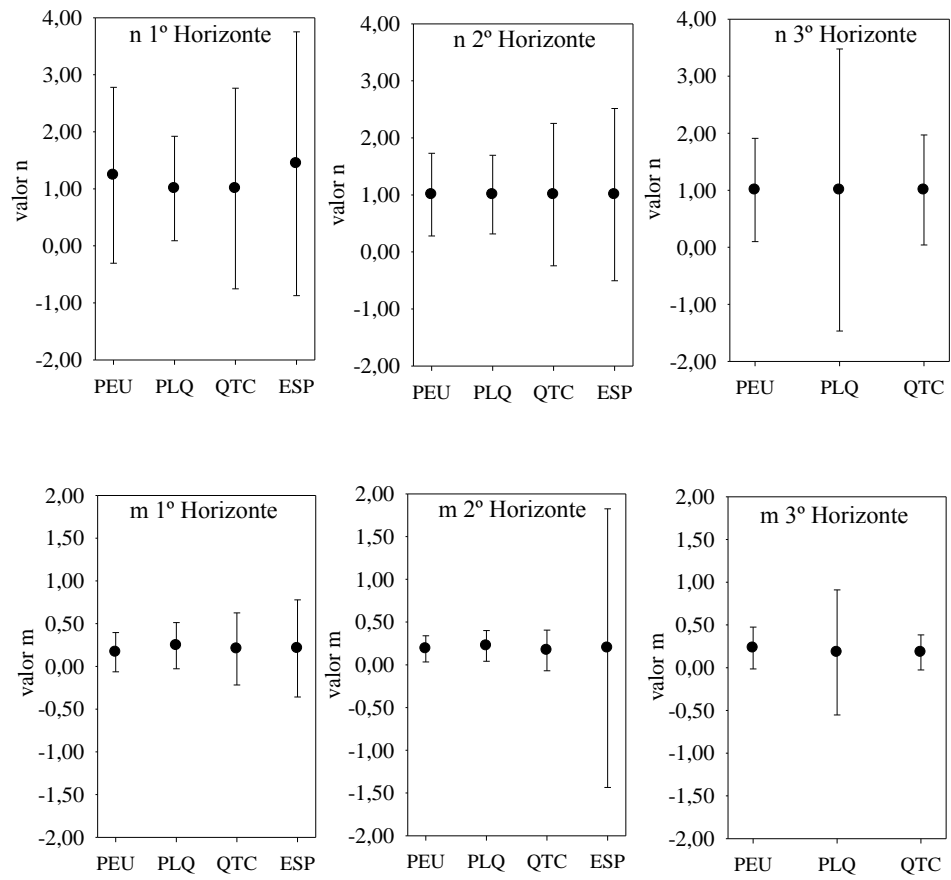
Apéndice VII. Valores de los parámetros Mualem-Van Genuchten de cada situación vegetacional.

	Parámetros Mualem - Van Genuchten					
	ThetaR	ThetaS	Alpha	n	m	l
1° Horizonte	0,000 ± 0,000	0,583 ± 0,052	0,279 ± 0,282	1,237 ± 1,542	0,166 ± 0,229	0,500 ± 0,000
<i>PEU</i> 2° Horizonte	0,000 ± 0,000	0,488 ± 0,026	0,364 ± 0,274	1,005 ± 0,725	0,187 ± 0,154	0,500 ± 0,000
3° Horizonte	0,000 ± 0,000	0,440 ± 0,036	0,124 ± 0,126	1,005 ± 0,906	0,230 ± 0,245	0,500 ± 0,000
1° Horizonte	0,000 ± 0,000	0,463 ± 0,037	0,055 ± 0,058	1,005 ± 0,916	0,242 ± 0,270	0,500 ± 0,000
<i>PLQ</i> 2° Horizonte	0,000 ± 0,000	0,446 ± 0,027	0,127 ± 0,097	1,005 ± 0,690	0,222 ± 0,180	0,500 ± 0,000
3° Horizonte	0,003 ± 0,309	0,440 ± 0,066	0,101 ± 0,381	1,005 ± 2,473	0,179 ± 0,731	0,500 ± 0,000
1° Horizonte	0,000 ± 0,000	0,444 ± 0,062	0,067 ± 0,125	1,005 ± 1,758	0,204 ± 0,422	0,500 ± 0,000
<i>QTC</i> 2° Horizonte	0,000 ± 0,000	0,416 ± 0,038	0,108 ± 0,132	1,005 ± 1,249	0,168 ± 0,238	0,500 ± 0,000
3° Horizonte	0,000 ± 0,000	0,371 ± 0,024	0,026 ± 0,027	1,005 ± 0,965	0,179 ± 0,204	0,500 ± 0,000
1° Horizonte	0,107 ± 0,088	0,343 ± 0,019	0,011 ± 0,022	1,440 ± 2,313	0,210 ± 0,568	0,500 ± 0,000
<i>ESP</i> 2° Horizonte	0,039 ± 1,191	0,356 ± 0,012	0,001 ± -0,009	1,005 ± 1,510	0,195 ± 1,630	0,500 ± 0,000
3° Horizonte	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.

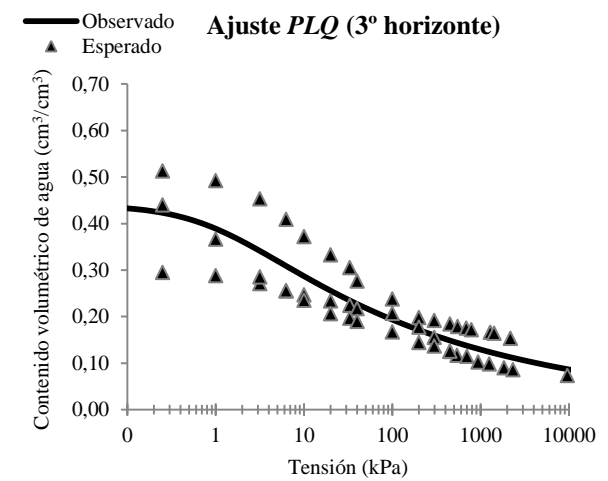
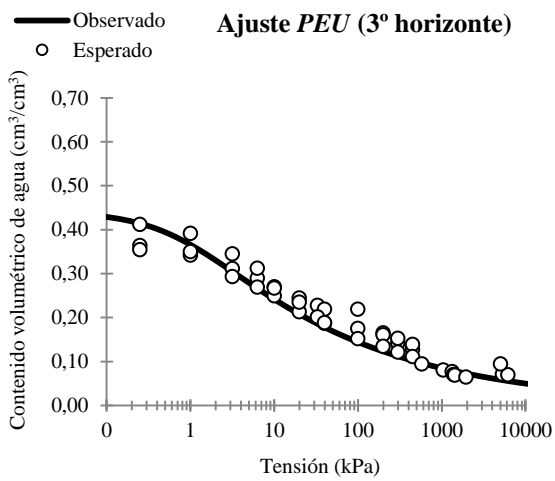
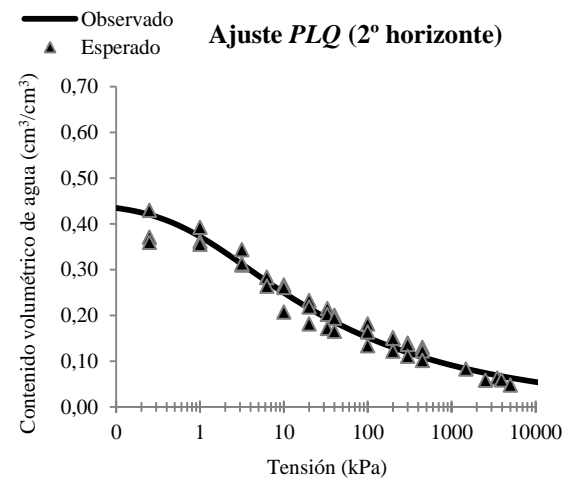
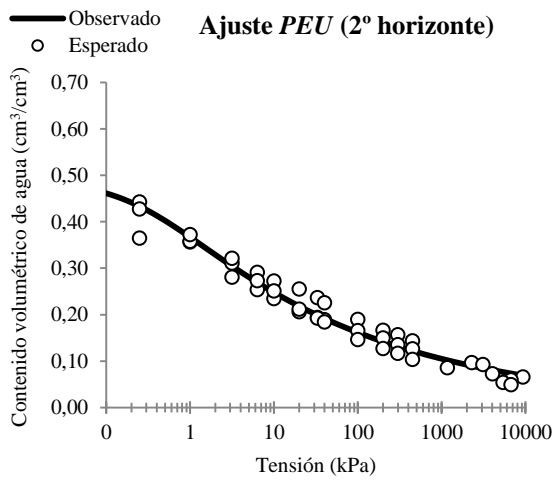
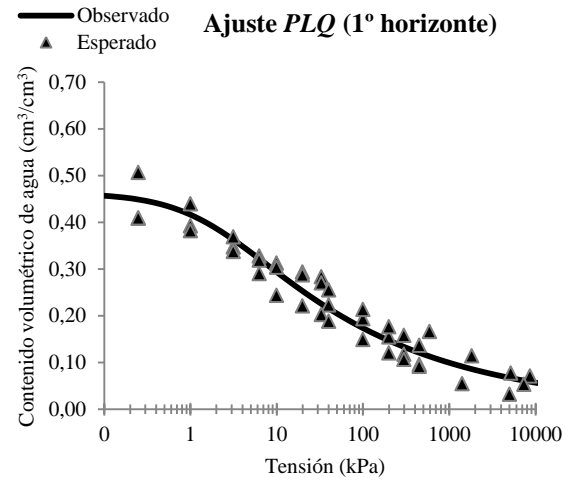
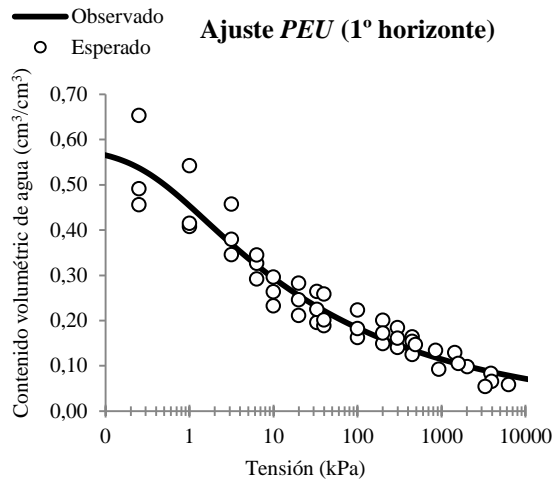
(*) n. d: no determinado

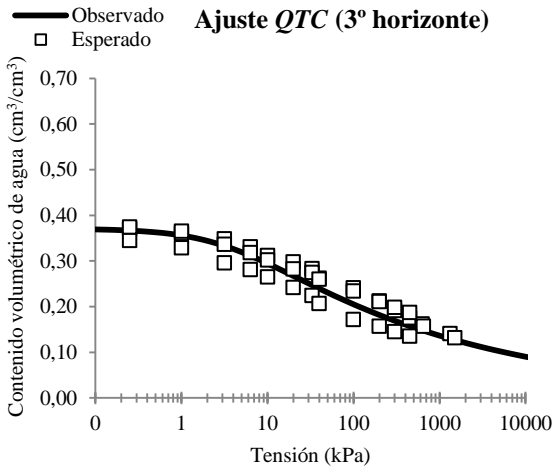
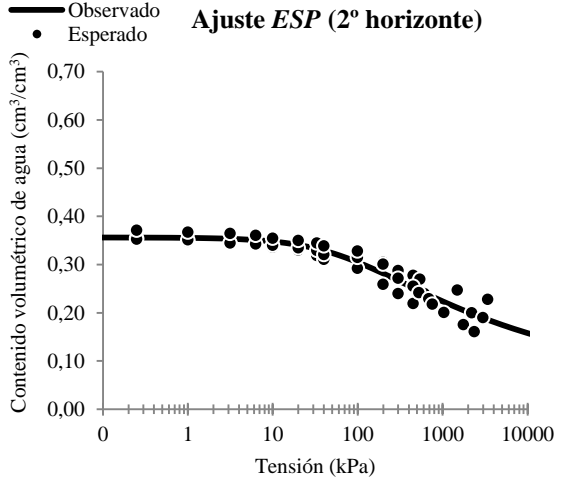
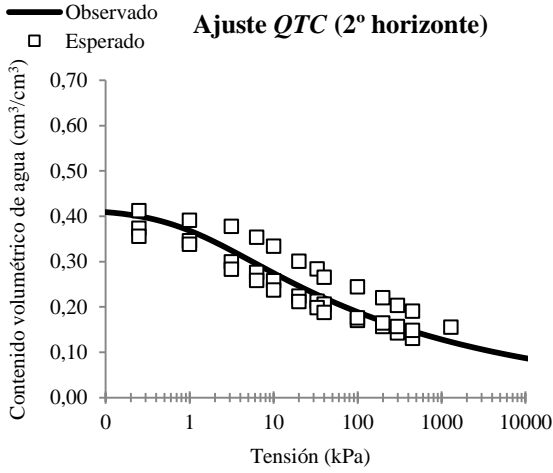
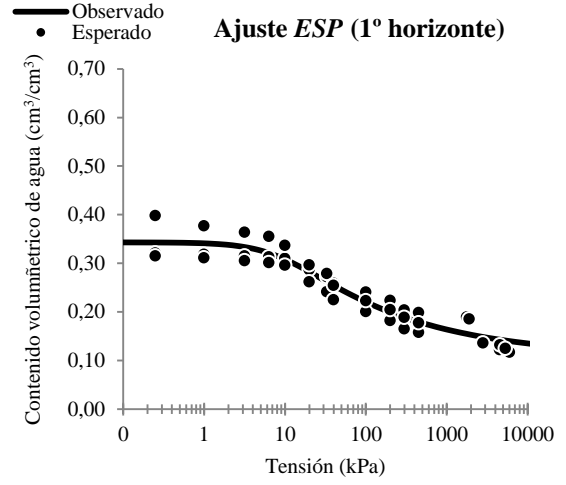
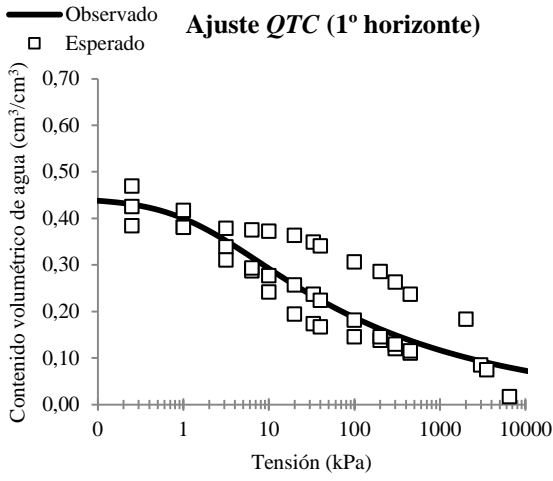
Apéndice VIII. Parámetros Mualem-Van Genuchten graficados en cada situación vegetacional.





Apéndice IX. Ajuste de la curva de retención de agua estimada por la metodología Mualem-Van Genuchten para cada horizonte de forma individual de cada situación vegetacional.





Apéndice X. Características Físicas y Morfológicas de los pedones en las distintas situaciones vegetacionales:

PEUMO (Parcela 7)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 22 A ₁	Negro (7,5R 2,5/1) en húmedo; franco arcillo arenoso; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares moderados gruesos; raíces medias abundantes; poros finos abundantes; presencia de micas; límite lineal claro.
22 – 43 A ₂	Negro (7,5YR 2,5/1) en húmedo; franco arenoso; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares moderados gruesos; raíces medias abundantes; poros medios abundantes; presencia de micas; límite lineal claro.
43 – 61 y más A ₃	Negro (10YR 2/1) en húmedo; franco arenoso; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares moderados débiles; raíces medias comunes; poros medios abundantes; presencia de micas.

PEUMO (Parcela 8)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 10 A ₁	Pardo rojizo oscuro (5YR 2,5/2) en húmedo; franco; ligeramente plástico y no adhesivo; bloques subangulares débiles medios; raíces finas abundantes y medias comunes; poros finos abundantes; límite lineal claro.
10 – 28 A ₂	Pardo rojizo oscuro (5YR 2,5/2) en húmedo; franco arenoso; ligeramente plástico y no adhesivo; bloques subangulares gruesos moderados; raíces medias abundantes; poros medios comunes; límite lineal claro.
28 – 37 y más A ₃	Pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; franco arcillo arenoso; moderadamente plástico y moderadamente adhesivo; bloques subangulares moderados medios y gruesos; raíces medias pocas; poros finos comunes.

PEUMO (Parcela 27)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 8 A	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; franco arenoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares débiles medios y granular débiles finos; raíces finas y medias abundantes; poros finos abundantes; límite lineal claro.
8 – 28 AC ₁	Pardo oscuro (7,5YR 3/3) en húmedo; franco arenoso; no plástico y no adhesivo; bloques subangulares débiles finos; raíces finas comunes; poros medios comunes; pedregosidad 20%; límite lineal claro.
28 – 55 AC ₂	Pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; franco arenoso; no plástico y no adhesivo; sin grado estructural (grano simple); raíces medias pocas; poros medios abundantes; pedregosidad 40 %.
55 y más R	Roca dura.

PEUMO-LITRE-QUILLAY (Parcela 10)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 4 A ₁	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; franco arenoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares fuertes gruesos y granular moderado medio; raíces medias abundantes; poros medios abundantes; limite lineal claro.
4 - 30 A ₂	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; franco arenoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; raíces medias y gruesas abundantes; poros medios abundantes y gruesos pocos; limite lineal claro.
30 – 53 AC	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; franco arenoso; moderadamente plástico y moderadamente adhesivo; raíces medias comunes; poros medios comunes; pedregosidad 50%.
53 y más R	Roca dura.

PEUMO-LITRE-QUILLAY (Parcela 14)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 5 A ₁	Pardo muy oscuro (7,5YR 2,5/3) en húmedo; franco arcillo arenoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares moderados gruesos; raíces medias abundantes; poros medios y gruesos abundantes; limite lineal claro.
5 - 28 A ₂	Pardo amarillento oscuro (5YR 3/3) en húmedo; franco arcillo arenoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares moderados gruesos; raíces gruesas abundantes; poros medios y gruesos abundantes; limite lineal claro.
28 – 45 AC	Pardo oscuro (7,5YR 3/4) en húmedo; franco arenoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares moderados finos; raíces medias y gruesas abundantes; poros medios abundantes y gruesos comunes; pedregosidad 50%.
45 y más R	Roca dura.

PEUMO-LITRE-QUILLAY (Parcela 16)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 9 A ₁	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/2) en húmedo; franco limoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares débiles medios y granular débil medio; raíces finas comunes y medias abundantes; poros medios abundantes; limite lineal claro.
9 – 27 A ₂	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/2) en húmedo; franco arcillo arenoso; moderadamente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares moderados medios; raíces medias abundantes y gruesas pocas; poros medios abundantes; limite lineal claro.
27 – 43 AC	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; franco arcillo arenoso; moderadamente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares medios moderados; raíces medias abundantes y muy gruesas pocas; poros medios comunes y finos abundantes; pedregosidad 20%; limite lineal claro.
43 y más R	Roca dura.

QUILLAY-TREVO-COLLIHUAY (Parcela 4)	
Características Físicas y Morfológicas del Pedón	
0 – 19 A	Pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; franco; muy plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares fuertes medios y gruesos; raíces medias abundantes; poros finos pocos; limite lineal claro.
19 -34 AB	Pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; arcilloso; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares fuertes medios y gruesos; raíces medias abundantes y gruesas pocas; poros finos pocos; pedregosidad 50%; limite lineal claro.
34 – 48 AC	Pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; arcilloso; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares fuertes medios; raíces medias pocas; poros finos pocos; pedregosidad 60%.
48 y más R	Roca dura.

QUILLAY-TREVO-COLLIGUAY (Parcela 6)	
Características Físicas y Morfológicas del Pedón	
0– 22 A ₁	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/4) en húmedo; franco arcillo limoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares moderados medios; raíces finas comunes; poros medios abundantes; presencia de micas; limite lineal claro.
22 – 39 A ₂	Pardo (7,5YR 4/4) en húmedo; franco arcillo limoso; moderadamente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares moderados medios; raíces medias comunes; poros medios comunes; presencia de micas; limite lineal claro.
39 – 60 y más A ₃	Pardo oscuro (7,5YR 4/6) en húmedo; franco arcillo arenoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares moderados medios; raíces gruesas comunes; poros gruesos comunes.

QUILLAY-TREVO-COLLIHUAY (Parcela 11)	
Características Físicas y Morfológicas del Pedón	
0 – 21 A ₁	Pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; franco arenoso; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; bloques subangulares débiles finos y granular débil medio; raíces finas abundantes; poros finos abundantes; presencia de carbones; limite lineal claro.
21– 38 A ₂	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; franco arcillo arenoso; moderadamente plástico y moderadamente adhesivo; bloques subangulares moderados medios; raíces gruesas comunes; poros medios abundantes; presencia de carbones; limite lineal claro.
38 – 57 BC	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; arcillo arenoso; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares fuertes medios; raíces medias comunes; poros medios comunes; presencia de carbones; iluviación de arcillas, pedregosidad 50%.
57 y más R	Roca dura.

ESPINO (Parcela 1)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 26 Bt	Pardo rojizo oscuro (2,5YR 3/4) en húmedo; arcilloso con grava; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares medios y gruesos fuertes; raíces finas comunes; poros finos comunes; iluviación de arcillas; limite líneas difuso.
26 – 35 Bt/C	Pardo rojizo oscuro (2,5YR 3/4) en húmedo; arcilloso sin gravas; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares moderados medios; raíces finas pocas; poros finos comunes; iluviación de arcillas; pedregosidad 50%.
35 y más R	Roca dura.

ESPINO (Parcela 2)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 22 Bt ₁	Pardo rojizo oscuro (2,5YR 3/4) en húmedo; arcilloso con gravas; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares medios y gruesos fuertes; raíces finas pocas; poros finos pocos; iluviación de arcillas; limite lineal difuso.
22 – 31 Bt ₂	Rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo; arcilloso sin gravas; muy plástico y muy adhesivo; sin estructura (masivo); raíces finas pocas; poros finos pocos; iluviación de arcillas.
31 y más R	Roca dura.

ESPINO (Parcela 3)	
Profundidad (cm)	Características Físicas y Morfológicas del Pedón
0 – 30 B _w	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; arcilloso; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares medios y gruesos fuertes; raíces finas pocas; poros finos pocos; pedregosidad 40%; limite lineal claro.
30 – 49 BC	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; arcilloso; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares medios y gruesos fuertes; raíces finas pocas; poros finos pocos; pedregosidad 60%.
49 y más R	Roca dura.