

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE TRES SUELOS  
CONTRASTANTES ACONDICIONADOS CON ENMIENDAS  
ORGÁNICAS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MANEJO DE SUELOS Y  
AGUAS**

**CAROLINA MUÑOZ LEMUS**  
**GEÓGRAFA**

**DIRECTORES DE TESIS**  
**MSC. MANUEL CASANOVA PINTO**  
**DR. OSCAR SEGUEL SEGUEL**

**PROFESORES CONSEJEROS**  
**DR.ING. VÍCTOR GARCÍA DE CORTÁZAR**  
**PH.D. JULIO HABERLAND ARELLANO**

**SANTIAGO DE CHILE**  
**2013**



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE POSTGRADO

**EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE TRES SUELOS  
CONTRASTANTES ACONDICIONADOS CON ENMIENDAS  
ORGÁNICAS**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MANEJO DE SUELOS Y  
AGUAS

**CAROLINA MUÑOZ LEMUS**  
GEÓGRAFA

DIRECTORES DE TESIS  
MSC. MANUEL CASANOVA PINTO  
DR. OSCAR SEGUEL SEGUEL

PROFESORES CONSEJEROS  
DR. ING. VÍCTOR GARCÍA DE CORTÁZAR  
PH. D. JULIO HABERLAND ARELLANO

SANTIAGO DE CHILE  
2013

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE POSTGRADO

**EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE TRES SUELOS  
CONTRASTANTES ACONDICIONADOS CON ENMIENDAS  
ORGÁNICAS**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MANEJO DE SUELOS Y  
AGUAS

CAROLINA ALEJANDRA MUÑOZ LEMUS  
GEÓGRAFA

**Calificaciones**

**Directores de Tesis**

Manuel Casanova P.  
Ingeniero Agrónomo, MSC.

6,0

Oscar Seguel S.  
Ingeniero Agrónomo, Dr.

6,3

**Profesores Consejeros**

Julio Haberland A.  
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

4,7

Víctor García de Cortázar  
Ingeniero Agrónomo, Dr.Ing.

6,5

*A mi hermano Jaime  
A mi primo Sebastián  
QEPD*

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	5
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>CAPITULO I. MARCO TEÓRICO</b> .....	3
1.1. <i>Hipótesis</i> .....	12
1. <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	13
1.1. <i>Objetivos</i> .....	15
2. <b>MATERIALES Y MÉTODO</b> .....	16
2.1. <i>Análisis estadístico</i> .....	21
3. <b>RESULTADOS</b> .....	22
3.1. <i>Caracterización inicial</i> .....	22
3.2. <i>Materia orgánica</i> .....	23
3.3. <i>Densidad aparente</i> .....	24
3.4. <i>Retención de agua y distribución de poros por tamaño</i> .....	29
3.5. <i>Estabilidad de agregados</i> .....	36
3.6. <i>Resistencia a la penetración</i> .....	40
3.7. <i>Flujo de aire</i> .....	43
3.8. <i>Temperatura del suelo</i> .....	46
4. <b>DISCUSIÓN</b> .....	55
5. <b>CONCLUSIONES</b> .....	66
6. <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	67
<b>APÉNDICE I</b> .....	74
<b>APÉNDICE II</b> .....	76
<b>ANEXO I</b> .....	82
<b>ANEXO II</b> .....	85
<b>ANEXO III</b> .....	86
<b>ANEXO IV</b> .....	87
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	88

## ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Impactos benéficos y preocupantes de enmiendas orgánicas en el suelo.....</i>	<i>9</i>
<i>Cuadro 2. Enmiendas comerciales empleadas y sus principales características. ....</i>	<i>17</i>
<i>Cuadro 3. Denominación de tratamientos de acuerdo al suelo y acondicionador aplicado, indicando la dosis respectiva. ....</i>	<i>17</i>
<i>Cuadro 4. Caracterización inicial de tres suelos de Chile central previo al acondicionamiento con enmiendas orgánicas. ....</i>	<i>22</i>
<i>Cuadro 5. Variación del contenido de materia orgánica en el tiempo, de tres suelos de la zona central de Chile acondicionados con enmiendas orgánicas. ....</i>	<i>23</i>
<i>Cuadro 6. Evolución en el tiempo de la densidad aparente, determinada con cilindro, de tres suelos de la zona central de Chile acondicionados con enmiendas orgánicas. ....</i>	<i>24</i>
<i>Cuadro 7. Evolución en el tiempo de la densidad aparente con cilindro del suelo Mapocho... </i>	<i>26</i>
<i>Cuadro 8. Evolución en el tiempo de los poros de drenaje rápido de tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas orgánicas. ....</i>	<i>31</i>
<i>Cuadro 9. Evolución en el tiempo de los poros de drenaje lento de la Serie RUG. ....</i>	<i>32</i>
<i>Cuadro 10. Evolución en el tiempo de la VDMA (mm) en las Series RLV y MPC. El menor valor de VDMA denota mayor estabilidad. ....</i>	<i>36</i>
<i>Cuadro 11. Evolución en el tiempo de la estabilidad de microagregados en los suelos Mapocho y Rungue. ....</i>	<i>39</i>
<i>Cuadro 12. Evolución en el tiempo del flujo de aire en tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas orgánicas. ....</i>	<i>44</i>
<i>Cuadro 13. Evolución en el tiempo de la temperatura en tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas orgánicas. ....</i>	<i>46</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Espiral descendente de degradación de suelos y su asociación a los niveles de carbono en los suelos (adaptada de Magdoff y van Es, 2009 y Glinsky et al., 2011).....	3
<b>Figura 2.</b> Resumen de fracciones de la materia orgánica del suelo (Hopkins y Gregorich, 2005).....	8
<b>Figura 3.</b> Factores que afectan la agregación de suelos (Bronick y Lal, 2005).....	10
<b>Figura 4.</b> Opciones tecnológicas para mejorar el pool de C pool en suelos y ecosistemas (modificado de Lal, 2002). ....	11
<b>Figura 5.</b> Vista lateral y dimensiones del contenedor (izquierda). Diagrama en planta de división interna de los contenedores (derecha); cada número equivale al tiempo (meses) de evaluación.....	18
<b>Figura 6.</b> Tratamientos aplicados. Esquema de distribución aleatoria (izquierda) e imagen de su disposición en terreno (derecha). Vista de norte a sur, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. ....	19
<b>Figura 7.</b> Variación en tiempo de la densidad aparente con cilindro (izquierda) y terrón (derecha) de tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con cuatro enmiendas. .	28
<b>Figura 8.</b> Variación en el tiempo de la curva de retención de agua de tres suelos de la zona central de Chile a los tiempos $t_0$ (izquierda) y $t_6$ (derecha) acondicionados con enmiendas. ...	29
<b>Figura 9.</b> Evolución en el tiempo de los poros de agua útil (PAU), para los suelos RLV (9a) y MPC (9b).....	33
<b>Figura 10.</b> Evolución en el tiempo de los poros de agua inútil (PAI) del suelo perteneciente a las series MPC (10a) y RUG (10b). ....	34
<b>Figura 11.</b> Evolución en el tiempo de la VDMA de la Serie RUG.....	37
<b>Figura 12.</b> Evolución en el tiempo de la estabilidad de microagregados de la Serie MPC. El menor valor de RD denota la mayor estabilidad.....	38
<b>Figura 13.</b> Resistencia a la penetración, 24 h después de un riego, en los testigos (izquierda) contrastada distintas enmiendas (derecha), para distintos tiempos de evaluación (0, 1, 3 y 6 meses desde el inicio del ensayo). ....	42

<b>Figura 14.</b> Evolución en el tiempo del flujo de aire de tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas. ....	43
<b>Figura 15.</b> Relación entre poros de drenaje rápido (PDR) y flujo de aire para el tratamiento RUGK. ....	45
<b>Figura 16.</b> Variación semanal de la temperatura de suelo Rinconada de Lo Vial (RLV) acondicionado con enmiendas orgánicas.....	48
<b>Figura 17.</b> Variación semanal de la temperatura de suelo Mapocho (MPC) acondicionado con enmiendas orgánicas. ....	49
<b>Figura 18.</b> Variación semanal de la temperatura de suelo Rungue (RUG) acondicionado con enmiendas orgánicas. ....	50
<b>Figura 19.</b> Variación de la temperatura en un período de una semana en tres suelos de Chile central, acondicionados con cuatro enmiendas orgánicas, luego de un riego. ....	52
<b>Figura 20.</b> Variación diurna de la temperatura para un día de verano (febrero 15, izquierda) comparada con uno de invierno (agosto 3, derecha) en tres suelos de Chile central acondicionados con cuatro enmiendas orgánicas.....	54
<b>Figura 21.</b> Tendencia en el tiempo del contenido de materia orgánica en tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas orgánicas. ....	56
<b>Figura 22.</b> Rasgos de superficie en suelo Rungue al 4° día de aplicadas las enmiendas Kimelgran® (RUGK) y Aqua Power® (RUGA).....	63
<b>Figura 23.</b> Rasgos morfológicos superficiales en el suelo Mapocho acondicionado con Pow Humus® (MPCP) en comparación con el testigo (MPCT), al 4° día de aplicada la enmienda	64
<b>Figura 24.</b> Rasgos de superficie en suelo Rinconada de Lo Vial a 4° día de aplicadas las enmiendas Pow Humus® (RLVP) y Aqua Power® (RLVA).....	64
<b>Figura 25.</b> Estado de los tratamientos RUGA (contenedor izquierdo) y RUGQ (contenedor derecho). El estado de friabilidad es levemente distinto, sin embargo se observaron diferencias al tacto. ....	64
<b>Figura 26.</b> Estado superficial del suelo Mapocho a casi dos meses de aplicadas las enmiendas. El contenedor superior corresponde a MPCA y el inferior a MPCQ. ....	65
<b>Figura 27.</b> Estado superficial de los tratamientos RLVP y RLVK (contenedor izquierdo y derecho, respectivamente). ....	65



## RESUMEN

A través de distintos estudios se ha determinado la existencia de cambios en las propiedades físicas de los suelos con la aplicación de enmiendas orgánicas, pero no se han comparado los efectos de éstas entre distintos suelos a través del tiempo. La presente investigación tuvo como objetivo comparar el efecto y persistencia de cuatro enmiendas orgánicas comerciales sobre las propiedades físicas de tres suelos de la Región Metropolitana, contrastantes en su contenido de arcilla, comparándolas con un testigo sin enmienda, todos con cuatro repeticiones. El estudio se realizó usando un diseño completamente aleatorio con medidas repetidas en el tiempo con estructura factorial, tomando muestras a los 0, 1, 3 y 6 meses. Se evaluó la resistencia a la penetración (RP), estabilidad de agregados, densidad aparente, distribución y tamaño de poros, retención de agua, flujo de aire y temperatura, además del contenido de MO. Aunque desde un comienzo se apreciaron diferencias en los resultados, derivadas tanto de la composición de los suelos como de las enmiendas aplicadas, se destaca el efecto tiempo como la principal causa de cambios en las propiedades físicas, con un mayor efecto al tercer mes, volviendo a niveles iniciales al final del ensayo. Los procesos de estructuración generan un incremento de la densidad aparente en el tiempo, pero la RP disminuye al sexto mes. Sólo en el suelo arcilloso se genera una tendencia a mejorar la estabilidad de agregados en las primeras fechas de medición. Finalmente, la gran mayoría de los tratamientos presentó temperaturas distintas al testigo durante la medición, pero los resultados apuntan a la necesidad de realizar aplicaciones de estas enmiendas en forma periódica.

**Palabras clave:** Contenido de arcilla, estabilidad de agregados, temperatura, persistencia en el tiempo, ácidos húmicos.

## ABSTRACT

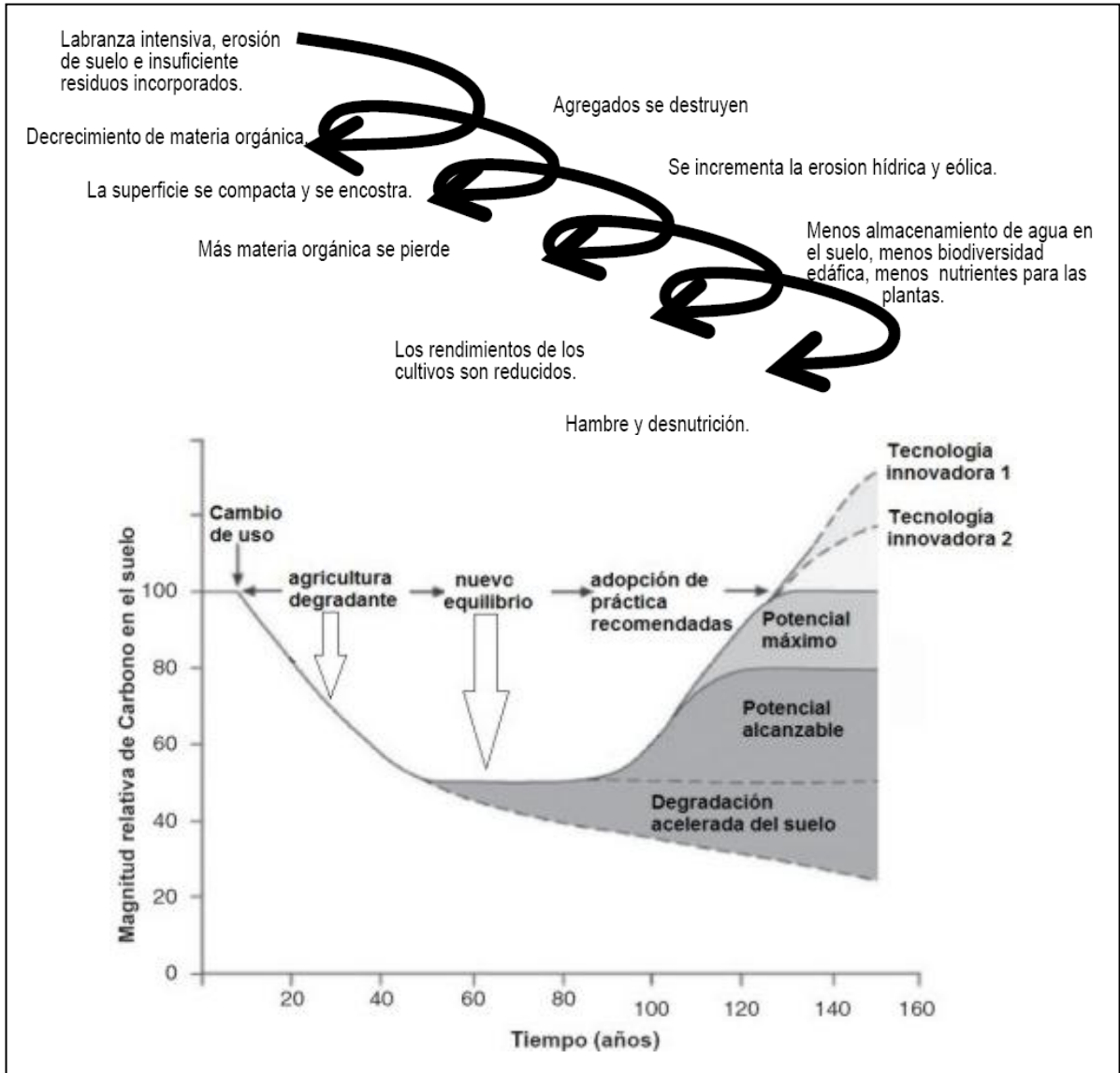
### **Evolution of soil physical properties on three soils with different clay contents conditioned with organic amendments.**

Several studies report changes in the soil physical properties when organic amendments are added, but there is not enough information about their effects among different soils over time. The present study aimed to compare the effect and persistence of four commercial organic amendments on physical properties of three soils of the Chilean Metropolitan Region, with diverse clay contents which were compared with a control (without amendment), each with four replicates. This study was performed using a completely randomized design with measurements on the time and with a factorial structure, taking samples at 0, 1, 3 and 6 months. Soil penetration resistance (PR), aggregate stability, bulk density, pore size distribution, water retention, air flow, temperature, and the OM contents were assessed. Although initially differences were observed in the results, due to both the type of soil and amendments applied, highlight the time effect as the main cause of changes in the physical properties, with a greater effect at the third month, returning to initial levels at the end of the essay. Aggregation processes increased bulk density in time, but the PR decreases at sixth month. Only the clayey soil shows a tendency to improve the stability of soil aggregates in the first measured dates. Finally, most of the treatments showed lower temperatures during summer time compared with the control and all the results point to the convenience of addition of soil amendments in a regular frequency.

**Key Words:** Clay contents, aggregate stability, temperature, time persistence, humic acids.

## CAPITULO I. MARCO TEÓRICO

La degradación del suelo ocurre en la medida que cualquier manejo es inadecuado y sus niveles de materia orgánica (MO) son reducidos, iniciándose una espiral descendente que resulta finalmente en una producción de cultivos deteriorada (Figura 1).



**Figura 1.** Espiral descendente de degradación de suelos y su asociación a los niveles de carbono en los suelos (adaptada de Magdoff y van Es, 2009 y Glinsky *et al.*, 2011).

Ante este escenario, Shaxson (2006) señala que la combinación de organismos, materiales orgánicos, agua y nutrientes suficientes en el suelo determinan la continua resurgencia de

actividad biológica. Mantener una buena arquitectura del suelo dependerá de no perderlo y, si se encuentra dañado, de su rápida recuperación.

Limitados a la incorporación de materiales a los suelos, surge cierta confusión al momento de denominarlos como agentes modificadores de las propiedades de los suelos. Sin embargo, Severson y Shacklette (1988) tratan de establecer algunas precisiones en el uso de varios términos (estabilizador, acondicionador, enmienda y fertilizante), pero hasta hoy se mantiene un uso poco diferenciado de ellos. Sugieren que el término estabilizadores se emplee más para describir modificaciones del suelo con propósitos de ingeniería que agronómicos. Si bien tienen una misma connotación, general proponen que se emplee enmienda, en vez de acondicionador, para describir los materiales de origen geológico utilizados en los aspectos agronómicos de modificación del suelo. Precisan que el término acondicionador ha sido empleado extensamente en la literatura agronómica para materiales sintéticos con fines agrícolas, por lo tanto su uso para los materiales geológicos puede dar lugar a cierta confusión. En cuanto a los conceptos de enmienda y fertilizante, señalan que deberían ser empleados de acuerdo con su función pretendida y caracterizar además su modo de acción. Por ejemplo, si la caliza es usada para suministrar Ca como elemento esencial para las plantas, debería ser considerada un fertilizante inorgánico, si su uso se orienta a modificar el pH del suelo debería ser clasificada como una enmienda química y, si se emplea como un agente estructurador del suelo, se denominaría enmienda física.

En literatura más reciente (SSGTC, 2008; Patel *et al.*, 2008) se señala que una enmienda corresponde a un material utilizado para alterar las propiedades químicas o físicas de un suelo y hacerlo más productivo; en general, serían materiales distintos de los fertilizantes e incluirían sustancias de origen orgánico e inorgánico. No obstante, se hace también una distinción entre enmienda y acondicionador de suelo. El primer concepto se refiere a cualquier material (cal, yeso, aserrín, compost, estiércol de animales, residuos de cultivos o acondicionadores sintéticos del suelo) que se incorporan o se aplican en la superficie del suelo para mejorar el crecimiento de las plantas; pueden contener nutrientes, pero el término se refiere comúnmente a la adición de materiales que no sean los que se utilizan principalmente como fertilizantes. Por otra parte, los acondicionadores de suelo corresponderían a un material que mejora apreciablemente los procesos o las características físicas específicas del suelo, para un uso determinado o como un medio de crecimiento de las plantas; se incluye como ejemplos aserrín, turba, compost, polímeros sintéticos y diversos materiales inertes.

A nivel internacional, la EPA (2007) clasifica las enmiendas de acuerdo a su uso en: enmiendas orgánicas de suelo, enmiendas del pH del suelo y en enmiendas minerales de suelo; además de indicar en cada caso su disponibilidad, usos, aceptación pública, costos, ventajas y desventajas (ver Anexo I). Por otra parte, Quilty y Cattle (2011) realizan una selección de las enmiendas orgánicas fabricadas para su utilización agronómica, con el rango de dosis de aplicación propuesto, los costos y beneficios estimados descritos por el proveedor/fabricante (ver Anexo II).

Comparadas con las enmiendas orgánicas, la literatura aborda principalmente los efectos de las enmiendas inorgánicas en las propiedades químicas de los suelos (Currow y Duncan, 2012; Haynes y Naidu, 1998). Más aún, existe relativamente poca evaluación científica de la eficacia de las enmiendas orgánicas en el sector agrícola (Quilty y Cattle, 2011; Diacono y Montemurro, 2010; Körschens, 2006; Munkholm *et al.*, 2002), y menos aún información que aborde su comportamiento en el tiempo, luego de ser aplicadas a los suelos.

A nivel nacional, Hirzel y Salazar (2011) clasifican las enmiendas en subproductos orgánicos de origen animal (guanos, estiércol y purines), lodos del tratamiento de residuos industriales líquidos (lodos de aguas servidas, lodos de industrias, lodos de procesos productivos como pisciculturas, etc.) y subproductos de la industria o actividades productivas (cal de la industria de azúcar, conchas de envasadoras de mariscos, mataderos y otros). Sin embargo, se advierte solo un marco legal parcial que regula la incorporación de todos estos materiales al suelo (INN, 2004; SAG, 2008). En este sentido, se comercializan y utilizan enmiendas como las ya indicadas, pero además se observa un mercado creciente de productos fabricados que muchas veces cuentan con una composición poco clara o no certificada.

Probablemente el componente principal de las enmiendas orgánicas comercializadas lo constituyen las denominadas sustancias húmicas. Si bien su definición es incierta debido a su naturaleza heterogénea, pueden ser clasificadas en 3 grupos principales: ácidos húmicos (solubles solo en ácidos fuertes), ácidos fúlvicos (solubles a todos los valores de pH) y huminas (insolubles a cualquier pH). Comercialmente las sustancias húmicas son extraídas desde materiales tales como MO compostada y vermicompostada, carbón y turba. Imbufe *et al.* (2005) y Brownell *et al.* (1987) informan, por ejemplo, la extracción de sustancias húmicas desde leonardita. Los productos comerciales basados en sustancias húmicas están disponibles tanto en suspensiones líquidas como en forma sólida; las suspensiones son mezcladas con agua y aplicadas al suelo, mientras que los productos granulares son incorporados o aplicados en superficie.

En Chile, investigaciones con estos productos orientadas al análisis de las propiedades físicas han sido realizadas por varios investigadores (Cuevas *et al.*, 2006; Villarroel, 2010; Cortés, 2011; Marín, 2011; Traub, 2011; Fernández, 2013).

Cuevas *et al.* (2006) plantean el análisis de los efectos de la aplicación de lodos urbanos sobre las propiedades físicas de suelos agrícolas, pues varios trabajos a la fecha habían evaluado parámetros como la densidad aparente y la porosidad, demostrándose que, aunque generaban respuestas positivas éstas no eran estables en el tiempo y, por el contrario, muchos de sus efectos eran negativos. Sin embargo, las evaluaciones de los efectos negativos habían sido escasamente evaluadas al aplicar grandes cantidades de lodos al suelo. Otros parámetros físicos del suelo y su influencia por la aplicación de lodos, tales como la resistencia al corte y el coeficiente de precompresión, prácticamente no habían sido estudiados. En ese entonces también comenzaba a plantearse cuestionamientos sobre el uso

de enmiendas orgánicas como alternativas a los abonos naturales debido a la degradación de distintos ecosistemas para su obtención.

Villarroel (2010) evaluó las propiedades físicas de un Ultic Haploxeralf franco arenoso (Santa Cruz, Región de O'Higgins), luego de la aplicación de enmiendas orgánicas en distintos tratamientos. Los resultados arrojaron que el uso de una emulsión orgánica (Aqua Power®) mejoró las condiciones físicas del suelo, aumentando los contenidos de materia orgánica, la estabilidad de agregados, la porosidad gruesa y la velocidad de infiltración. Como consecuencia, aumentó la resistencia al desprendimiento de partículas por el impacto de la gota de lluvia bajo una condición de suelo descepado.

En el caso de Cortés (2011), su estudio se basó en evaluar el efecto estabilizador de distintas enmiendas orgánicas en un huerto de paltos (*Persea americana*) de cuatro años, establecido sobre camellones en un Typic Haplotorrert de la Región de Coquimbo. Se generaron tratamientos de cultivo de cobertura (*Avena sativa*) durante dos años y aplicaciones de ácido húmico, poliamida y compost. Los tratamientos generaron una disminución de la densidad aparente en superficie, en especial cuando se utilizó compost y el cultivo de cobertura. También se determinó un aumento de la porosidad gruesa ( $> 50 \mu\text{m}$ ), favoreciendo un sistema poroso más continuo; además la estabilidad de agregados presentó diferencias estadísticas significativas respecto al testigo cuando se utiliza poliamida y compost. Finalmente, informa un aumento de la conductividad hidráulica con la aplicación de compost, disminuyendo el escurrimiento superficial.

Marín (2011) por su parte, evaluó el efecto estabilizador individual y en conjunto de dos tipos de acondicionadores orgánicos sobre camellones cultivados con mandarina en un Typic Haplotorrert de la Región de Coquimbo. Los tratamientos aplicados fueron ácido húmico, rastrojo de trigo y su combinación. Los tratamientos con ácido húmico fueron los más efectivos, disminuyendo la densidad aparente y la resistencia a la penetración, producto del aumento en la estabilidad de los microagregados y de la porosidad gruesa, lo que se tradujo en una mayor velocidad de infiltración. El rastrojo por sí mismo, si bien presentó variaciones en las propiedades analizadas, fueron de menor magnitud respecto de los tratamientos con ácido húmico; éste reacciona de forma casi inmediata con las partículas del suelo, generando mejoramientos en el corto plazo.

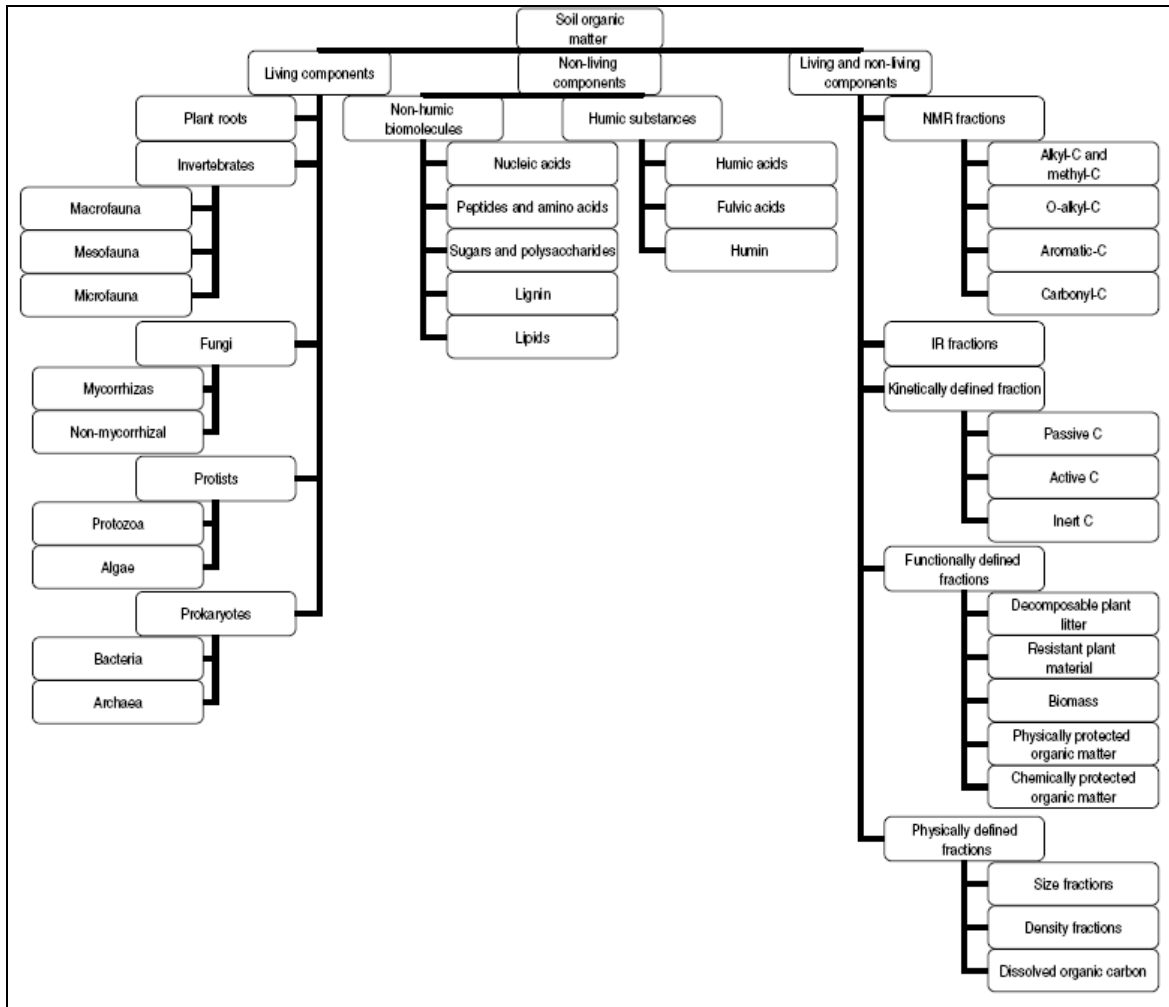
Traub (2011), a diferencia de los anteriores, analizó la efectividad de una emulsión orgánica y/o un mulch (restos de poda y aserrín) en el control de la erosión hídrica y escorrentía en una ladera de cerro cultivada con vid. Evaluó tratamientos como dicha emulsión orgánica, un mulch y su combinación. Se evaluaron tres eventos de precipitación de 10, 29 y 69 mm día<sup>-1</sup>. El mayor efecto de los tratamientos sobre las propiedades físicas del suelo se vio reflejado en la porosidad total y en la estabilidad de agregados del suelo, siendo la combinación de enmienda y mulch el que mostró un efecto significativo. La producción de sedimentos y escorrentía por tratamientos estuvo principalmente regulada por condiciones temporales. Por una parte, los tratamientos que consideraron la aplicación

de mulch ejercieron su mayor efecto en los primeros eventos, disminuyendo éste a través del tiempo, debido a una pérdida de cobertura a lo largo del ensayo. En tanto, la emulsión necesitó de aproximadamente tres meses para provocar su mayor de protección contra la erosión hídrica, observándose el mejor control al final del ensayo.

Finalmente, Fernández (2013) comparó el efecto de dos tipos de enmiendas sobre algunas propiedades físicas y químicas de un suelo plantado con paltos en la Región de Valparaíso. Se analizó el comportamiento del ácido sulfúrico (98%) y ácido húmico, más una condición sin enmiendas y sin paltos. El ácido húmico destacó por el aumento de porosidad gruesa y la retención de agua, junto con la disminución de la resistencia a la penetración, aunque su efecto tendió a desaparecer en el mediano plazo; en tanto que el ácido sulfúrico mejoró el flujo de agua y aire en el suelo, pero en general manifestó discontinuidades en profundidad para el resto de las propiedades físicas. En cuanto al crecimiento de las plantas, se observó un mayor desarrollo en aquellas con aplicación de ácido húmico, duplicando la tasa de elongación de brote en comparación a aquellas con aplicación de ácido sulfúrico.

Un suelo con una buena arquitectura corresponde a aquel cuyo espacio poroso y estabilidad estructural son más propicios para la productividad biológica. Físicamente las tres fases de la naturaleza están representadas en el suelo; la fase sólida constituye la matriz del suelo, la fase líquida se compone de agua en el suelo (que siempre contiene sustancias disueltas de modo que correctamente debería llamarse solución del suelo) y la fase gaseosa que corresponde a la atmósfera del suelo. La matriz sólida del suelo incluye partículas que varían en composición química y mineralógica, así como en tamaño, forma y orientación; también contiene sustancias amorfas, particularmente MO ligada a las partículas minerales que a menudo las une para formar agregados (Figura 2). Las distintas propiedades de la MO en relación con el tamaño de las partículas dominantes en el suelo se presentan en el Anexo III

La organización de los componentes sólidos del suelo determina las características geométricas del espacio poroso que transmite y retiene fluidos (agua y gases). Las proporciones relativas de estas tres fases varían de forma continua y dependen de variables tales como el clima, la vegetación y el manejo.



**Figura 2.** Resumen de fracciones de la materia orgánica del suelo (Hopkins y Gregorich, 2005).

La adición de materiales o enmiendas a este medio no solo tiene efectos sobre la fertilidad de suelos y la nutrición de plantas, sino además puede tener efectos benéficos en la condición física del suelo (Cuadro 1). Este tipo de manejo y otros, determinan cambios en las propiedades físicas e hidráulicas del suelo, que modifican sus características conductivas y de almacenamiento, resultando de extraordinaria relevancia para estimar el uso adecuado o la degradación de este recurso.



**Cuadro 1.** Impactos benéficos y preocupantes de enmiendas orgánicas en el suelo

Propiedad	Efecto benéfico	Efecto preocupante
Biológica	Microorganismos, lombrices, descomposición, producción de humus, disponibilidad de nutrientes, producción de sustancias químicas benéficas (hormonas, aminoácidos, vitaminas, ácidos orgánicos, antibióticos), supresión de fitopatógenos, productividad de cultivos, tasas de respiración, actividad enzimática del suelo.	Liberación de patógenos zoonóticos en el medio ambiente. Liberación de antibióticos y compuestos disruptores endocrinos al ambiente.
Química / Nutricional	Capacidad tampón, capacidad de quelación, capacidad de intercambio iónico, pH, neutralización de suelos ácidos. Suministra micronutrientes (B, Cu, Mn, Mo, Zn, Fe) y macronutrientes (Ca, Mg, K, P, C, N, O, H).	Desbalance de nutrientes; la posibilidad de pérdidas de compuestos de P y N en la escorrentía a aguas superficiales y de lixiviación a subterráneas; liberan gases de efecto invernadero y contribución a lluvia ácida. Acumulación de metales pesados en el suelo.
Física	Agregación, textura, porosidad, densidad aparente, encostramiento, erosión, capacidad de retención de agua, infiltración y percolación de agua, mayor exploración de raíces, etc.	Incrementan el riesgo de flujos preferenciales de contaminantes a los recursos hídricos. Grandes cantidades de material hidrofóbico pueden contribuir a repelencia de agua.

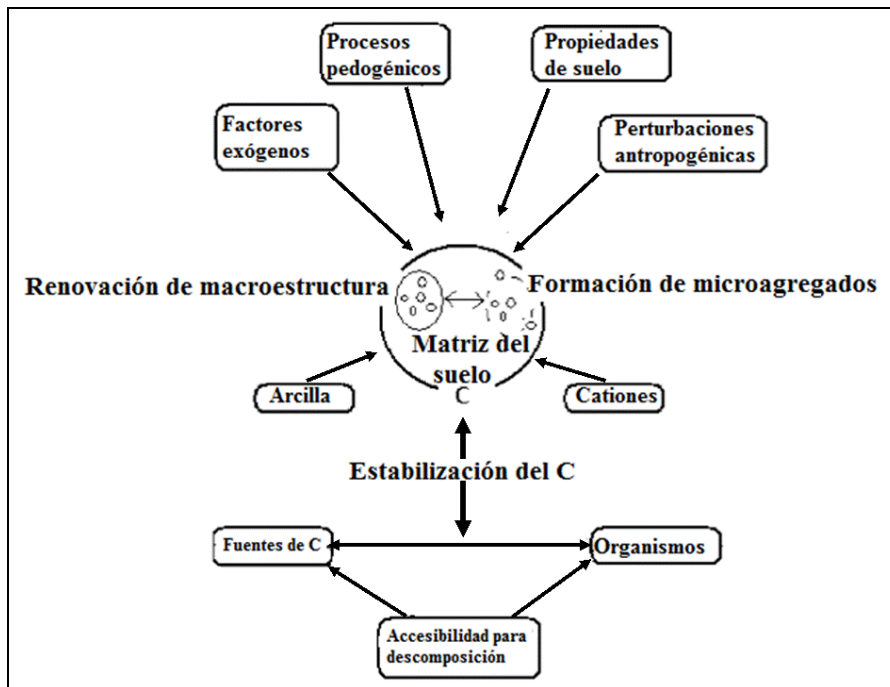
Fuente: Singh *et al.*, 2011; Ohsowski *et al.*, 2012; Goss *et al.*, 2013

La agregación de partículas de suelo se correlaciona estrechamente con el uso de enmiendas orgánicas, pero no hay una comprensión suficientemente completa de cómo se produce. Pagliai *et al.* (2004) observaron que la aplicación de compost y estiércol mejora la porosidad y la agregación del suelo, indicando que estos materiales tienen un rol destacado en prevenir el encostramiento y confirmando que es posible adoptar sistemas de labranza alternativos para evitar la degradación física del suelo, así como también que la incorporación de estos materiales es esencial para mejorar la calidad estructural de éste. No obstante, Bronick y Lal (2005) señalan que es necesaria una mejor comprensión de cómo se forman y estabilizan los agregados, y la forma en que se ven afectados por diferentes manejos agrícolas, a fin de identificar prácticas agrícolas adecuadas para una producción agrícola sostenible.

La estabilidad de agregados representa la habilidad de un suelo para resistir la energía destructiva del agua y mantener los espacios interagregados y la estructura del suelo. Se estima que la importancia de los diferentes agentes de unión varía con las diversas clases de tamaño de agregados (micro y macroagregados). De acuerdo a Blanco-Canqui y Lal (2004), los factores principales en la estabilidad de macroagregados (>250 µm), altamente sensibles al manejo, incluyen fracciones transitorias de MO tales como raíces, hifas de hongos, otras fracciones de C lábil, las poblaciones microbianas y la composición catiónica del complejo de intercambio.

En muchos suelos, tales como Mollisoles y Alfisoles, la depositación y transformación de la MO es el mecanismo dominante de estabilización de agregados, de manera que habría una retroalimentación fuerte entre la dinámica de los agregados y de la MO (Six *et al.*, 1999). En estos suelos, la estructura de agregados es usualmente jerárquica (Tisdall y Oades, 1984; Oades y Waters, 1991) con partículas primarias y agregados tamaño limo ( $< 50 \mu\text{m}$ ) unidos formando microagregados ( $50\text{--}250 \mu\text{m}$ ), de manera que estas estructuras primarias y secundarias a su vez se unen en macroagregados ( $> 250 \mu\text{m}$ ). En otros órdenes de suelo Bronick y Lal (2005) informan otros factores de agregación (ciclos de humedecimiento y desecamiento, arcillas no cristalinas, óxidos, textura, pH, CIC y contenido de agua del suelo, etc.). Tanto la densidad aparente ( $D_a$ ) del suelo como su resistencia a la penetración (RP) han sido asociadas a una buena arquitectura de suelos (Özturk *et al.*, 2005; Reynolds *et al.*, 2002).

Existe evidencia (Six *et al.*, 2004; Tisdall y Oades, 1982) que sugiere que los microagregados se forman dentro de los macroagregados y que los factores que incrementan la tasa de renovación de macroagregados reduce la formación y estabilización de microagregados. Sin embargo, los microagregados y aquellas unidades agregadas menores son generalmente más estables y menos susceptibles al manejo que los macroagregados. Por lo tanto, la formación, estabilización y renovación de agregados ocurre a través de complejas interacciones de procesos físicos, químicos y biológicos (Figura 3)

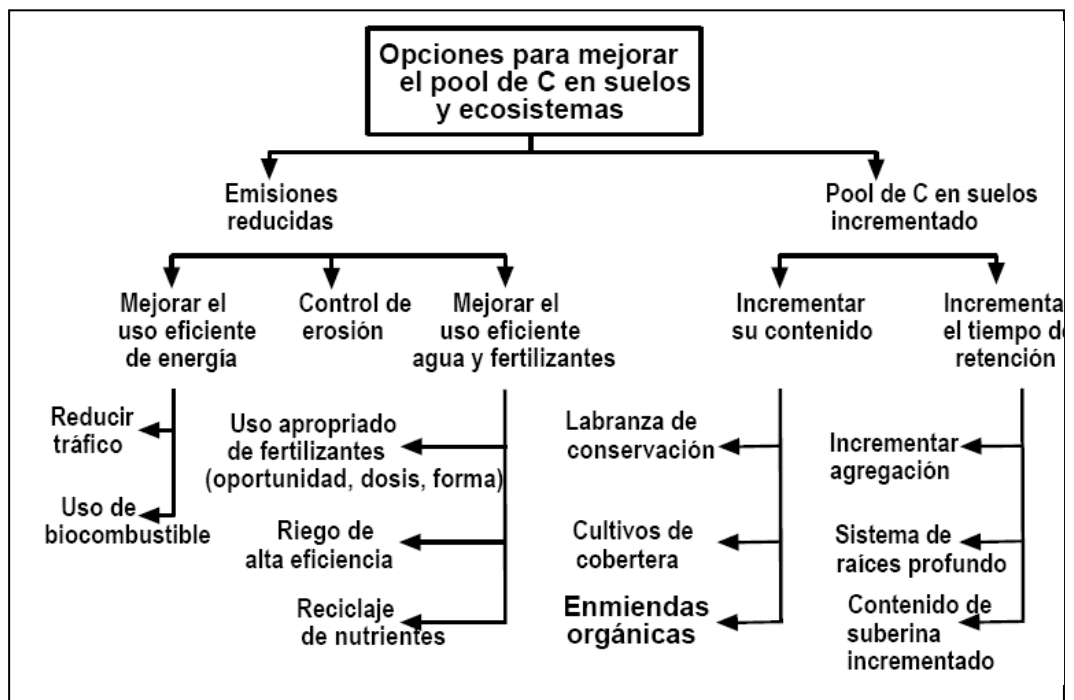


**Figura 3.** Factores que afectan la agregación de suelos (Bronick y Lal, 2005)

Por su propia naturaleza, la jerarquía estructural se relaciona con un ordenamiento del sistema de poros intra e interagregados de diferentes tamaños, aun cuando a menudo son agrupados en distintas clases y acorde a distintos criterios. Así, complementariamente a la clasificación visual de poros usada en morfología de suelos, numerosos otros sistemas han sido ideados, siendo agrupados por Lal y Shukla (2004) en cuanto a tamaño y función de los poros (ver Anexo IV).

Abiven *et al.* (2009) concluyen que experimentos en condiciones controladas, donde se monitoreen las distintas calidades y cantidades de adiciones de MO, parecen ser necesarios para la construcción de un modelo predictivo del comportamiento de las enmiendas en los suelos. Asimismo, señalan que investigaciones sobre una amplia gama de tipos de suelo con diferente textura, mineralogía y niveles de MO son muy necesarias.

Finalmente, cabe destacar que la pérdida histórica de C desde el suelo debida al inapropiado uso de la tierra y a deficientes prácticas de manejo no sólo ha provocado una disminución de la calidad del suelo, sino han incrementado la emisión de C a la atmósfera. Por consiguiente, la selección adecuada y aplicación de enmiendas a los suelos constituye solo una estrategia más, que contribuye a reducir este problema ambiental global (Figura 4). Así, para optimizar estas estrategias de aportes de orgánicos se deben tomar en cuenta las prácticas agrícolas locales asociadas y las condiciones ambientales imperantes.



**Figura 4.** Opciones tecnológicas para mejorar el pool de C pool en suelos y ecosistemas (modificado de Lal, 2002).

### 1.1. **Hipótesis**

Diferentes fuentes de enmiendas orgánicas aplicadas a los suelos presentarán una persistencia distinta en el tiempo como acondicionadores de las propiedades físicas, acorde al tipo de suelo.

## **CAPÍTULO II. EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE TRES SUELOS CONTRASTANTES ACONDICIONADOS CON ENMIENDAS ORGÁNICAS.**

### **1. INTRODUCCIÓN**

La estabilidad de los agregados (EA) y el contenido de materia orgánica (MO) de los suelos, se ven alterados por las actividades agrícolas (Elmholt *et al.*, 2008). Para mitigar los posibles efectos negativos sobre las especies cultivadas, se han utilizado diferentes enmiendas orgánicas, cuyo objetivo es mejorar las condiciones del suelo de manera de asegurar un aumento en la productividad.

Dentro de las características físicas que se ven alteradas con el uso y los ciclos de desecación/humectación, se pueden citar el tamaño y la cantidad de poros, el tamaño de los agregados y la capacidad de retención de agua. Es necesario considerar que la estructura del suelo es dinámica en términos de su geometría y de la cohesión de sus partículas (Kemper *et al.*, 1987), de manera que su análisis entrega información general sobre las condiciones del suelo. Así, tanto una buena estructura para el desarrollo de las raíces como la capacidad para retener agua dependen de la presencia de agregados de 1 a 10 mm y de la presencia de poros mayores a 75 micras de diámetro. No obstante, los poros de los agregados deben ser lo suficientemente gruesos para permitir una rápida infiltración y drenaje (Eynard *et al.*, 2004), pero además deben presentar continuidad en el perfil de suelo.

Los macroagregados son más sensibles a los cambios en el uso de suelo y a las prácticas agrícolas, debido a que al desestabilizarse dan origen a subunidades (microagregados), las que contribuyen a la desecación del suelo (Elmholt *et al.*, 2008; Puget *et al.*, 2000; Tisdall y Oades, 1982).

Se sabe que los agregados tienen diferente comportamiento según sus dimensiones; lo mismo sucede con los poros y la interacción entre poros y agregados, que resulta en la mayor o menor capacidad del suelo para retener y conducir agua, tanto a nivel capilar como a capacidad de campo (Tisdall y Oades, 1982).

Las alteraciones en la condición natural o inicial del suelo, se verán acentuadas de acuerdo al contenido de arcilla; los suelos con un contenido de arcilla entre 20 y 35%, presentan mayor EA que los suelos con menos de 20% (Molina *et al.*, 2001; Chenu *et al.*, 2000).

Considerando que la EA se relaciona fuertemente con el contenido de MO y decrece a medida que aumenta la intensidad de uso del suelo, se han introducido diferentes prácticas

de manejo tendientes al mejoramiento de los suelos, tanto en sus características físicas, como en sus condiciones químicas y biológicas. Es así como la adición de enmiendas orgánicas, por ejemplo, se orienta a favorecer la cohesión dentro de los agregados y a disminuir la velocidad de humectación de éstos, protegiéndolos de la acción destructiva del agua (Chenu *et al.*, 2000). A su vez, los ciclos de humectación y secado producen diferencias en la estructuración de los suelos y en especial en el comportamiento de la EA (Semmel *et al.*, 1990).

La influencia de la enmienda aplicada sobre las propiedades físicas de los suelos depende de la cantidad, tipo y naturaleza de estos materiales. Así, el efecto de ellos dependerá principalmente de los componentes dominantes, comprobándose que la adición de una mezcla de ácidos fúlvicos y húmicos ha sido efectiva en la estabilización de los agregados (Barzegar *et al.*, 2002; Hayes y Clapp, 2001).

Si bien muchas propiedades físicas de los suelos han sido ampliamente estudiadas en cuanto a su comportamiento ante diferentes estímulos, como por ejemplo ante la aplicación de enmiendas orgánicas (Puget *et al.*, 2000; Barzegar *et al.*, 2002; D'Acqui *et al.*, 1998; Rawls *et al.*, 2003; Ellies, 1995), la mayoría de estos estudios no muestra un análisis a través del tiempo que cuantifique la evolución del suelo y la persistencia de los efectos generados por las enmiendas.

Es por esto que se propone evaluar la persistencia en el tiempo de diversos agentes estructurantes orgánicos, a través de la cuantificación de propiedades físicas relevantes, en tres suelos contrastantes de la Región Metropolitana de Santiago, Chile.

## 1.1. Objetivos

### **Objetivo general**

Evaluar la persistencia en el tiempo de diversos agentes estructurantes orgánicos, a través de la cuantificación de propiedades físicas relevantes, en tres suelos contrastantes de la Región Metropolitana de Chile.

### **Objetivos específicos**

- Determinar la magnitud de los cambios en el tiempo de propiedades físicas, tales como resistencia a la penetración, estabilidad de agregados, temperatura, retención de agua y distribución del tamaño de los poros, luego de la aplicación de cuatro enmiendas orgánicas comerciales.
- En base a dichos cambios, estimar la dinámica en el tiempo de las enmiendas orgánicas como estructuradoras de tres suelos contrastantes.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

El presente trabajo fue realizado en las dependencias de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Campus Antumapu, Santiago (33°34' 9,64"S – 70°37'57,87"W). Se llevó a cabo entre los meses de enero y agosto de 2011, completando un período de seis meses entre la aplicación de las enmiendas orgánicas y la última toma de muestras. Los análisis de suelo se realizaron en los laboratorios de Física de Suelos y Química de Suelo y Agua, ambos pertenecientes al Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Los suelos, acondicionados con las distintas enmiendas se seleccionaron en función de sus clases texturales, considerando el contenido de arcilla. Así, de acuerdo con CIREN (1996), las muestras pertenecen taxonómicamente a Series de suelo siguientes:

Serie Rinconada de Lo Vial (RLV): incluye suelos aluviales, estratificados, ligeramente profundos, que se presentan en terrazas planas, con o sin microrelieve del río Mapocho y en los alrededores de la localidad de Maipú. Su horizonte A es de color pardo grisáceo en el matiz 10YR, presentando vetas de color pardo oscuro en la parte inferior; su clase textural es franco arenosa y presenta bloques subangulares finos, débiles. El suelo descansa sobre un fragipán de clase textural arenosa o areno francosa, donde ya no penetran las raíces. Taxonómicamente, pertenece a la Familia franca gruesa, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts.

Serie Mapocho (MPC): son suelos profundos de origen aluvial, que ocupan una posición de terrazas antiguas del río Mapocho. Su horizonte A es pardo oscuro en la superficie y pardo grisáceo oscuro en profundidad, en el matiz 10YR; la clase textural es franco arcillo limosa o arcillo limosa; generalmente con bloques subangulares finos y medios, moderados. De muy buen arraigamiento y muy buena porosidad, se le clasifica como miembro de la Familia limosa fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls.

Serie Rungue (RUG): incluye suelos de origen aluvio coluvial, moderadamente profundos, en posición de plano ligeramente inclinado (piedmont), con un ligero microrelieve. Su horizonte A es de un color negro a pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR intergradando al 10YR; su clase textural es arcillosa y, si bien presenta bloques angulares medios o gruesos, fuertes, cuenta con una macroestructura de cuñas gruesas, producto de condiciones vérticas. Se le clasifica como miembro de la Familia fina, mixta, térmica de los Vertic Haploxerolls.

Por otra parte, el Cuadro 2 incluye una caracterización general de las enmiendas empleadas como acondicionadoras de los suelos.



**Cuadro 2.** Enmiendas comerciales empleadas y sus principales características.

Enmienda	Características
Quick Sol®	Acondicionador físico de suelos, abundante en Si hidrosoluble, que contiene además Ca, Fe, ácido húmico, ácido fúlvico, Na, Cu, Mg, Mn y Zn. Su presentación es líquida
Aquapower®	Acondicionador físico de suelos, complementario a correctores de salinidad. Incompatible con otros productos (fertilizantes o fitosanitarios). Su presentación es líquida.
Pow Humus®	Acondicionador físico y químico de suelos. Complejo concentrado de ácidos húmicos, bioactivo e hidrosoluble, derivado de la leonardita. Su presentación es en gránulos solubles.
Kimelgran®	Acondicionador físico, químico y biológico de suelos. Material granular constituido de ácidos fúlvicos y húmicos. Contiene Si de origen vegetal.

Fuente: elaborado a partir de información disponible en el rotulado del envase.

Una vez elegidos los productos a utilizar se procedió a definir los distintos tratamientos en los diferentes suelos. La cantidad aplicada de cada enmienda corresponde a la dosis recomendada por el fabricante. La conformación de los tratamientos empleados se indica en el Cuadro 3.

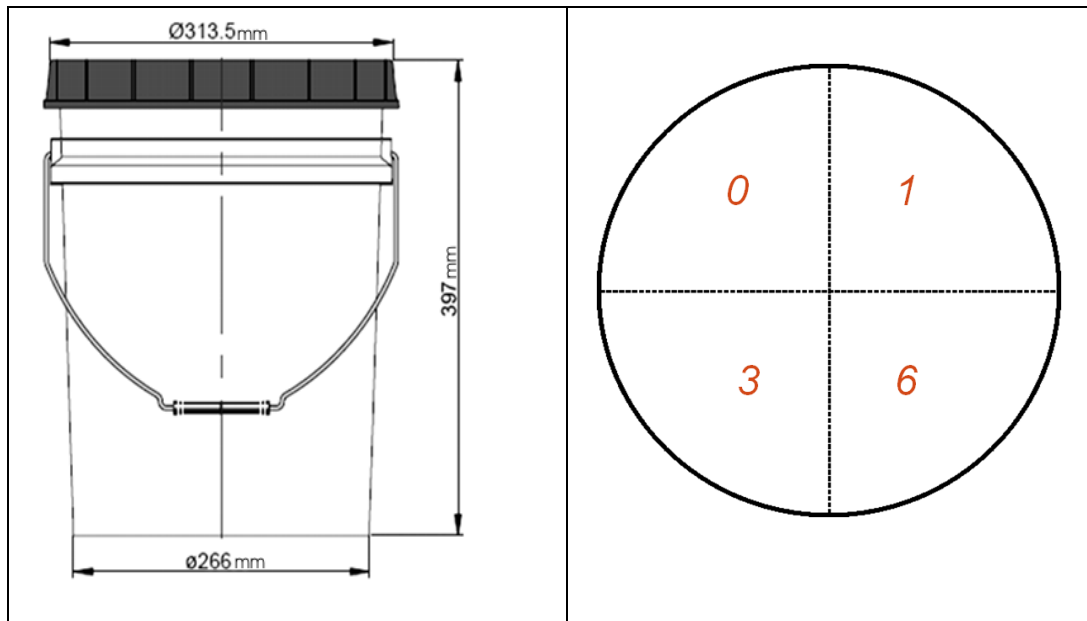
**Cuadro 3.** Denominación de tratamientos de acuerdo al suelo y acondicionador aplicado, indicando la dosis respectiva.

Suelo	Testigo	Quick Sol® 3 L ha <sup>-1</sup>	Aquapower® 10 L ha <sup>-1</sup>	Pow Humus® 10 kg ha <sup>-1</sup>	Kimelgran® 100 kg ha <sup>-1</sup>
Rinconada Lo Vial (RLV)	RLVT	RLVQ	RLVA	RLVP	RLVK
Mapocho (MPC)	MPCT	MPCQ	MPCA	MPCP	MPCK
Rungue (RUG)	RUGT	RUGQ	RUGA	RUGP	RUGK

Los suelos en una condición disturbada, secos al aire y tamizados a tamaños de agregados menores a 20 mm, fueron organizados en 60 contenedores plásticos cilíndricos de 20 L, cada uno de los cuales constituyó la unidad experimental, equivalentes a 15 tratamientos con cuatro repeticiones. Los contenedores fueron divididos en cuatro secciones con láminas metálicas semi rígidas, equivalentes a los cuatro tiempos a evaluar: 0, 1, 3 y 6 meses; esta

división permitió independizar la toma de muestras en los diferentes tiempos a analizar desde la aplicación de las enmiendas (Figura 5).

Una vez determinada la distribución aleatoria de los tratamientos, se procedió a aplicar los acondicionadores con sus respectivas dosis comerciales, con excepción de un testigo por suelo (Cuadro 3). El acondicionador se aplicó disolviendo en 1 L de agua la dosis comercial equivalente, de acuerdo con el área del contenedor, distribuyendo el producto en forma homogénea dentro del mismo. La aplicación de las enmiendas se realizó luego de regar los contenedores hasta alcanzar un contenido de agua equivalente a capacidad de campo.



**Figura 5.** Vista lateral y dimensiones del contenedor (izquierda). Diagrama en planta de división interna de los contenedores (derecha); cada número equivale al tiempo (meses) de evaluación.

Para evitar un nivel freático colgado inducido en la base del contenedor, éste fue perforado, disponiéndose cada uno de ellos sobre una estrata de arena. Además, los contenedores fueron rodeados con una malla Raschell, de modo de procurar una temperatura homogénea durante todo el ensayo.

La distribución de los tratamientos se realizó de manera aleatoria y su disposición se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.** Tratamientos aplicados. Esquema de distribución aleatoria (izquierda) e imagen de su disposición en terreno (derecha). Vista de norte a sur, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Inicialmente se realizó una caracterización básica de los suelos, determinando la granulometría mediante hidrómetro de Bouyocos (Gee y Or, 2002), la densidad aparente con cilindro (Grossman y Reinsch, 2002), la densidad real con picnómetro (Flint y Flint, 2002), la estabilidad de macro agregados a través de un tamizaje en seco y en húmedo (Hartge y Horn, 1992) y la estabilidad de microagregados mediante la relación de

dispersión (Berryman *et al.*, 1982). El contenido de materia orgánica (MO) se determinó según el método de calcinación a 360°C durante 16 h (Sadzawka *et al.*, 2004).

Después de una semana de aplicadas las enmiendas se realizó el primer muestreo de suelo, el que se repitió a los tiempos definidos anteriormente. Para ello se tomaron muestras entre 0 y 20 cm de profundidad, evaluando las propiedades que se indican a continuación:

La MO se midió de acuerdo con Sadzawka *et al.* (2004), la densidad aparente se midió con los métodos del cilindro y del terrón recubierto con parafina sólida (Grossman y Reinsch, 2002). La curva de retención de agua se determinó mediante cama de arena y dispositivos de presión, a partir de la que se derivó la distribución de los poros por tamaño (Dane y Hopmans, 2002; Flint y Flint, 2002). De acuerdo con esto, se considera que los poros de drenaje rápido (PDR,  $\geq 50 \mu\text{m}$ ) son aquellos que se drenan desde saturación hasta -60 hPa, los poros de drenaje lento (PDL) ( $< 50$  a  $10 \mu\text{m}$ ) drenan entre -60 y -330 hPa y la porosidad de agua útil (PAU,  $< 10$  a  $0,2 \mu\text{m}$ ) se estableció entre -330 y -15000 hPa. La retención de agua a -2 y -60 hPa se midió en cama de arena (sand/kaolin box, Eijkelkamp), continuando con las distintas tensiones en olla y plato de presión (Soil Moisture equipment, #700 series).

La estabilidad de microagregados se determinó según la relación de dispersión (Berryman *et al.*, 1982), la estabilidad de macroagregados (Hartge y Horn, 2009) se obtuvo por tamizaje en agitador electromagnético (Retsch, AS200), y tamizaje húmedo en agitador mecánico (autofabricación) con movimiento vertical de 5 cm. Ambas pruebas evalúan la dispersión del suelo en agua, por lo que a menor valor obtenido mayor es la estabilidad de agregados.

La resistencia a la penetración fue medida con penetrómetro Eijelkamp de punta cónica (Koolen y Kuipers, 1983), realizando mediciones con un contenido de agua equivalente a capacidad de campo (24 h después de un riego). La tortuosidad de poros se estableció a través del medidor de flujo de aire, sólo para el primer y último tiempo de medición, utilizando un medidor de flujo por convección (Peth, 2004).

Además, se midió semanalmente la temperatura del suelo con 3 geotermómetros instalados en los testigos y un termómetro digital portátil (Checktemp, modelo HI 98501-1;  $\pm 1^\circ\text{C}$  de precisión y  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  de resolución) en los 10 cm superiores de cada unidad experimental.

Todas las propiedades fueron evaluadas a una profundidad de 0-20 cm en cada unidad experimental, para los períodos establecidos desde la aplicación de los productos, a excepción de la temperatura, que fue registrada semanalmente entre los meses de febrero y agosto de 2011.

## 2.1. Análisis estadístico

Contemplando 4 tiempos de toma de muestras, las unidades experimentales fueron dispuestas en un diseño completamente aleatorizado con estructura factorial, configurado por 15 tratamientos con 4 repeticiones, totalizando 60 contenedores.

Se realizó un análisis de varianza para un nivel de significancia del 5%, prueba de Tukey y diferencia mínima significativa (LSD) con un 95% de confianza para los datos paramétricos; aplicándose LSD para los efectos de enmienda y tiempo por separado, y Tukey para las interacciones. Para los datos no paramétricos se aplicó prueba de los signos de Wilcoxon y Q de Cochran, con un 95% de confianza. Para la aplicación de la prueba Q de Cochran se categorizó cada resultado, considerando como 0 aquellos valores iguales o menores al promedio y 1 los valores mayores a éste.

Se emplearon los softwares estadísticos R versión 2.15.2 ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)) y Minitab® versión 12 ([www.minitab.com](http://www.minitab.com)).

El programa R es de código libre, especialmente diseñado para el análisis estadístico y generación de gráficos de diversa naturaleza, modelos lineales y no lineales, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series de tiempo, clasificación y grupos de datos, etc. Permite manejo de bases de datos más amplias a través de análisis específicos para cada una de las áreas del conocimiento, mediante el uso de librerías y extensiones predeterminadas, pudiendo realizar mejoras según las necesidades de cada usuario.

Por otra parte, Minitab® es un programa diseñado para realizar análisis estadísticos y generar gráficos en ambiente Windows®.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Caracterización inicial

Los resultados de la caracterización inicial de los suelos se presentan en el Cuadro 4 y servirán de referencia para los resultados obtenidos en cada una de las mediciones realizadas que compara la efectividad de las enmiendas aplicadas a lo largo del tiempo.

**Cuadro 4.** Caracterización inicial de tres suelos de Chile central previo al acondicionamiento con enmiendas orgánicas.

<i>Propiedad</i>	<i>Suelo RLV</i>		<i>Suelo MPC</i>		<i>Suelo RUG</i>	
Contenido de arena (%)	65,4	±1,21	42,2	±5,28	31,1	±5,94
Contenido de limo (%)	23,2	±1,58	36,1	±3,39	32,5	±10,44
Contenido de arcilla (%)	11,4	±0,58	21,7	±1,90	36,4	±6,29
Materia orgánica (%)	2,33	±0,06	2,83	±0,10	3,88	±0,59
<sup>1</sup> Dac* (Mg m <sup>-3</sup> )	1,39	±0,04	1,44	±0,07	1,23	±0,03
<sup>2</sup> Dr** (Mg m <sup>-3</sup> )	2,70	±0,01	2,71	±0,02	2,62	±0,06
Poros de drenaje rápido – PDR (%)	16,4	±4,02	9,0	±3,06	12,7	±3,02
Poros de agua útil – PAU (%)	4,2	±2,02	24,5	±8,62	18,0	±2,71
Poros de agua inútil – PAI (%)	7,9	±2,82	12,7	±1,94	23,2	±0,04
Estabilidad de macroagregados - <sup>3</sup> VDMA (mm)	1,11	±0,16	6,30	±1,01	8,85	±1,85
Estabilidad de microagregados – <sup>4</sup> RD	0,44	±0,06	0,67	±0,86	0,23	±0,13

<sup>1</sup>Densidad aparente con cilindro <sup>2</sup>Densidad real <sup>3</sup>Variación del diámetro medio de agregados <sup>4</sup>Relación de dispersión

Se observa que los suelos presentan un gradiente de contenido de arcilla, relacionado a una variación del contenido de materia orgánica (MO) en la misma dirección. Sin embargo, la densidad aparente y los poros (PDR y PAU) responden al manejo, pues los suelos de la Serie Mapocho (MPC) fueron muestreados en una zona de tráfico agrícola, mientras que los otros dos suelos fueron colectados en zonas menos intervenidas. La estabilidad de macroagregados, evaluada a través de la VDMA, presentó una tendencia contraria a lo esperado, ya que a mayor contenido de arcilla y materia orgánica se esperaba una menor VDMA; sin embargo, en este caso primó el efecto de agentes químicos cementantes en la Serie RLV, resultando con la menor VDMA. En cuanto a la estabilidad de microagregados, dado el tráfico y la acción del patinaje sobre el suelo de la Serie MPC, se genera un cierto amasado que destruye los microagregados (Chamen *et al.*, 2003), verificándose una elevada RD.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las propiedades analizadas, basados en las muestras tomadas entre los meses de febrero y agosto de 2011 y que corresponden a cuatro períodos ( $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_3$  y  $t_6$ ), asimilándose cada número al tiempo ( $t$ ) transcurrido en meses desde la aplicación de las enmiendas orgánicas.

### 3.2. Materia orgánica

De acuerdo con los análisis estadísticos, hubo efecto de los tratamientos respecto al contenido de materia orgánica (MO) para todos los suelos estudiados. Debido a que los resultados son no paramétricos, no se indican los promedios ni de las enmiendas ni de los tiempos de muestreo.

El contenido inicial de MO para RLV fue de 2,33%. En este suelo la MO presentó distintas tendencias en sus valores a lo largo del experimento (Cuadro 5), comportándose de manera heterogénea, con alzas y disminuciones asociadas a las mediciones del tercer y sexto mes ( $t_3$  y  $t_6$ ). Al tiempo  $t_3$ , el valor más alto lo presenta RLVT (3,07%), para ir disminuyendo paulatinamente hasta llegar a 1,85% en  $t_6$ ; similar comportamiento se apreció en los tratamientos RLVQ y RLVA. Una situación totalmente opuesta se presentó en los tratamientos RLVP y RLVK, con disminuciones entre  $t_0$  y  $t_3$  (en promedio 2,72% para  $t_0$  y 2,37% para  $t_3$ ), para luego incrementarse al tiempo  $t_6$  (7,26% para RLVP y 3,12% para RLVK).

**Cuadro 5.** Variación del contenido de materia orgánica en el tiempo, de tres suelos de la zona central de Chile acondicionados con enmiendas orgánicas.

<i>Tratamientos</i>	<i>Materia orgánica (%)</i>			
	<i>Tiempo (meses)</i>			
	$t_0$	$t_1$	$t_3$	$t_6$
<i>RLVT</i>	2,4 ±0,4	2,4 ±0,1	3,1 ±0,4	1,8 ±0,4
<i>RLVQ</i>	3,2 ±2,4	2,3 ±0,3	2,8 ±0,5	2,2 ±0,5
<i>RLVA</i>	3,1 ±1,1	1,9 ±0,3	2,7 ±0,5	2,2 ±0,5
<i>RLVP</i>	2,8 ±0,8	2,5 ±0,0	2,4 ±0,4	7,3 ±0,4
<i>RLVK</i>	2,7 ±0,4	2,3 ±0,3	2,2 ±0,2	3,1 ±0,2
<i>MPCT</i>	2,8 ±0,1	2,8 ±0,3	3,3 ±0,6	2,6 ±0,2
<i>MPCQ</i>	3,2 ±0,6	2,8 ±0,0	2,7 ±0,9	2,4 ±0,3
<i>MPCA</i>	2,7 ±0,0	2,8 ±0,2	3,0 ±0,9	2,8 ±0,1
<i>MPCP</i>	2,6 ±0,1	2,8 ±0,3	2,7 ±0,2	2,8 ±0,1
<i>MPCK</i>	2,4 ±0,3	2,8 ±0,2	3,0 ±0,4	2,8 ±0,2
<i>RUGT</i>	3,7 ±0,3	3,7 ±0,3	4,4 ±0,7	6,2 ±3,8
<i>RUGQ</i>	4,2 ±1,0	3,8 ±0,0	4,6 ±0,4	5,6 ±2,9
<i>RUGA</i>	4,8 ±0,5	3,5 ±0,2	4,5 ±0,5	3,0 ±0,5
<i>RUGP</i>	3,9 ±0,9	4,4 ±1,9	4,1 ±0,4	3,4 ±0,6
<i>RUGK</i>	4,3 ±0,7	5,0 ±0,3	3,9 ±0,4	3,9 ±0,3

En el caso del suelo Mapocho (MPC), se tiene que estadísticamente tampoco presentó efectos en la aplicación de enmiendas orgánicas. En el Cuadro 5 se aprecia que los tratamientos aplicados tampoco presentaron variaciones significativas respecto de las mediciones ( $t_0$  a  $t_6$ ), con un valor original de 2,83%. El único tratamiento que mostró una leve alza es el testigo (MPCT) con 3,30% al tiempo  $t_3$ , no superado por los demás tratamientos, para luego descender hasta 2,60%, valor que se sitúa bajo el original para este

suelo. En el caso de MPCQ, se apreció un leve aumento por sobre el contenido original en  $t_0$  (3,19%) para descender de manera constante hasta llegar a 2,35% en  $t_6$ . El tratamiento MPCP no superó el valor original, manteniéndose durante la duración del ensayo bajo este punto (2,71% en promedio desde  $t_0$  a  $t_6$ )

Con respecto al suelo Rungue, estadísticamente tampoco hubo efecto de los tratamientos sobre el contenido de MO. Las fluctuaciones en el contenido de MO para esta Serie, siguiendo la tendencia de la Serie RLV, son heterogéneas, donde no se apreció una tendencia clara entre los diferentes tratamientos. Sin embargo, los tratamientos RUGT y RUGQ presentaron una tendencia a aumentar en forma constante el contenido de MO, alcanzando RUGT un nivel de 6,16% en  $t_6$ . Por otra parte, los tratamientos RUGP y RUGA, presentaron situaciones disímiles, con cambios importantes hasta  $t_1$ , para luego descender a niveles inferiores al valor original (3,44% y 3,03% respectivamente). Una situación especial es la que sucede con RUGK, que se mantuvo estable a través del tiempo, en niveles similares al del original (3,94 % promedio, comparado con un 3,88% original).

### 3.3. Densidad aparente

Para el caso de la densidad aparente evaluada por el método del cilindro (Dac), estadísticamente sólo se apreciaron efectos del tiempo en los tratamientos aplicados en los suelos RLV y RUG. En el Cuadro 6 se muestra la variación a través del tiempo para cada uno de los tratamientos analizados.

**Cuadro 6.** Evolución en el tiempo de la densidad aparente, determinada con cilindro, de tres suelos de la zona central de Chile acondicionados con enmiendas orgánicas.

Tratamientos	Densidad aparente ( $Mg\ m^{-3}$ )							
	Tiempo (meses)							
	$t_0$		$t_1$		$t_3$		$t_6$	
<i>RLVT</i>	1,31	$\pm 0,07$	1,32	$\pm 0,03$	1,38	$\pm 0,06$	1,41	$\pm 0,02$
<i>RLVQ</i>	1,31	$\pm 0,06$	1,30	$\pm 0,04$	1,29	$\pm 0,06$	1,42	$\pm 0,06$
<i>RLVA</i>	1,29	$\pm 0,05$	1,32	$\pm 0,04$	1,36	$\pm 0,07$	1,30	$\pm 0,03$
<i>RLVP</i>	1,33	$\pm 0,05$	1,32	$\pm 0,06$	1,37	$\pm 0,03$	1,40	$\pm 0,13$
<i>RLVK</i>	1,24	$\pm 0,11$	1,27	$\pm 0,06$	1,25	$\pm 0,06$	1,39	$\pm 0,06$
<i>Promedio</i>	1,30	$\pm 0,04$ B	1,31	$\pm 0,02$ B	1,33	$\pm 0,06$ B	1,38	$\pm 0,05$ A
<i>RUGT</i>	1,15	$\pm 0,12$	1,18	$\pm 0,14$	1,13	$\pm 0,05$	1,36	$\pm 0,10$
<i>RUGQ</i>	1,11	$\pm 0,02$	1,11	$\pm 0,07$	1,14	$\pm 0,07$	1,30	$\pm 0,07$
<i>RUGA</i>	1,18	$\pm 0,03$	1,11	$\pm 0,14$	1,21	$\pm 0,12$	1,29	$\pm 0,03$
<i>RUGP</i>	1,09	$\pm 0,07$	1,10	$\pm 0,15$	1,09	$\pm 0,07$	1,27	$\pm 0,06$
<i>RUGK</i>	1,14	$\pm 0,09$	1,15	$\pm 0,15$	1,13	$\pm 0,11$	1,23	$\pm 0,10$
<i>Promedio</i>	1,13	$\pm 0,04$ B	1,13	$\pm 0,03$ B	1,14	$\pm 0,04$ B	1,29	$\pm 0,05$ A

Letras distintas indican diferencias significativas entre columnas a través del tiempo, para una misma Serie de suelo (LSD con  $\alpha \leq 0,05$ )



La variación de la Dac en la Serie RLV se caracterizó por presentar un aumento sostenido a partir de  $t_1$  en todas las enmiendas, manteniéndose ligeramente por debajo de los valores del testigo (RLVT), en especial RLVK y RLVQ hasta  $t_3$ ; a diferencia de los otros tratamientos, RLVA disminuyó a partir del  $t_3$ .

Para la Serie RUG, los valores de Dac en todos los tratamientos fueron constantes, y sólo al final del período de evaluación aumentaron ligeramente.

La variación de Dac en MPC (Cuadro 7) estadísticamente mostró efecto de los tratamientos a través de la interacción entre el tiempo y las enmiendas, lo que explica el comportamiento heterogéneo de los tratamientos; aún así, la tendencia es a aumentar la Dac con valores por sobre el testigo (MPCT), aunque en  $t_6$  las enmiendas resultaron en valores iguales o menores a éste. El valor máximo se alcanzó entre  $t_3$  y  $t_6$  para todas las enmiendas, con valores cercanos a  $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ ; se mantuvo sobre el testigo, para posteriormente en  $t_6$  estabilizarse en valores cercanos a éste.

A pesar de existir efectos de los tratamientos aplicados al suelo Mapocho, ambos factores estarían explicando sólo un 17% de la efectividad, remitiendo el mayor valor al tiempo, que justificaría los cambios experimentados por este suelo en un 37%. Se observó que Kimelgran® y Quick Sol® son las enmiendas que se mantuvieron más estables a lo largo del tiempo. Por otra parte, Aqua Power® y Pow Humus® mostraron aumentos en la Dac de MPC, con una estabilización hacia  $t_3$ , siendo estos tratamientos (MPCA y MPCP) los que presentarían una mayor consolidación.

**Cuadro 7.** Evolución en el tiempo de la densidad aparente con cilindro del suelo Mapocho.

FACTORES		R <sup>2</sup>		PROMEDIO	
Tiempo (t) <sup>*</sup>		0,37			
	t <sub>0</sub>			1,28	
	t <sub>1</sub>			1,31	
	t <sub>3</sub>			1,38	
	t <sub>6</sub>			1,45	
Enmiendas <sup>ns</sup>		0,04			
	Testigo			1,33	
	Quick Sol®			1,35	
	Aqua Power®			1,34	
	Pow Humus®			1,38	
	Kimelgran®			1,37	
INTERACCIÓN				R <sup>2</sup> = 0,17	
Enmiendas	Tiempo				
Testigo	t <sub>0</sub>	1,26	±0,06	A	a
	t <sub>1</sub>	1,29	±0,05	AB	a
	t <sub>3</sub>	1,30	±0,09	A	a
	t <sub>6</sub>	1,48	±0,06	A	b
Quick Sol®	t <sub>0</sub>	1,31	±0,06	A	a
	t <sub>1</sub>	1,32	±0,14	AB	a
	t <sub>3</sub>	1,39	±0,08	AB	a
	t <sub>6</sub>	1,39	±0,03	A	a
Aqua Power®	t <sub>0</sub>	1,30	±0,11	A	ab
	t <sub>1</sub>	1,20	±0,14	A	a
	t <sub>3</sub>	1,39	±0,08	AB	bc
	t <sub>6</sub>	1,47	±0,02	A	c
Pow Humus®	t <sub>0</sub>	1,24	±0,08	A	a
	t <sub>1</sub>	1,38	±0,03	B	ab
	t <sub>3</sub>	1,46	±0,11	B	b
	t <sub>6</sub>	1,46	±0,04	A	b
Kimelgran®	t <sub>0</sub>	1,32	±0,08	A	a
	t <sub>1</sub>	1,38	±0,06	B	a
	t <sub>3</sub>	1,37	±0,02	AB	a
	t <sub>6</sub>	1,43	±0,05	A	a

\*: Existen diferencias significativas. ns: no significativo. Letras mayúsculas diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el factor tiempo, dentro de cada factor enmienda. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el factor enmienda dentro de cada nivel de cada factor tiempo. Test de Tukey.

Al analizar los cambios de Dac en función del tiempo (Figura 7), se observa que en el caso del suelo RUG, con excepción de RUGA, las enmiendas presentaron valores de Dac menores al testigo en todo el período del ensayo, destacando RUGP con los valores más bajos. El incremento de la Dac en este suelo se presentó desfasado con relación a los otros (Figura 7a y 7c), manteniéndose estable hasta t<sub>3</sub> e incrementándose posteriormente (Figura 7e). Los tratamientos presentaron cierto grado de homogeneidad, sobre todo si se toma en

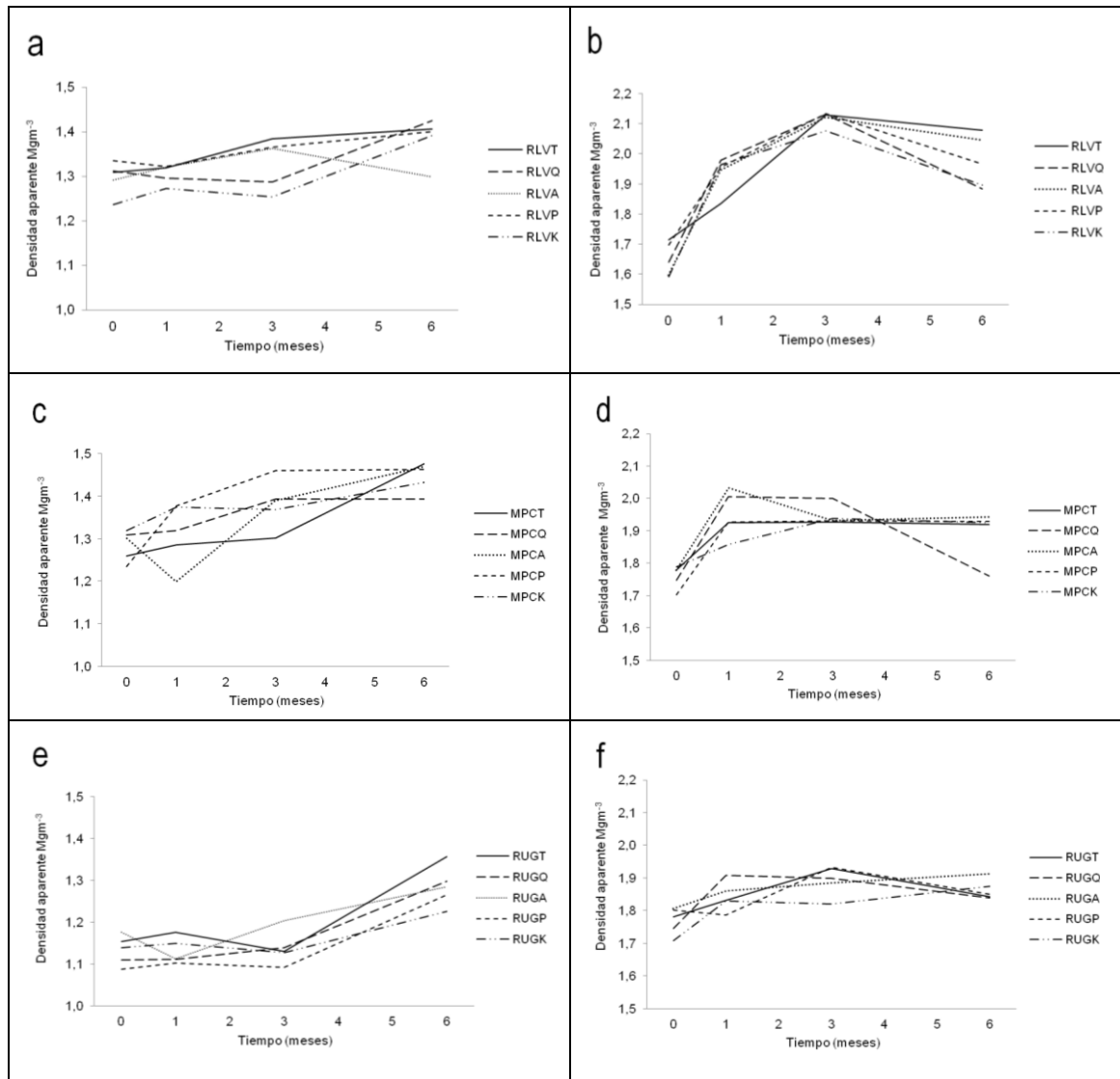
cuenta que sus valores en general se mantuvieron bajo el testigo (RUGT). Si se observa el comportamiento de RUGT, se aprecia que la *Dac* descendió hacia  $t_3$  ( $1,13 \text{ Mg m}^{-3}$ ) para aumentar hacia  $t_6$ , con  $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ , valor que no fue superado por ninguna de las enmiendas aplicadas evaluadas en  $t_6$ ; por otra parte, sólo RUGA superó al testigo con un *Dac* de  $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$  en el tiempo  $t_3$ .

La evolución en el tiempo de *Dac* y *Dat* (Figura 7) indica que esta última presentó efectos estadísticos significativos para los tratamientos, pero sus datos son no paramétricos, siendo analizados con *Q* de Cochran.

El suelo RLV (Figura 7*b*) tuvo un incremento fuerte de *Dat* hacia  $t_3$  ( $2,08$  a  $2,13 \text{ Mg m}^{-3}$ ), para luego descender en  $t_6$ . El comportamiento de las enmiendas a lo largo del tiempo fue relativamente homogéneo, aumentando paulatinamente hasta  $t_3$ , diferenciándose hacia  $t_6$  en el descenso de sus valores por debajo del testigo (RLVT), con un valor de  $2,08 \text{ Mg m}^{-3}$ .

En cuanto al suelo MPC (Figura 7*d*), el testigo MPCT presentó una *Dat* estable a partir del primer mes ( $t_1$ ). Por su parte, el comportamiento de las enmiendas es irregular, con valores indistintamente por sobre y por debajo del testigo, destacando MPCQ, con un aumento de  $t_0$  a  $t_1$  ( $1,75$  a  $2,01 \text{ Mg m}^{-3}$ ) estabilizándose en  $2,00 \text{ Mg m}^{-3}$  ( $t_3$ ) y descendiendo hasta  $1,76 \text{ Mg m}^{-3}$  ( $t_6$ ). Los otros tratamientos (MPCA, MPCP y MPCK) se mantuvieron relativamente estables, cercanos a los niveles de MPCT al final del ensayo ( $1,92 \text{ Mg m}^{-3}$ ).

Para RUG, a diferencia de los suelos con menor contenido de arcilla, los valores de *Dat* son estables, teniendo un ligero incremento en el tiempo. El único tratamiento que presentó valores y comportamientos cercanos al testigo fue RUGP. A su vez, el único tratamiento que se presentó relativamente estable fue RUGA, el que a partir de  $t_1$  ( $1,86 \text{ Mg m}^{-3}$ ) presentó un aumento constante hasta llegar a un valor de  $1,91 \text{ Mg m}^{-3}$  en el tiempo  $t_6$ .

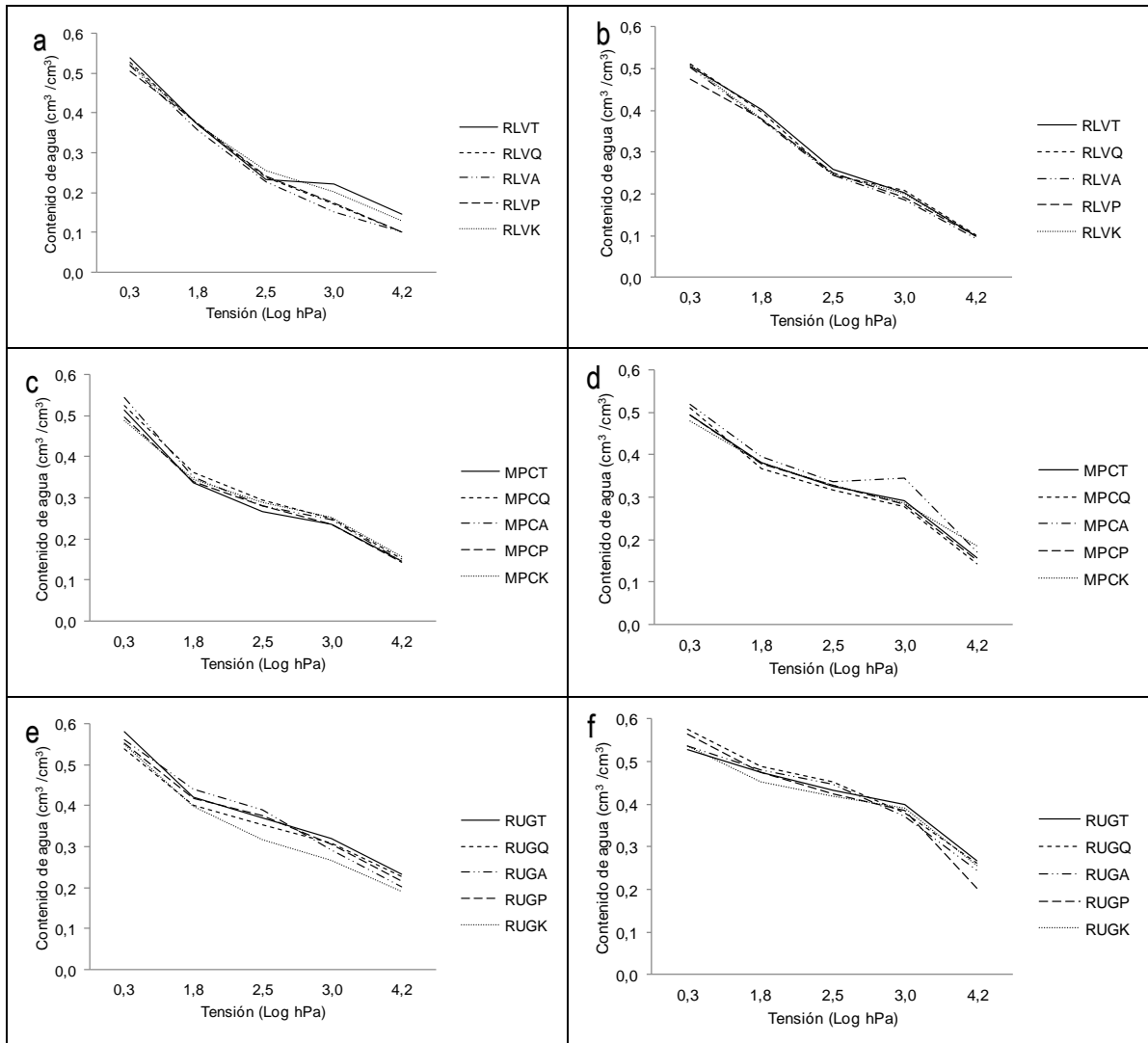


**Figura 7.** Variación en tiempo de la densidad aparente con cilindro (izquierda) y terrón (derecha) de tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con cuatro enmiendas.

### 3.4. Retención de agua y distribución de poros por tamaño

#### 3.4.1. Retención de agua

En la Figura 8 se presentan las curvas características de los suelos acondicionados con las diferentes enmiendas, al inicio y final del ensayo ( $t_0$  y  $t_6$ )



**Figura 8.** Variación en el tiempo de la curva de retención de agua de tres suelos de la zona central de Chile a los tiempos  $t_0$  (izquierda) y  $t_6$  (derecha) acondicionados con enmiendas.

En general para los suelos con mayor contenido de arcilla los tratamientos se diferencian del testigo, a los distintos tiempos de medición.

Particularmente, RLV presentó inicialmente ( $t_0$ ) diferencias a  $pF > 2,5$  (33 kPa), pero a  $t_6$  éstas desaparecieron.

Al  $t_0$ , los valores promedios más bajos corresponden a la enmienda Kimelgran® para RUG y Pow Humus® en RLV. Ello respondería a una relación entre la composición de la enmienda con el tipo de suelo.

Respecto de la retención de agua para el suelo MPC, sus valores se presentaron cercanos a los del testigo en  $t_0$ , situación que cambió para la medición de  $t_6$ , donde los tratamientos superaron los valores del testigo (MPCT).

Para tiempos intermedios ( $t_3$ , por ejemplo) no hubo mayores variaciones en la retención de agua de un mismo suelo con las distintas enmiendas (Apéndice II.1), observándose valores cercanos al testigo (RLVT 3, MPCT 3 y RUGT 3). Esta situación se presenta a la inversa de las demás propiedades, donde la mayor variación y valores máximos de las propiedades se da al tercer mes de aplicadas las enmiendas. Si bien los valores fueron levemente superiores que en los meses anteriores, no hubo mayores diferencias respecto del testigo.

Al  $t_6$ , destaca Pow Humus® en MPC y RUG, con mayor retención de agua en todo el rango de tensiones y con una mayor pendiente entre saturación y tensión máxima, respectivamente. No obstante, el suelo RUG fue el que presentó la mayor variación de retención de agua del inicio a tiempos intermedios (Apéndice II.1), especialmente a tensiones altas. Asimismo, a tensiones menores todas las enmiendas presentan valores similares sobre el testigo al  $t_0$  y por debajo de éste al  $t_6$  (RUGT) hasta  $pF 2,5$  (capacidad de campo, CC). Este mayor diferencial debiese verse reflejado en una mayor cantidad de poros en todo el rango de tamaños.

### 3.4.2. Distribución de tamaño de poros

#### 3.4.2.1. Poros de drenaje rápido (PDR)

Se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en los PDR acorde a las enmiendas aplicadas y al tiempo transcurrido (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Evolución en el tiempo de los poros de drenaje rápido de tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas orgánicas.

Trat.	Poros de drenaje rápido ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )										
	Tiempo (meses)										
	$t_0$	$t_1$	$t_3$	$t_6$	Promedio						
RLVT	0,169	$\pm 0,038$	0,163	$\pm 0,028$	0,135	$\pm 0,010$	0,102	$\pm 0,019$	0,142	$\pm 0,030$	bc
RLVQ	0,157	$\pm 0,033$	0,200	$\pm 0,022$	0,157	$\pm 0,036$	0,114	$\pm 0,030$	0,157	$\pm 0,035$	ab
RLVA	0,165	$\pm 0,020$	0,136	$\pm 0,059$	0,168	$\pm 0,025$	0,126	$\pm 0,013$	0,149	$\pm 0,021$	abc
RLVP	0,132	$\pm 0,028$	0,149	$\pm 0,012$	0,153	$\pm 0,015$	0,094	$\pm 0,020$	0,132	$\pm 0,027$	c
RLVK	0,150	$\pm 0,032$	0,197	$\pm 0,035$	0,177	$\pm 0,021$	0,128	$\pm 0,035$	0,163	$\pm 0,026$	a
Prom.	0,155	$\pm 0,015$ A	0,169	$\pm 0,029$ A	0,158	$\pm 0,016$ A	0,113	$\pm 0,015$ B			
MPCT	0,175	$\pm 0,010$	0,161	$\pm 0,016$	0,165	$\pm 0,020$	0,112	$\pm 0,017$	0,153	$\pm 0,028$	ab
MPCQ	0,162	$\pm 0,019$	0,186	$\pm 0,037$	0,159	$\pm 0,010$	0,142	$\pm 0,022$	0,162	$\pm 0,018$	a
MPCA	0,193	$\pm 0,038$	0,184	$\pm 0,022$	0,146	$\pm 0,040$	0,124	$\pm 0,034$	0,161	$\pm 0,057$	a
MPCP	0,159	$\pm 0,026$	0,150	$\pm 0,022$	0,133	$\pm 0,041$	0,113	$\pm 0,023$	0,139	$\pm 0,022$	b
MPCK	0,144	$\pm 0,025$	0,159	$\pm 0,023$	0,147	$\pm 0,010$	0,100	$\pm 0,018$	0,137	$\pm 0,026$	b
Prom.	0,166	$\pm 0,018$ A	0,168	$\pm 0,016$ A	0,150	$\pm 0,013$ B	0,118	$\pm 0,016$ C			
RUGT	0,159	$\pm 0,038$	0,173	$\pm 0,033$	0,170	$\pm 0,032$	0,054	$\pm 0,016$	0,139	$\pm 0,057$	ns
RUGQ	0,136	$\pm 0,016$	0,158	$\pm 0,024$	0,184	$\pm 0,033$	0,085	$\pm 0,027$	0,146	$\pm 0,046$	ns
RUGA	0,121	$\pm 0,023$	0,152	$\pm 0,045$	0,147	$\pm 0,059$	0,056	$\pm 0,019$	0,119	$\pm 0,044$	ns
RUGP	0,134	$\pm 0,047$	0,139	$\pm 0,036$	0,184	$\pm 0,035$	0,091	$\pm 0,022$	0,137	$\pm 0,038$	ns
RUGK	0,134	$\pm 0,028$	0,156	$\pm 0,023$	0,149	$\pm 0,037$	0,084	$\pm 0,038$	0,137	$\pm 0,035$	ns
Prom.	0,137	$\pm 0,014$ B	0,156	$\pm 0,012$ AB	0,167	$\pm 0,018$ A	0,074	$\pm 0,018$ C			

Letras minúsculas distintas en cada fila indican diferencias significativas para cada enmienda (LSD con  $\alpha \leq 0,05$ ). Letras mayúsculas distintas en cada columna indican diferencias significativas a través del tiempo (LSD con  $\alpha \leq 0,05$ ). No se observó efecto enmienda en suelo Rungue.

Para MPC, destacan Quick Sol® en el corto plazo ( $t_0$  y  $t_1$ ) y Kimelgran® en un plazo mayor ( $t_1$  a  $t_6$ ), demostrando su acción diferencial en el tiempo, en que existe una disminución de los PDR hacia  $t_6$ , siendo estadísticamente significativas sus diferencias, aunque Pow Humus® y Kimelgran® presentan alzas entre los tiempos  $t_1$  y  $t_3$ . En general, el efecto tiempo decrece hacia finales del ensayo, implicando una disminución de los PDR independiente de la enmienda que se aplique.

Para RLV, destaca RLVA en el corto plazo y RLVK en el promedio de todo el período evaluado. En el tiempo, los PDR se mantienen estables hasta  $t_3$ , disminuyendo significativamente hacia  $t_6$ .

Para RUG, no hubo efecto de las enmiendas sobre los PDR, pero sí se apreciaron efectos significativos a través del tiempo, con un aumento sostenido entre  $t_0$  y  $t_3$ , con su peak en  $t_3$ , disminuyendo fuertemente en  $t_6$ .

En general, se estima que todos los suelos presentaron un colapso de los PDR hacia el tiempo  $t_6$ , pero esa condición fue inherente a los suelos, independiente de las enmiendas, ya que los testigos también cayeron. La magnitud de PDR no tuvo relación con la clase textural, ya que este tamaño de poros se asocia más a la estructura.

#### 3.4.2.2. Poros de drenaje lento (PDL)

Estadísticamente no se apreció efecto de los tratamientos a través del tiempo en los suelos MPC; se observaron leves variaciones en el suelo RUG, que se incluyen en Cuadro 9 ( $p = 0,003$ ), apreciándose también que no hubo diferencias en el mediano plazo ( $t_0$  a  $t_3$ ) en el contenido de PDL, el que descendió hacia  $t_6$ . Para RLV se observó efecto significativo, pero sus datos son no paramétricos.

**Cuadro 9.** Evolución en el tiempo de los poros de drenaje lento de la Serie RUG.

Tratamientos	Poros de drenaje lento ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )							
	Tiempo (meses)							
	$t_0$	$t_1$	$t_3$	$t_6$	$t_0$	$t_1$	$t_3$	$t_6$
RUGT	0,053	$\pm 0,018$	0,041	$\pm 0,012$	0,058	$\pm 0,007$	0,043	$\pm 0,008$
RUGQ	0,049	$\pm 0,010$	0,065	$\pm 0,014$	0,056	$\pm 0,011$	0,038	$\pm 0,006$
RUGA	0,052	$\pm 0,025$	0,051	$\pm 0,014$	0,058	$\pm 0,012$	0,035	$\pm 0,011$
RUGP	0,040	$\pm 0,014$	0,057	$\pm 0,018$	0,060	$\pm 0,008$	0,052	$\pm 0,006$
RUGK	0,066	$\pm 0,023$	0,058	$\pm 0,024$	0,047	$\pm 0,007$	0,033	$\pm 0,009$
Promedio	0,052	$\pm 0,009$ A	0,055	$\pm 0,097$ A	0,056	$\pm 0,005$ A	0,040	$\pm 0,007$ B

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas a través del tiempo (LSD con  $\alpha \leq 0,05$ )

Sin considerar los resultados estadísticos, se aprecia que RUGK inicialmente mostró niveles levemente superiores al testigo, pero esas diferencias desaparecieron rápidamente como consecuencia de un descenso continuo en el tiempo de los PDL en RUGK.

En el Apéndice I.1 se encuentran los datos que complementan el Cuadro 9 y que corresponden a RLV y MPC.

#### 3.4.2.3. Poros de agua útil (PAU)

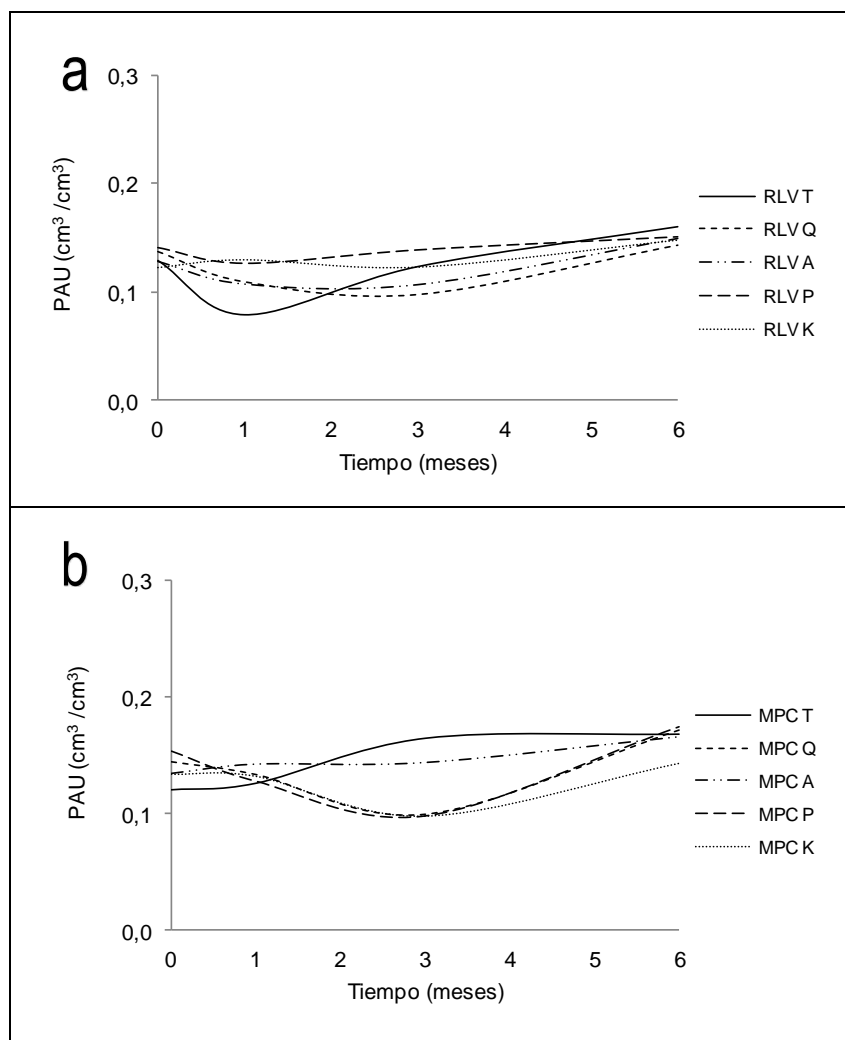
Los efectos en el contenido de agua útil (PAU, corresponde al agua retenida entre tensiones de 33 y 1500 kPa) se observaron sólo en los suelos de la Serie RLV y MPC (Q de Cochran,



$p= 9,00$  y  $19,2$  respectivamente), descartándose efectos del presente ensayo para RUG (Apéndice II.2.1).

Para RLV, los efectos se ilustran en las Figura 9a donde se puede apreciar que a partir de  $t_3$  hubo un aumento en el contenido de agua para los PAU en los diferentes tratamientos, manteniéndose por debajo del testigo (RLVT), a excepción de RLVP, que prácticamente no presentó variaciones a través del tiempo.

Por su parte, RLVA y RLVQ presentaron comportamientos similares, con una disminución del contenido de agua hasta los tres meses (de  $0,13$  y  $0,14$  en  $t_0$ , hasta  $0,11$  y  $0,11$   $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  en  $t_3$ , respectivamente) que, como ya se ha visto, resulta ser una constante en el tiempo de acción en las diferentes propiedades físicas analizadas en el presente ensayo.

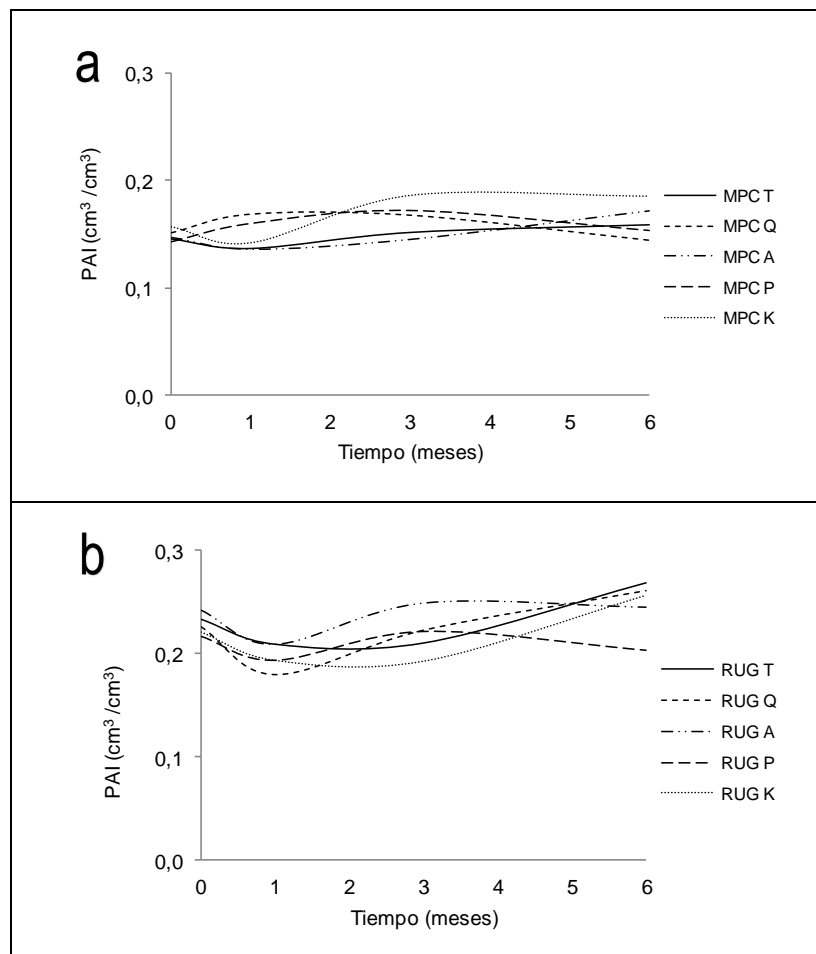


**Figura 9.** Evolución en el tiempo de los poros de agua útil (PAU), para los suelos RLV (9a) y MPC (9b).

En cuanto a los tratamientos de MPC, desde  $t_1$  se mantienen por debajo del testigo para estabilizarse hacia  $t_6$  inmediatamente sobre el testigo. Destacan aquí MPCQ y MPCP, que presentó valores iniciales por sobre el testigo en  $t_0$  para descender hacia  $t_6$ . MPCK es quien mostró un comportamiento distinto al testigo y los demás tratamientos, manteniéndose por debajo de la tendencia a partir de  $t_3$ , tal como se aprecia en la Figura 9 *b*.

#### 3.4.2.4. Poros de agua inútil (PAI)

Los poros de agua inútil (PAI), se asumen equivalentes al agua retenida en la porosidad ultra fina, a la cual la planta prácticamente no tiene acceso por motivos físicos. En general, no se esperaban resultados en este rango de tamaño, como ocurrió en RLV (Apéndice II.2.2), pero el análisis estadístico en MPC y RUG mostró efectos significativos en los tratamientos ( $Q=6,0$ ), tal como se aprecia en la Figura 10.



**Figura 10.** Evolución en el tiempo de los poros de agua inútil (PAI) del suelo perteneciente a las series MPC (10a) y RUG (10b).

Se observa en la Figura 10a un comportamiento heterogéneo en los tratamientos aplicados en MPC, siendo MPCQ y MPCP, quienes se muestran de manera ascendente entre  $t_0$  y  $t_3$  para descender hacia  $t_6$  a niveles bajo el testigo ( $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Al contrario, MPCA se desplaza a lo largo del tiempo en niveles cercanos al testigo con una conducta similar a este. Por último, MPCK mostró un descenso entre  $t_0$  ( $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) y  $t_1$  ( $0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) para ascender y mantenerse por sobre todos los tratamientos, hasta  $t_6$  ( $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

Para RUG, también se aprecia un comportamiento heterogéneo de los tratamientos, siendo RUGK quien se comporta de manera similar al testigo y siempre por debajo de este. Como se observa en la Figura 10b todos los tratamientos descienden entre  $t_0$  y  $t_1$  y tal como es la tendencia general éstos varían a partir de  $t_3$ . Hacia  $t_6$ , RUGP ( $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) desciende por debajo del testigo ( $0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

Respondiendo a los contenidos de arcilla, se presentaron rangos de PAI entre 0,14 y  $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para MPC y entre 0,18 y  $0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para RUG, con un comportamiento homogéneo para los tratamientos aplicados en RLV, situación esperable en suelos de clase textural franco arenosa, sin efectos prácticos en el comportamiento del agua aprovechable (Apéndice II.2.2).

### 3.5. Estabilidad de agregados

#### 3.5.1. Estabilidad de macroagregados (VDMA)

En esta propiedad, expresada a través de la variación en el diámetro medio de agregados (VDMA), sólo se observaron efectos estadísticamente significativos en el tiempo en los suelos MPC y RLV (Cuadro 10). RUG presentó resultados no paramétricos con efectos significativos con  $Q = 21,43$ .

**Cuadro 10.** Evolución en el tiempo de la VDMA (mm) en las Series RLV y MPC. El menor valor de VDMA denota mayor estabilidad.

Tratamientos	VDMA(mm)			
	Tiempo (meses)			
	$t_0$	$t_1$	$t_3$	$t_6$
<i>RLVT</i>	3,5 ±1,8	3,3 ±1,4	3,3 ±2,1	12,7 ±1,9
<i>RLVQ</i>	4,6 ±1,3	2,9 ±0,9	3,1 ±1,7	7,3 ±0,8
<i>RLVA</i>	4,3 ±2,2	4,3 ±1,7	2,2 ±1,3	9,0 ±2,3
<i>RLVP</i>	4,3 ±2,5	3,2 ±2,3	2,1 ±1,3	8,4 ±1,7
<i>RLVK</i>	3,2 ±1,7	2,9 ±0,9	2,0 ±0,8	10,1 ±3,1
<i>Promedio</i>	4,0 ±0,6 B	3,3 ±0,2 BC	2,6 ±0,6 C	9,5 ±2,0 A
<i>MPCT</i>	8,8 ±0,9	8,9 ±1,5	4,6 ±1,3	11,8 ±3,7
<i>MPCQ</i>	10,7 ±1,2	8,5 ±1,9	5,8 ±1,2	12,5 ±1,3
<i>MPCA</i>	8,9 ±0,8	8,6 ±2,0	7,3 ±0,8	14,5 ±0,6
<i>MPCP</i>	11,3 ±1,5	7,8 ±1,7	8,4 ±1,6	12,2 ±0,6
<i>MPCK</i>	10,1 ±3,1	8,9 ±1,6	7,3 ±1,9	12,7 ±1,8
<i>Promedio</i>	9,9 ±1,1 B	8,6 ±0,5 C	6,7 ±1,5 D	12,8 ±1,1 A

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas a través del tiempo en el sentido de las columnas para cada suelo. (LSD con  $\alpha \leq 0,05$ )

A través del tiempo se observa que la menor VDMA se alcanza en  $t_3$ , ello implica que la mayor estabilidad se obtiene en el tercer mes de aplicadas las enmiendas para ambos suelos (RLV y MPC). Sin embargo, la dispersión del suelo aumenta hacia  $t_6$ , superando con creces los niveles obtenidos en  $t_0$ .

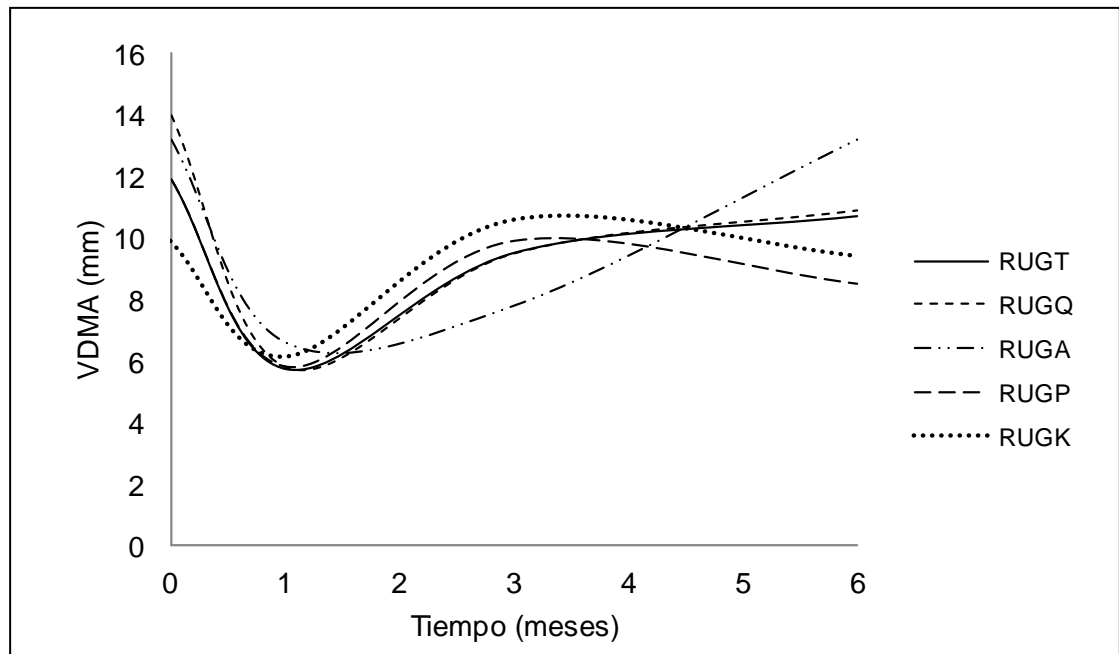
A pesar de contar con un mayor contenido de arcilla, la Serie MPC fue más inestable que la Serie RLV, con valores que rara vez fueron menores al testigo. En este suelo, obviando al testigo (MPCT), el tratamiento que presentó mayor estabilidad en  $t_3$  corresponde a MPCQ, con una VDMA de 5,8 mm, siendo ese tratamiento el que presentó la mayor tasa de disminución de la VDMA (aumento de estabilidad) entre los tiempos  $t_0$  y  $t_3$ . Nuevamente, con la llegada de la época invernal y el aporte de agua lluvia, la estabilidad de agregados decreció hacia el tiempo  $t_6$ .

En los tratamientos que corresponden al suelo RLV, se tiene que RLVQ es el más estable a lo largo del tiempo, aún cuando sus valores finales sean superiores a los del muestreo inicial. También destaca RLVK por ser el más estable en las tres primeras fechas de medición.

Para la Serie RUG, la variación a través del tiempo presentó similitudes en relación con un alto grado de dispersión en  $t_0$ , para disminuir drásticamente en  $t_1$  y aumentar hacia  $t_6$ , tal como se observa en la Figura 11.

En un primer comienzo, todos los tratamientos se mantuvieron sobre el testigo (11,9 mm), con excepción de RUGK, que mostró un valor de 9,9 mm vs los 12,2 mm del promedio para  $t_0$ . Hacia  $t_1$ , donde claramente hay un descenso en los tratamientos, el promedio fue de 6 mm, donde RUGK se mantiene por sobre este valor, junto con RUGA (6,1 y 6,6 respectivamente). Para  $t_3$ , se presenta una estabilización de los tratamientos, la que continúa hacia  $t_6$ , manteniéndose todos los niveles bajo los valores iniciales (10,6 mm en promedio). Destaca RUGA con un aumento sostenido desde  $t_1$  a  $t_6$ , variando de 6,6 a 13,2.

Para RUG los tratamientos se comportaron relativamente estables entre sí, pero no respecto a lo esperado, que son valores bajo el testigo a lo largo del tiempo.

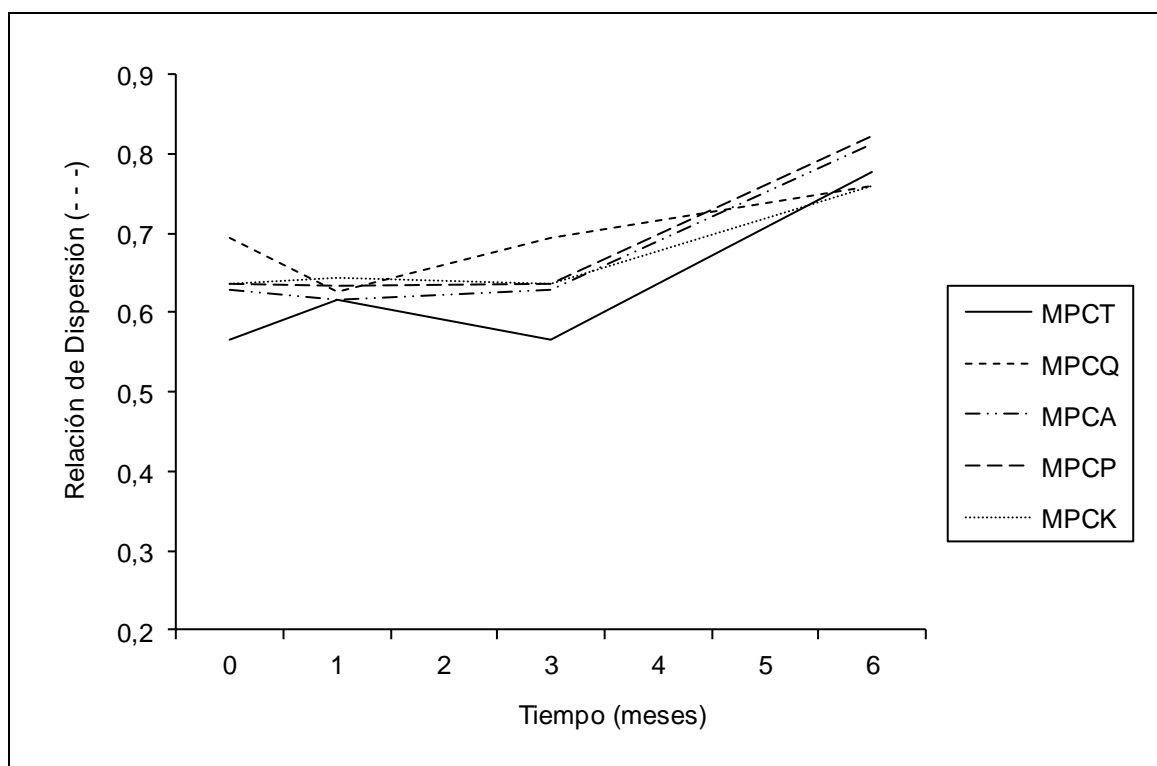


**Figura 11.** Evolución en el tiempo de la VDMA de la Serie RUG.

### 3.5.2. Estabilidad de microagregados

En esta propiedad, expresada a través de la relación de dispersión (RD), todos los tratamientos presentaron efectos estadísticamente significativos, con  $p = 0,042$  para RLV,  $p=0,000$  para RUG y  $Q = 11,81$  para MPC. El suelo MPC presentó datos no paramétricos, los que fueron analizados mediante Q de Cochran.

En la Figura 12 se aprecia que a medida que transcurrió el tiempo el efecto de las enmiendas desapareció en MPC (aumento de dispersión), variando significativamente entre ellas. Al  $t_6$ , MPCA y MPCP son los que muestran los mayores valores de RD, 0,812 y 0,822, respectivamente, y por sobre el testigo (MPCT= 0,776); bajo MPCT se encuentran MPCQ y MPCK (0,759 cada uno), siendo estos los que muestran mayor estabilidad (menor RD) a lo largo del tiempo.



**Figura 12.** Evolución en el tiempo de la estabilidad de microagregados de la Serie MPC. El menor valor de RD denota la mayor estabilidad

**Cuadro 11.** Evolución en el tiempo de la estabilidad de microagregados en los suelos Mapocho y Rungue.

RLV (Typic Xerochrepts)					Rungue (Vertic Haploxeroll)						
FACTORES	R <sup>2</sup>	PROMEDIO			FACTORES	R <sup>2</sup>	PROMEDIO				
Tiempo (t)*	0,72				Tiempo*	0,25					
t <sub>0</sub>		0,37			t <sub>0</sub>		0,34				
t <sub>1</sub>		0,53			t <sub>1</sub>		0,33				
t <sub>3</sub>		0,53			t <sub>3</sub>		0,28				
t <sub>6</sub>		0,65			t <sub>6</sub>		0,37				
Enmiendas <sup>ns</sup>	0,02				Enmiendas*	0,11					
Testigo		0,50			Testigo		0,36				
Quick Sol®		0,51			Quick Sol®		0,32				
Aqua Power®		0,53			Aqua Power®		0,34				
Pow Humus®		0,54			Pow Humus®		0,29				
Kimelgran®		0,52			Kimelgran®		0,32				
INTERACCIÓN	R <sup>2</sup> = 0,8096				INTERACCIÓN	R <sup>2</sup> = 0,6312					
Enmiendas	t				Enmiendas	t					
Testigo	t <sub>0</sub>	0,36	±0,07	A	a	Testigo	t <sub>0</sub>	0,41	±0,07	B	b
	t <sub>1</sub>	0,48	±0,04	A	b		t <sub>1</sub>	0,37	±0,02	A	b
	t <sub>3</sub>	0,53	±0,02	A	bc		t <sub>3</sub>	0,28	±0,00	A	a
	t <sub>6</sub>	0,63	±0,02	AB	c		t <sub>6</sub>	0,36	±0,04	A	ab
Quick Sol®	t <sub>0</sub>	0,34	±0,05	A	a	Quick Sol®	t <sub>0</sub>	0,33	±0,03	AB	b
	t <sub>1</sub>	0,58	±0,06	A	b		t <sub>1</sub>	0,33	±0,03	A	b
	t <sub>3</sub>	0,54	±0,10	A	b		t <sub>3</sub>	0,24	±0,02	A	a
	t <sub>6</sub>	0,59	±0,07	A	b		t <sub>6</sub>	0,37	±0,03	A	b
Aqua Power®	t <sub>0</sub>	0,43	±0,03	A	a	Aqua Power®	t <sub>0</sub>	0,41	±0,03	B	b
	t <sub>1</sub>	0,56	±0,03	A	b		t <sub>1</sub>	0,32	±0,02	A	ab
	t <sub>3</sub>	0,53	±0,05	A	ab		t <sub>3</sub>	0,27	±0,05	A	a
	t <sub>6</sub>	0,62	±0,03	AB	b		t <sub>6</sub>	0,37	±0,05	A	b
Pow Humus®	t <sub>0</sub>	0,42	±0,09	A	a	Pow Humus®	t <sub>0</sub>	0,27	±0,06	A	a
	t <sub>1</sub>	0,52	±0,03	A	a		t <sub>1</sub>	0,31	±0,02	A	a
	t <sub>3</sub>	0,52	±0,05	A	a		t <sub>3</sub>	0,27	±0,02	A	a
	t <sub>6</sub>	0,70	±0,10	B	b		t <sub>6</sub>	0,32	±0,04	A	a
Kimelgran®	t <sub>0</sub>	0,32	±0,06	A	a	Kimelgran®	t <sub>0</sub>	0,26	±0,07	A	a
	t <sub>1</sub>	0,52	±0,04	A	b		t <sub>1</sub>	0,29	±0,05	A	a
	t <sub>3</sub>	0,53	±0,09	A	b		t <sub>3</sub>	0,32	±0,07	A	a
	t <sub>6</sub>	0,69	±0,05	AB	c		t <sub>6</sub>	0,42	±0,10	A	b

\*: Existen diferencias significativas. ns: no significativo. Letras mayúsculas diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el factor tiempo, dentro de cada factor enmienda. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el factor enmienda dentro de cada nivel de cada factor tiempo. Test de Tukey.

A diferencia de la estabilidad de macroagregados, en que para suelos con mayor contenido de arcilla las enmiendas no tuvieron efecto, para los microagregados la estabilidad generada por los tratamientos se acrecienta a medida que la clase textural es más fina. Para MPC se

registró un aumento constante de la RD, para RLV se mantuvo estable aumentando hacia el mes 6; en cambio, en RUG disminuyó hasta el mes 3, perdiéndose finalmente el efecto acondicionador (Apéndice II.3). Los tratamientos explican un 80,96% la estabilidad de microagregados para el suelo RLV en todos sus tratamientos y un 63,12% para el suelo RUG. Sin embargo, al observar en detalle el efecto debido exclusivamente al tiempo, se tiene que éste explica en un 72% la efectividad de los tratamientos en el suelo RLV y en un 25% en el suelo RUG, existiendo en este último caso un efecto enmienda, que explica el 11% de los resultados, siendo un factor no significativo en el suelo RLV.

En cuanto a la efectividad de las enmiendas, se tiene que los tratamientos RLVA, RLVP y RLVK mantienen el mismo comportamiento a lo largo del tiempo, mostrando niveles similares entre las mediciones de  $t_0$  a  $t_3$ , variando significativamente hacia  $t_6$ , en cuyo caso aumenta la inestabilidad.

En RLV todos los tratamientos presentaron valores por sobre el testigo, con excepción de la variación apreciada hacia  $t_6$  en RLVQ y RLVK, cuyo valor final es levemente inferior (RLVT=0,78±0,03 vs RLVQ con 0,76 ±0,03 y RLVK con 0,76±0,05).

Respecto del suelo RUG, a nivel de enmiendas Pow Humus® y Kimelgran® presentaron valores estables a lo largo del tiempo, sin diferencias significativas entre ellos y con valores inferiores al testigo (RUGT); por su parte, el testigo mostró variaciones a lo largo del ensayo, estabilizándose en un valor menor a la medición inicial (0,41 ±0,07 en  $t_0$  y 0,37 ±0,04 en  $t_6$ ).

De las enmiendas restantes, RUGA y RUGQ presentaron valores similares a RUGT, en cambio RUGK presentó un aumento de los valores de RD a lo largo del tiempo, actuando en este caso como dispersante, tal como se observa en el Cuadro 11, donde el menor valor de RD denota la mayor estabilidad.

### 3.6. Resistencia a la penetración

Estadísticamente se observaron efectos de los tratamientos sobre la resistencia a la penetración (RP) para todos los suelos estudiados, tanto en superficie (0 a 5 cm) como el promedio entre 6 y 20 cm. Los datos son no paramétricos.

Al analizar los datos, se observa (Figura 13) que existen variaciones entre los tiempos de toma de muestra, aún cuando los niveles de resistencia vuelven a los valores iguales o inferiores a los iniciales, con aumentos apreciables hacia  $t_1$  y  $t_3$  para la gran mayoría de los tratamientos. En la Figura 13 se comparan las mediciones para los testigos respecto de aquellas enmiendas que presentaron mayores variaciones a lo largo del tiempo. El resto de



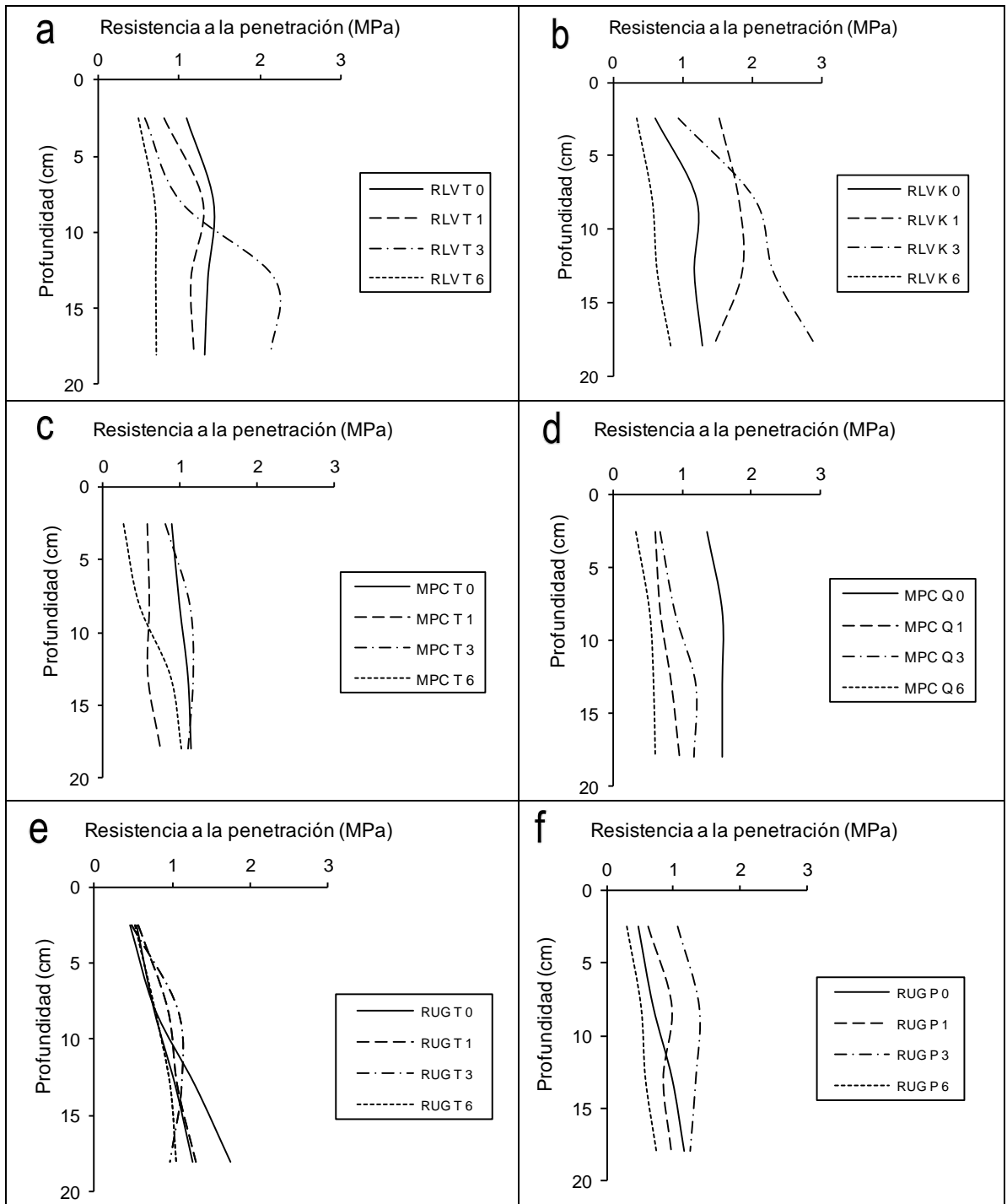
las enmiendas y su efecto en el tiempo para cada suelo se presenta en el Apéndice II.4.1 y siguientes, a excepción de Aqua Power® que no mostró grandes diferencias.

Al comparar RLVT y RLVK, se apreció un aumento en la RP al aplicar Kimelgran® (Figura 13a y Figura 13b) para los tiempos  $t_1$  y  $t_3$ , pero finalmente la RP vuelve a valores menores a los iniciales, al igual que el testigo (RLVT), que en general tuvo un descenso constante de la RP en el tiempo.

Para el suelo MPC, la situación de MPCQ no varió mucho respecto del testigo (MPCT), pues si bien no hubo efecto de los tratamientos, sí hubo diferencias entre las mediciones, aún cuando éstas se comportaron oscilantes en el tiempo (Figura 13c y Figura 13d).

El testigo del suelo RUG (RUGT, Figura 13e) se comportó muy constante en el tiempo, con un incremento gradual de la RP en profundidad, mientras que el tratamiento acondicionado con Pow Humus® (RUGP, Figura 13f) tuvo un incremento de RP hacia el tiempo  $t_3$  para descender nuevamente a los niveles iniciales en  $t_6$ .

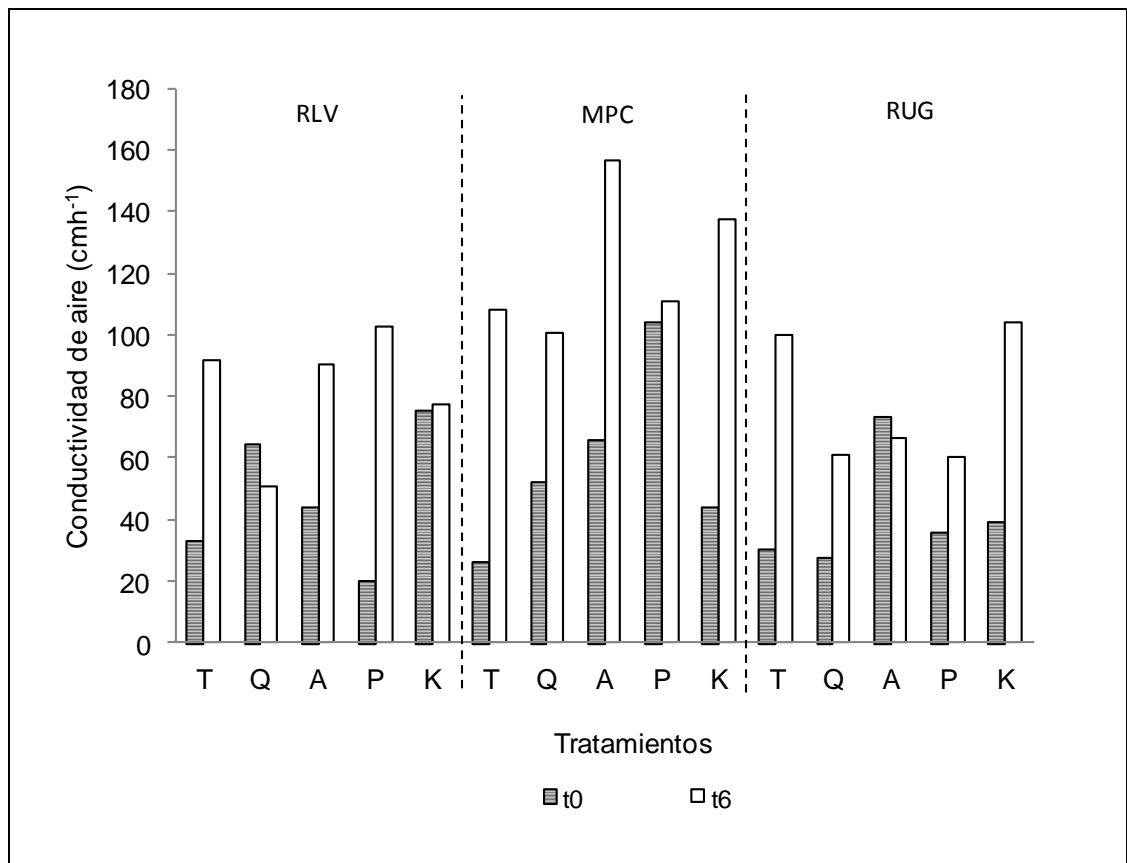
Es necesario contextualizar las épocas de medición en el año calendario, pues junto con la pérdida de efectividad de las enmiendas en el tiempo, la última medición ( $t_6$ ) coincidió con la época invernal, que aportó agua lluvia con un efecto dispersante, dada la baja carga de cationes; ambos factores inciden en la pérdida de resistencia en  $t_6$  para todos los tratamientos. El resto de las enmiendas no promovieron cambios significativos en la RP.



**Figura 13.** Resistencia a la penetración, 24 h después de un riego, en los testigos (izquierda) contrastada distintas enmiendas (derecha), para distintos tiempos de evaluación (0, 1, 3 y 6 meses desde el inicio del ensayo).

### 3.7. Flujo de aire

La Figura 14 incluye valores de flujo de aire (KI) medidos al inicio y término del ensayo ( $t_0$  y  $t_6$ ). El ANDEVA indicó que hubo efecto significativo del tiempo en los tres suelos en cuanto a esta propiedad.



**Figura 14.** Evolución en el tiempo del flujo de aire de tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas.

De acuerdo con la Figura 14, el flujo de aire presentó variaciones irregulares para el suelo RLV, con comportamientos disímiles entre sus tratamientos, mostrando valores similares entre RLVT y RLVA. RLVQ presentó una disminución en el flujo de aire, entre  $t_0$  y  $t_6$ , en tanto RLVK presentó un leve aumento entre los tiempos. Los demás tratamientos para esta Serie presentaron aumentos en el flujo. En cuanto al promedio de entre los tiempos, para este suelo  $t_0$  tiene  $56,37 \text{ cm h}^{-1}$  y para  $t_6$   $83,35 \text{ cm h}^{-1}$ , existiendo diferencias en el flujo de aire aún cuando estadísticamente no las hay.

En el caso del suelo MPC, todos los tratamientos presentaron incrementos en la capacidad de flujo de aire en el tiempo. Mención aparte merece MPCP, con una leve variación al cabo de seis meses. Los promedios de tiempo para MPC son 69,2 cm h<sup>-1</sup> para t<sub>0</sub> y 142,3 cm h<sup>-1</sup> para t<sub>6</sub>.

En cuanto al suelo RUG, se indica que se todos los tratamientos presentaron aumentos respecto de la medición inicial, como se aprecia en la Figura 14, con excepción de RUGA que mostró valores levemente inferiores en la segunda medición.

En el Cuadro 12 se aprecian las mediciones realizadas para los suelos.

**Cuadro 12.** Evolución en el tiempo del flujo de aire en tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas orgánicas.

Tratamientos	Flujo de aire (cm h <sup>-1</sup> )				
	Tiempo (meses)				Promedio
	t <sub>0</sub>		t <sub>6</sub>		
RLVT	33,03	±23,08	91,39	±17,50	62,21
RLVQ	64,12	±58,19	51,05	±51,50	57,59
RLVA	43,66	±17,25	90,46	±29,49	67,06
RLVP	20,25	±6,73	102,86	±67,34	61,56
RLVK	75,01	±65,19	77,24	±62,99	76,13
Promedio	56,37	±45,99 ns	83,35	±54,32 ns	
MPCT	26,00	±29,45	108,06	±60,15	67,03
MPCQ	52,41	±25,02	100,35	±15,50	76,38
MPCA	65,89	±64,18	156,80	±143,50	110,35
MPCP	103,65	±32,09	110,97	±97,11	107,31
MPCK	43,87	±42,74	137,15	±64,46	90,51
Promedio	69,2	±44,24 B	142,3	±85,52 A	
RUGT	30,45	19,21	99,72	52,35	65,08
RUGQ	27,63	37,09	61,22	73,27	44,42
RUGA	73,04	80,67	66,56	58,48	69,80
RUGP	35,39	21,84	60,59	73,59	47,99
RUGK	38,80	53,05	104,32	47,44	71,56
Promedio	56,35	±50,36 B	93,85	±56,77 A	

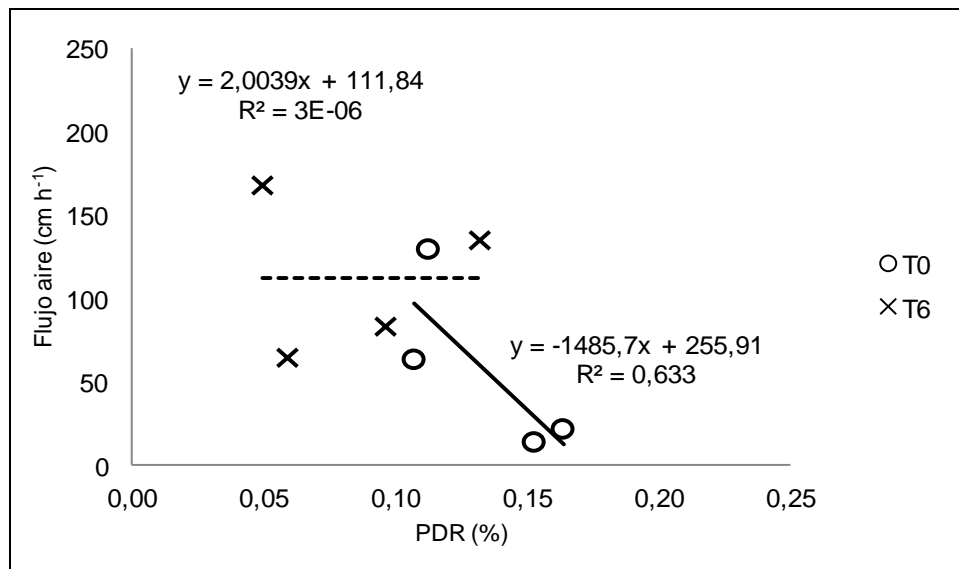
Letras distintas indican diferencias significativas entre columnas a través del tiempo, según Serie (LSD con  $\alpha \leq 0,05$ )

Llama la atención que al pasar de menor a mayor contenido de arcilla en los distintos suelos no se generó un gradiente en la capacidad de conducir fluidos, por lo que la disturbación inicial simulando una aradura, y la ausencia de cultivos y malezas, ha retrasado el efecto estructurador de los ciclos de humectación y secado, persistiendo un sistema poroso tortuoso, de baja conductividad para t<sub>0</sub>.

Ello se observa, además, al analizar la correlación entre los poros mayores a 50  $\mu\text{m}$  (PDR) y el flujo de aire, medido a una tensión de -33 kPa, donde en t<sub>0</sub> se aprecia una alta a media

correlación lineal, descendiendo hasta media y baja en  $t_6$ , lo que indica la mantención de un sistema poroso tortuoso y la ausencia de estructuración, no generándose la suficiente continuidad para asegurar la funcionalidad del suelo en la renovación del aire de éste como se desprende del análisis realizado por Valenzuela (2012) en base a lo planteado por Pagliai y Vignozzi (2002).

Prueba de ello es la variación presentada por RUGK entre  $t_0$  y  $t_6$ , donde baja de una correlación de 0,796 a 0,002, tal como se aprecia en la Figura 15.



**Figura 15.** Relación entre poros de drenaje rápido (PDR) y flujo de aire para el tratamiento RUGK.

Los gráficos con las correlaciones de este tratamiento, los otros suelos se encuentran en el Apéndice II.5.

### 3.8. Temperatura del suelo

La temperatura se midió cada semana durante la realización del presente ensayo, evidenciándose efectos significativos para tiempo (t) y enmienda (T, Q, A, P y K), sin interacción entre ellos para cada uno de los suelos analizados. La medición se realizó a medio día con el suelo a capacidad de campo.

#### 3.8.1. Variación de la temperatura entre los períodos de medición

En el Cuadro 13 se presentan los resultados obtenidos para los suelos RLV, MPC y RUG; los resultados para RUG son no paramétricos.

**Cuadro 13.** Evolución en el tiempo de la temperatura en tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas orgánicas.

Tratamientos	Temperatura (°C)										
	Tiempo (meses)										
	$t_0$		$t_1$		$t_3$		$t_6$		Promedio		
RLVT	31,6	±0,5	30,2	±3,0	21,5	±6,7	12,0	±2,5	23,8	±9,1	a
RLVQ	29,3	±0,1	28,1	±3,0	20,5	±6,2	11,1	±2,3	22,3	±8,4	bc
RLVA	28,4	±0,5	27,4	±2,8	19,4	±6,0	9,9	±2,0	21,3	±8,6	c
RLVP	28,3	±1,0	26,6	±2,7	18,8	±5,5	9,8	±2,0	20,9	±8,4	c
RLVK	30,8	±0,5	30,0	±3,5	21,0	±6,6	11,4	±2,4	23,3	±9,1	ab
Promedio	29,7 ±1,5 A		28,4 ± 1,6 A		20,2 ±1,2 B		10,9 ±0,9 C				
MPCT	33,1	±0,1	31,1	±3,2	21,1	±6,9	10,8	±2,2	24,0	±10,3	a
MPCQ	31,0	±1,0	30,8	±3,9	21,2	±7,0	11,3	±2,3	23,6	±9,4	a
MPCA	32,0	±0,5	31,0	±3,1	21,3	±6,8	11,3	±2,3	23,9	±9,7	a
MPCP	31,8	±0,1	31,2	±3,3	20,4	±6,4	10,7	±1,9	23,5	±10,1	a
MPCK	30,5	±0,8	28,7	±2,5	19,7	±6,1	11,0	±2,2	22,5	±9,0	b
Promedio	31,7 ±1,0 A		30,5 ±1,0 B		20,8 ±0,7 C		11,0 ±0,3 D				
RUGT	31,3	±1,9	28,7	±2,4	18,0	±5,9	9,1	±2,2	22,6	±9,3	n.s.
RUGQ	30,0	±0,9	29,0	±2,8	20,4	±6,2	10,2	±2,2	22,4	±9,1	n.s.
RUGA	29,9	±1,4	29,8	±2,9	22,1	±6,2	12,4	±2,2	22,8	±9,0	n.s.
RUGP	30,3	±0,7	29,1	±3,0	19,3	±5,9	10,5	±2,2	22,3	±9,3	n.s.
RUGK	30,0	±1,6	29,0	±2,7	19,6	±6,2	10,0	±2,0	22,3	±9,2	n.s.
Promedio	30,3 ±0,6		29,1 ±0,4		19,7 ±0,4		10,7 ±0,3				

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre columnas a través del tiempo, según Serie (LSD con  $\alpha \leq 0,05$ ). Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre filas para las enmiendas, según Serie (LSD con  $\alpha \leq 0,05$ ).

En términos de tiempo, existen diferencias significativas entre  $t_0$  y  $t_6$ , lo que resulta obvio al ir descendiendo la temperatura a medida que avanza el año, comenzando el ensayo en período estival, cuyas mínimas son superiores a 10°C, para finalizar en pleno invierno, con temperaturas mínimas cercanas a 0°C.

En términos de enmiendas, para el suelo RLV se tiene que RLVK presenta temperaturas similares al testigo, pudiendo apreciarse diferencias significativas con los tratamientos RLVQ, RLVA y RLVP a lo largo del tiempo, los cuales se mantienen con una menor temperatura, tanto en verano como en invierno. En cuanto al suelo MPC, se tiene que sólo MPCK es quien mostró valores más bajos y distintos a MPCT, siendo los demás tratamientos (MPCQ, MPCA y MPCP), similares al testigo.

### 3.8.2. Variación estacional de la temperatura

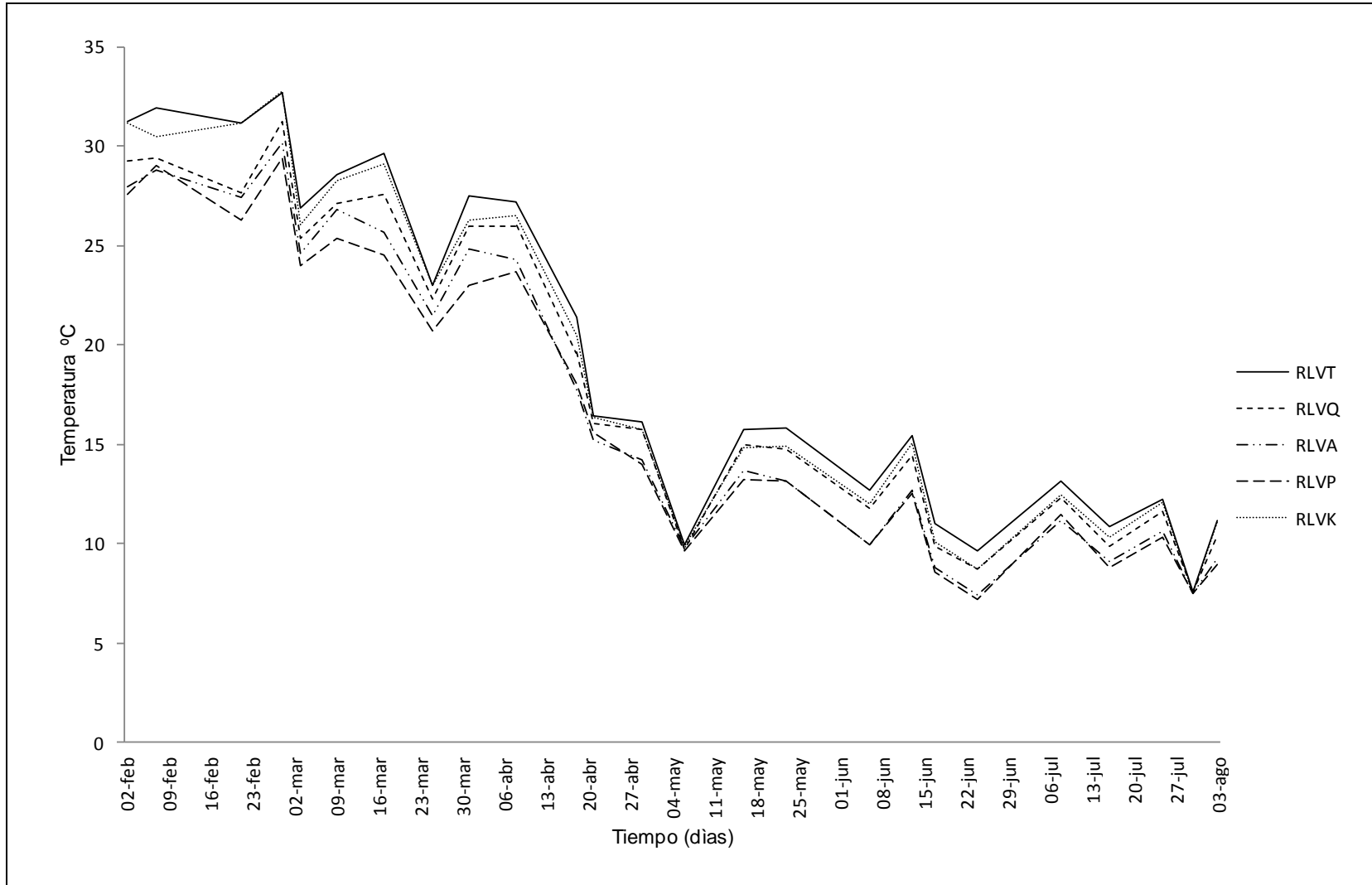
La variación de la temperatura a lo largo del ensayo, para cada uno de los tratamientos, se muestra en las Figuras 16, 17 y 18. Se aprecia que éstos mostraron variaciones entre las enmiendas aplicadas para cada uno de los suelos.

Al observar la Figura 16, se aprecian diferencias entre los valores del testigo (RLVT) y RLVP desde el inicio de las mediciones, homogeneizándose hacia el final ( $t_6$ ). A su vez, RLVK es quien mostró valores relativamente cercanos al testigo a lo largo de todo el período, aunque siempre inferiores, para homogeneizarse hacia el final del ensayo. En el suelo RLV ningún tratamiento superó los valores alcanzados por el testigo.

En la Figura 17, en cambio, inicialmente ningún tratamiento supera los valores del testigo (MPCT), pero rápidamente se igualaron, con excepción de MPCK, quien mantiene la temperatura muy por debajo del testigo ( $3^{\circ}\text{C}$  aproximadamente al inicio del ensayo). Los tratamientos correspondientes a MPCA, MPCP y MPCQ mantienen sus niveles entre los observados para MPCK y MPCT entre  $t_0$  y  $t_1$ . Hacia finales del mes de marzo, MPCP y MPCA presentaron temperaturas superiores al testigo y así se mantuvieron hasta  $t_6$ . A  $t_3$  (04 de mayo) todos los tratamientos se presentaron muy cercanos al testigo, y desde mediados del mes de junio y hasta finales del mes de julio todos los tratamientos mostraron temperaturas superiores al testigo.

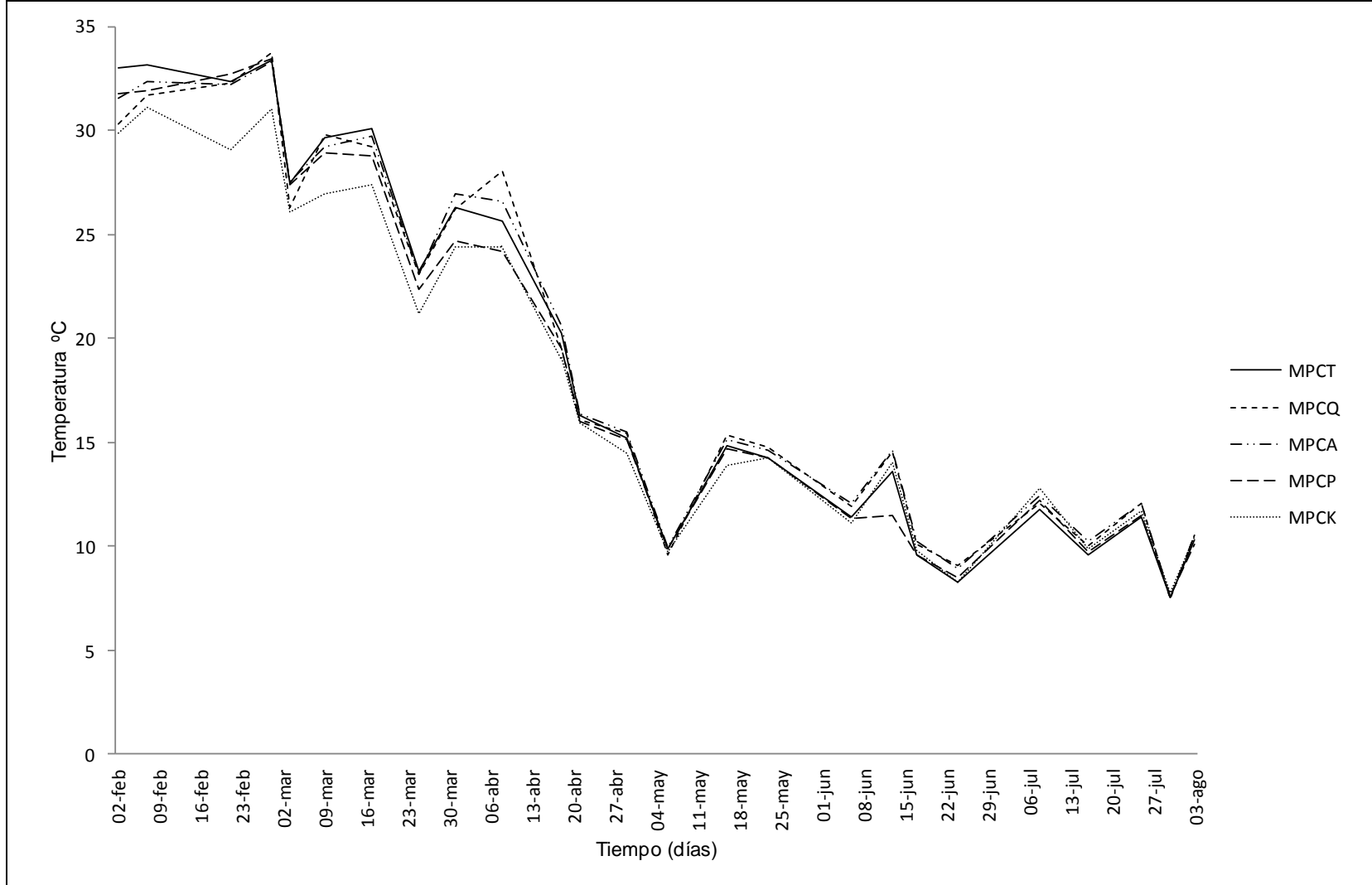
La Figura 18, por su parte, muestra las variaciones en los tratamientos del suelo Rungue, donde si bien las diferencias tienden a ser menores que en el caso de los suelos con menor contenido de arcilla, igual se generan comportamientos disímiles según tratamiento. De acuerdo con las observaciones iniciales y hasta mediados de febrero, los niveles de temperatura están bajo el testigo (RUGT), a excepción de RUGA, quien a partir de mediados de febrero y hasta fines del ensayo mostró valores por sobre RUGT.

Entre  $t_1$  y  $t_3$ , RUGQ y RUGA presentaron temperaturas por sobre el testigo, con valores promedio que decayeron desde los  $25^{\circ}\text{C}$  a los  $10^{\circ}\text{C}$ . A partir de  $t_3$ , RUGA se mantuvo con valores similares y por sobre el testigo. Por su parte RUGP presentó, a partir de mediados de marzo, niveles por debajo del testigo hasta la última medición, realizada a principios de agosto.

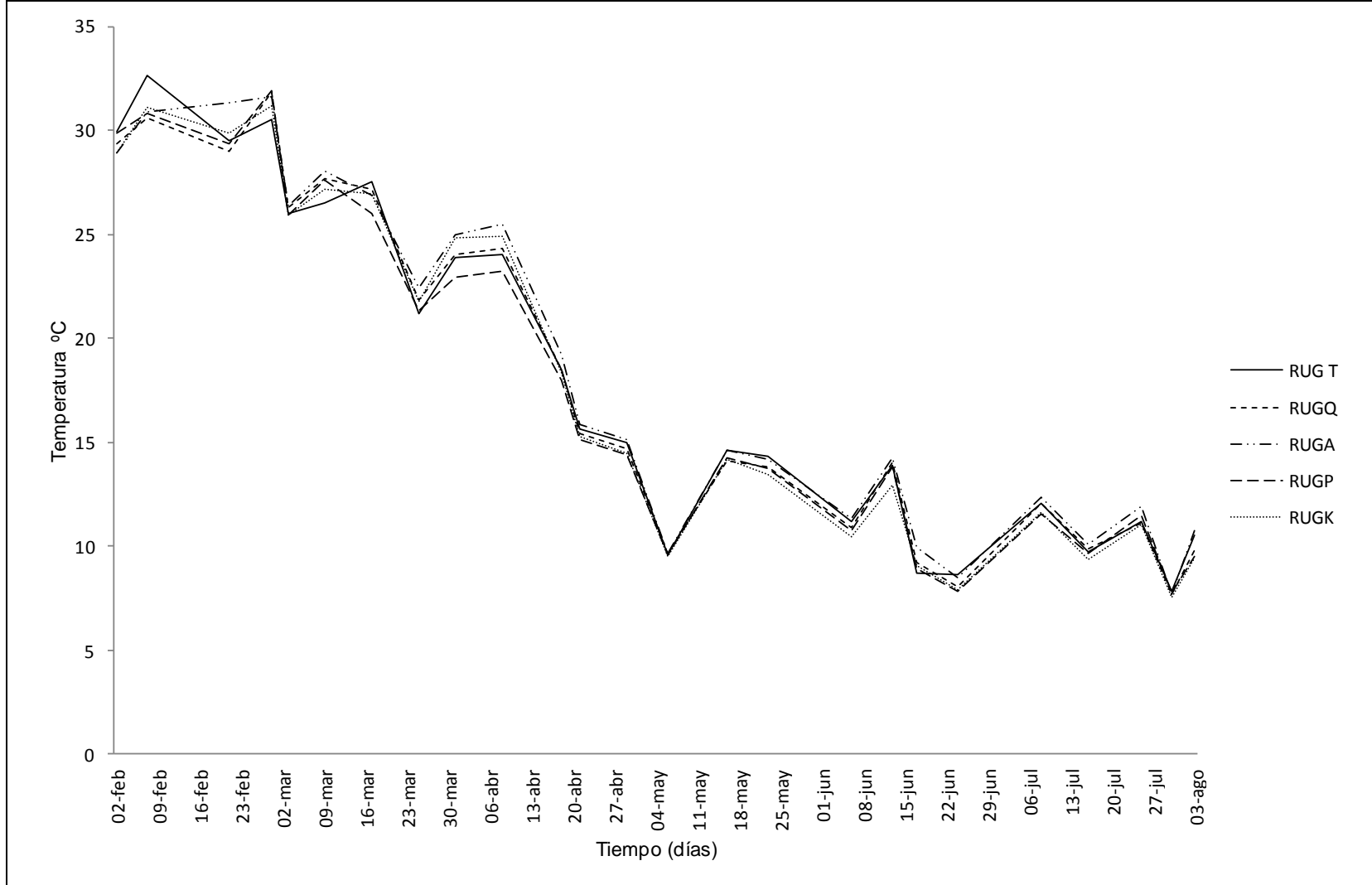


**Figura 16.** Variación semanal de la temperatura de suelo Rinconada de Lo Vial (RLV) acondicionado con enmiendas orgánicas.





**Figura 17.** Variación semanal de la temperatura de suelo Mapocho (MPC) acondicionado con enmiendas orgánicas.



**Figura 18.** Variación semanal de la temperatura de suelo Rungue (RUG) acondicionado con enmiendas orgánicas.

No se observa especialmente que alguno de estos tratamientos presente efectividad a lo largo del tiempo en términos de mantener los niveles de temperatura estables por sobre o por debajo del testigo. Sin embargo, resulta interesante analizar el comportamiento en el lapso de una semana, realizando mediciones dentro del ciclo de riego.

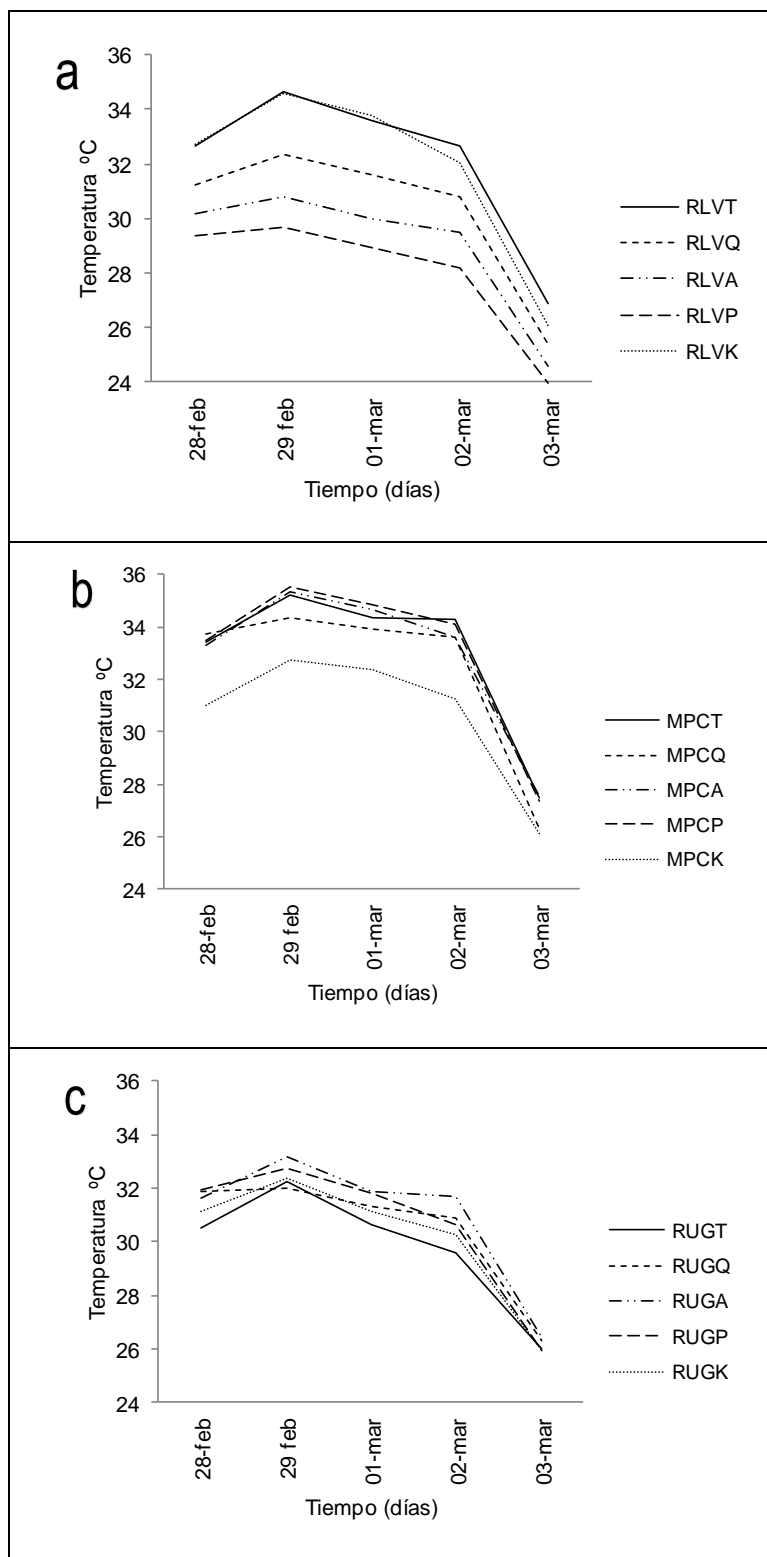
### **3.8.3. Variación en el corto plazo de la temperatura luego de un riego**

La Figura 19 muestra la variación de la temperatura registrada diariamente posterior a un evento de riego hasta una condición cercana a capacidad de campo, la que es alcanzada aproximadamente a las 96 h en los distintos suelos analizados. Corresponde a la medición realizada entre los días 28 de febrero y 3 de marzo de 2011, con riego el día 26 de febrero.

En RLV en general se observa (Figura 19a) que la temperatura disminuye de manera constante entre los días 28 de febrero y 3 de marzo, luego de aplicado el riego. Al analizar en detalle se observa que todos los tratamientos presentan valores inferiores al testigo (RLVT) en especial RLVP, con una diferencia aproximada de 3°C por debajo de RLVT. En general se aprecian diferencias entre las mediciones para los distintos tratamientos, pudiendo individualizarse claramente cada uno de ellos, evidenciando efectos de los mismos.

En cuanto al suelo Mapocho (Figura 19b), las temperaturas se mantuvieron estables entre el 29 de febrero hasta el 2 de marzo, luego de lo cual hubo una disminución brusca. Al observar en detalle no se aprecian grandes diferencias entre los tratamientos, con excepción de MPCK. Se observa que el tratamiento MPCK se mantiene con unos 3°C aproximadamente bajo la temperatura promedio de MPCT; los demás tratamientos muestran temperaturas similares entre sí y con respecto al testigo. De entre ellos destaca MPCQ, que se mantiene bajo el testigo y sobre MPCK a partir del día 29 de febrero.

Para el suelo Rungue, se aprecia en la Figura 19c que las temperaturas descienden también a partir del 29 de febrero, pero se mantienen mucho más similares entre tratamientos en relación a los otros dos suelos. Sin embargo, cabe destacar que en este suelo todos los tratamientos se mantienen con temperaturas por sobre el testigo (RUGT), presentando RUGA temperaturas entre 1 y 2°C por sobre RUGT, situación que se aprecia claramente hacia el 2 de marzo.



**Figura 19.** Variación de la temperatura en un período de una semana en tres suelos de Chile central, acondicionados con cuatro enmiendas orgánicas, luego de un riego.

#### 3.8.4. Variación diurna-estacional de la temperatura entre los tratamientos

En la Figura 20 se aprecia la situación observada en la variación diurna para dos estaciones (invierno-verano) de los tratamientos en los suelos analizados. Las muestras se tomaron el día 15 de febrero para la medición de verano y el día 3 de agosto para la medición de invierno (2011).

Al observar las temperaturas para un día de verano, se tiene que a partir de las 10:00 h, en el caso de los suelos RLV, éstas se mantienen sobre los 15°C, superando los 30°C a las 16:00 h, para luego descender paulatinamente. Entre los tratamientos asociados a este suelo, destaca RLVT, que mantiene las temperaturas altas a lo largo del día, al igual que RLVK, cuya curva en la Figura 20a se funde con la curva de RLVT.

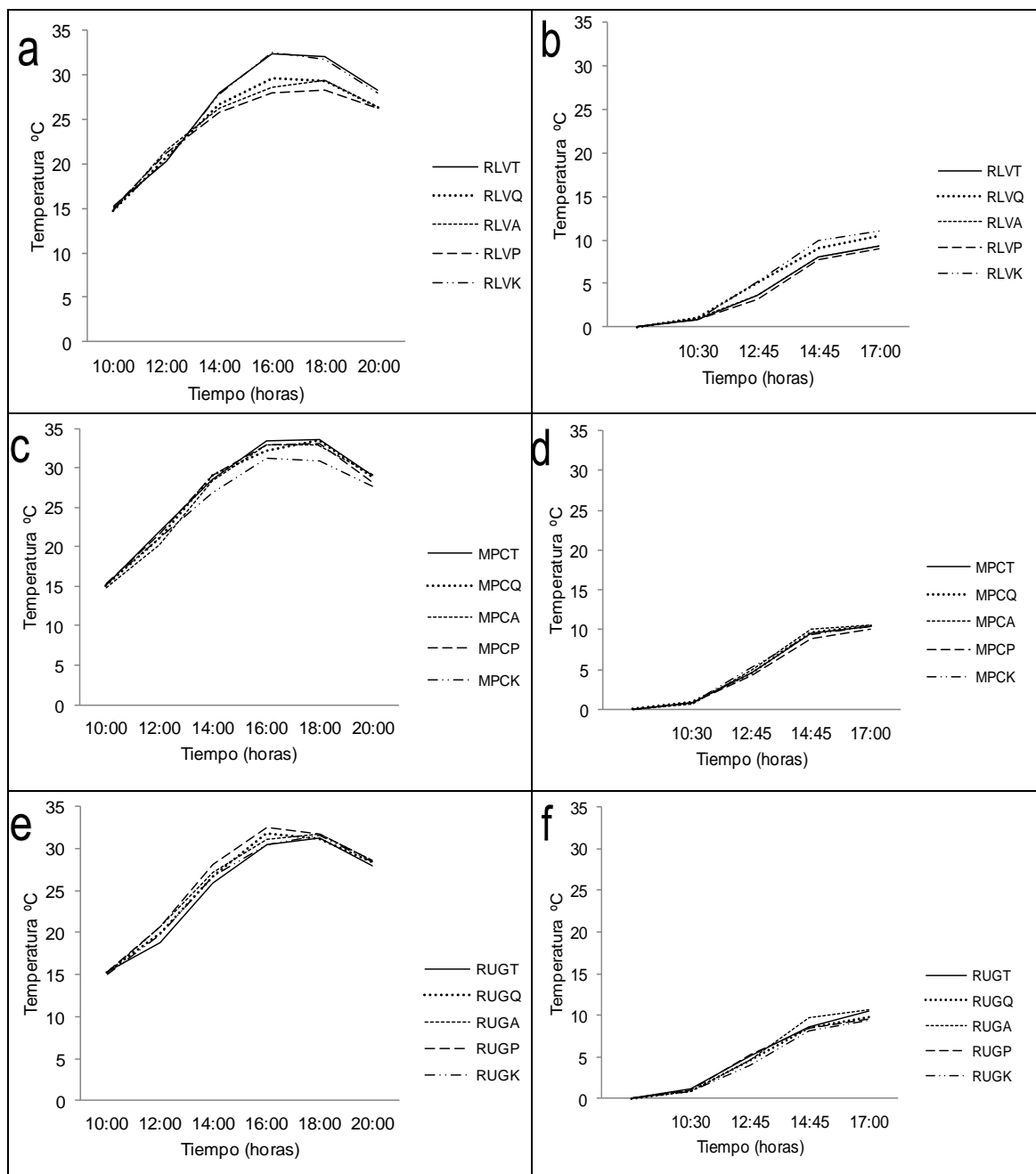
Los demás tratamientos (RLVQ, RLVA y RLVP) mostraron menores temperaturas a partir de las 14:00 h, manteniéndose entre 25 y 30°C hasta las 20.00 h. RLVP es el tratamiento que presentó las menores temperaturas.

Respecto de la medición realizada en invierno Figura 20b, se tiene que la temperatura a las 10.30 hrs bordeó los 0°C, llegando apenas a los 10°C hacia las 17:00 h. Se distinguen RLVK y RLVQ como los tratamientos con temperaturas superiores a RLVT. A diferencia el verano, RLVT y RLVP se mantienen homogéneos, junto a RLVA.

Para el suelo MPC, se tiene que para la variación en verano destaca sólo MPCK, no superando los 30°C (16:00 h). Los demás tratamientos no se distinguen entre sí, tal como se aprecia en la Figura 20c. En lo que respecta al invierno, se observó que la temperatura no superó los 10°C a las 14:45 h. En este caso destaca MPCP como el tratamiento con menores temperaturas, aunque sin diferencias importantes con respecto a los demás tratamientos (Figura 20d).

Finalmente, para el suelo RUG se observa que todos los tratamientos superan las temperaturas de RUGT en verano, homogeneizándose recién a partir de las 18:00 h. Aquí, la temperatura se mantuvo entre los 15 y los 30°C entre las 10:00 y las 16:00 h (Figura 20 e).

Para las temperaturas de invierno (Figura 20f), se consignó que a las 10:00 h las temperaturas bordeaban los 0°C, ascendiendo hasta los 10°C cerca de de las 17:00 h. Los tratamientos tuvieron una alta homogeneidad, la que aumentó con el contenido de arcilla, especialmente en la medición de invierno. Así mismo, a mayor contenido de arcilla, más tarde comenzó el ascenso de la temperatura.



**Figura 20.** Variación diaria de la temperatura para un día de verano (febrero 15, izquierda) comparada con uno de invierno (agosto 3, derecha) en tres suelos de Chile central acondicionados con cuatro enmiendas orgánicas

#### 4. DISCUSIÓN

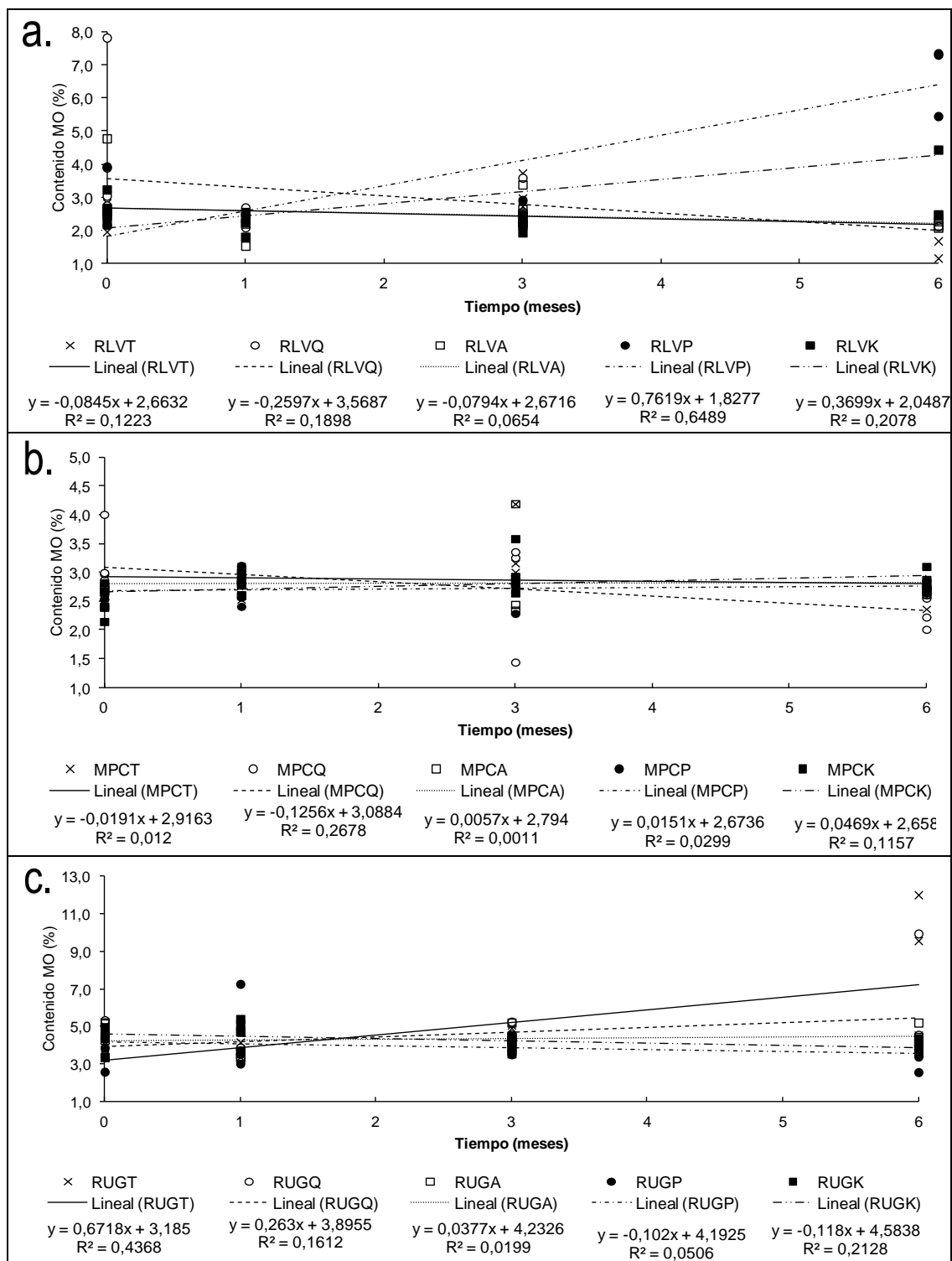
Los suelos seleccionados presentan un marcado gradiente textural (11, 22 y 36% de arcilla; Cuadro 4), por lo que su proceso de estructuración se espera sea distinto, más dependiente de aportes de materia orgánica (suelos con arcilla <15%) o más dependiente de ciclos de humectación y secado (suelos con arcilla >20%) (Barzegar *et al.*, 1995; Oades, 1988). Este contenido de arcilla está directamente correlacionado con el contenido de materia orgánica (MO), pero la densidad aparente ( $D_a$ ) y la distribución del tamaño de poros responden a la condición de uso y manejo, ya que la estructura es una propiedad altamente dinámica (Dexter, 2002).

Las mediciones presentaron cambios atribuibles tanto a la estacionalidad como también al tipo de suelos, mostrando variaciones tales que se anulan los efectos de los tratamientos; se observan valores similares a los iniciales al final del ensayo, con valores máximos (o extremos) alrededor de  $t_1$  y  $t_3$ , según la propiedad analizada.

Las variaciones en MO (Cuadro 5) presentaron efectos significativos a nivel estadístico (Q de Cochran,  $p=11,83$ ), se apreció un aumento sostenido a partir de  $t_3$  en RLVP. Esta podría explicarse por cambios estacionales, dado que la primera medición se realizó en el mes de febrero y la última en el mes de agosto del 2011, en cuyo caso Pow Humus® generaría una reactivación biológica, dada su mayor concentración de ácidos orgánicos, favoreciendo descomposición de residuos orgánicos presentes en el suelo original (D'Acqui *et al.*, 1998; Grosbellet *et al.*, 2011).

RUGQ presentó variaciones en el contenido de MO, siempre por debajo del testigo (RUGT). RUGK se mantuvo en niveles cercanos al valor original mientras que RUGA y RUGP, presentaron un peak alrededor del primer mes ( $t_1$ ) para luego disminuir hacia  $t_6$ . Considerando que el suelo RUG poseía inicialmente residuos orgánicos (pradera mediterránea anual), la dinámica de la materia orgánica responde a una mineralización anticipada cuando se aplicó Pow Humus® y Kimelgran®, pero el balance de MO en el tiempo no generó diferencias entre los tratamientos, por tanto usar una fuente u otra dependerá del objetivo buscado (degradación temprana o no de los residuos orgánicos).

En la Figura 21 se aprecia la tendencia de cada uno de los tratamientos aplicados, incluyendo el testigo, donde se evidencia la escasa correlación entre el contenido de MO y su evolución en el tiempo, de manera tal que los tratamientos presentan aportes significativos en términos estadísticos (Q=11,83 para RLV, Q=16,67 para MPC y Q=13,24 para RUG) correspondiendo a Quick Sol® en el suelo MPC y el testigo en el suelo RUG, cuyo incremento correspondería más bien a un mejoramiento de la calidad de ésta. En el caso de RLV Pow Humus® y Kimelgran® mostraron un incremento sostenido de la MO, siendo RLVP quien presenta mayores resultados, atribuibles a la presencia de lombrices.



**Figura 21.** Tendencia en el tiempo del contenido de materia orgánica en tres suelos de la zona central de Chile, acondicionados con enmiendas orgánicas.



Llama la atención en el suelo RUG que sea el testigo el que presentó un incremento de la MO, ralentizándose con la aplicación de enmiendas, más aún si Kimelgran® se ofrece en el mercado como mejorador del contenido de MO. Kimelgran® sí sería un aporte a la MO del suelo MPC, no así en RUG y RLV; Quick Sol® es quien menos aporta, tanto a MPC como a RLV, cuya tendencia es a la disminución de la MO, aunque la aumenta en RUG. Ello tendría relación con el contenido inicial de la MO, cuyos valores para RLV y MPC son de 2,3 y 2,5% respectivamente, a diferencia de RUG, que presentó un 3,9%, por tanto el factor preponderante aquí no sería el tiempo ni la enmienda, sino el contenido de arcilla y su capacidad de retención de agua.

Los cambios en el contenido de MO se asocian a la estacionalidad, considerando que de manera natural hay un aumento del contenido de carbono orgánico hacia otoño, producto de la descomposición de las plantas (Brady y Weil, 2010). Siendo así, si bien se controló superficialmente la presencia de malezas durante el ensayo, en el subsuelo la situación continuó el ciclo normal, dado que no se intervino la zona radical a fin de evitar la destrucción de la zona de muestreo. Ello explicaría el aumento del contenido de MO entre  $t_0$  y  $t_3$  para la gran mayoría de los tratamientos. Este aporte de residuos frescos motiva un mayor aporte de nutrientes al suelo, estimulando la actividad microbial o de la fauna del suelo (Brady y Weil, 2010). Ahora bien, al observar los datos obtenidos en las mediciones se aprecia que, efectivamente, hay un aumento de MO entre  $t_0$  y  $t_3$  para disminuir hacia  $t_6$ , en la mayoría de los tratamientos estudiados. Ello se debería, posiblemente, al incremento de MO activa, la que en el corto plazo es consumida por los microorganismos del suelo, persistiendo en el tiempo el contenido de MO pasiva, cuyos montos varían en el largo plazo (Brady y Weil, 2010).

A su vez, el método de calcinación no hace distinción entre los componentes de la MO, sumado a la presencia de lombrices procedentes de los ensayos de permacultura, quienes mostraron una marcada preferencia por los suelos RLV y RUG, con ciertas enmiendas, las que aparecieron entre  $t_3$  y  $t_6$ , induciendo a un posible error experimental por proximidad de los estudios.

Con las dosis de aplicación de enmiendas se esperaban cambios en el contenido de MO aunque, de acuerdo con Brady y Weil (2010) el efecto de las enmiendas sobre el contenido de MO del suelo es marginal, no siendo un aporte sustancial en su variación. Sí se esperaban cambios en la Da, aunque la literatura señala resultados variables (Cortés, 2011; Marín, 2011). Aun cuando no se generaron diferencias estadísticas entre los tratamientos aplicados a los suelos RLV y RUG, existió una respuesta en función del tipo de suelo, presentando una tendencia a disminuir la Da en suelos de textura gruesa cuando se utilizaron enmiendas, aunque en todos los casos hay una densificación hacia  $t_6$ .

Se tiene que la principal influencia o efecto experimental lo presenta el factor Tiempo para estos suelos (RLV y RUG), por tanto se observó que la Dac varió debido al asentamiento y a las características propias de cada suelo y no por la aplicación de enmiendas, aún cuando la exposición a ciclos de humectación y secado (Semmel *et al.*, 1990) fue exactamente la misma. Aquí las diferencias obedecen más al contenido de arcilla y a la reordenación de las

partículas que a la cantidad de agua al tipo de enmienda aplicada. Horn *et al.* (2007) plantean que los procesos de consolidación y aumento de la Da no responden necesariamente al aumento de carga normal en superficie, sino a procesos naturales de estructuración, pero el resultado final dependerá del material parental.

El único suelo que presentó efectos significativos en sus tratamientos fue MPC, donde se aprecia un incremento de la Dac hacia  $t_6$  en todos los tratamientos analizados, destacándose Aqua Power® con un aumento de  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  en  $t_0$  a  $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$  en  $t_6$ . En este caso, MPC fue el suelo que inicialmente tenía el peor desarrollo estructural, pues se muestreó en una zona de tránsito de maquinaria agrícola, por lo que sufrió un fuerte asentamiento, requiriendo más de una temporada para su estabilización de su estructura.

Para la densidad aparente por terrón (Dat) Quick Sol® sería la enmienda que mostraría mejores resultados en los tres suelos analizados. El proceso de densificación en el tiempo y posterior friabilización (Figura 7) sigue la dinámica descrita por Semmel *et al.* (1990) para materiales fuertemente disturbados; en este sentido Quick Sol® es la enmienda que favorece en mayor medida un descenso marcado de la Dat, lo que corresponde al proceso de friabilización del suelo (Dexter, 1988).

Las curvas de retención de agua presentaron variaciones a lo largo del tiempo, relacionadas con la aplicación de las distintas enmiendas, destacando Pow Humus® en MPC y Quick Sol® en RUG. El suelo RLV no mostró mayor variación en sus contenidos de agua entre  $t_0$  y  $t_6$  donde, si bien hay mayor dispersión de los valores iniciales a tensiones superiores a 1 bar, hacia  $t_6$  no se diferencian mayormente. Esto se asocia a la granulometría del suelo, con dominancia de arena de baja reactividad y poros gruesos. En este sentido, sólo RUG evidenció un aumento en su retención de agua hacia  $t_6$ , considerando todas las tensiones analizadas. Los suelos RLV y MPC, presentaron un leve aumento en su contenido a tensiones superiores a 1 bar, siendo lo óptimo un aumento a tensiones menores, de manera tal que el agua esté disponible para las plantas.

Al revisar los resultados obtenidos en función del tamaño de poros, se evidencian distintas situaciones para cada uno de los tratamientos aplicados.

En general, a lo largo del ensayo los PDR disminuyen en los tres suelos analizados, haciendo que los efectos se pierdan hacia  $t_6$ . Dentro de los suelos analizados, destaca MPC al presentar valores constantes hasta  $t_3$ , disminuyendo hacia  $t_6$ . En cuanto a RLV, sólo se presentan similitudes entre  $t_0$  y  $t_1$ . Por su parte el mayor contenido de PDR se obtiene en  $t_3$  para RUG.

Al observar el comportamiento de los tratamientos sobre los PDL, la situación evidenció que no hubo efecto significativo en los suelos MPC; sin embargo distinta es la situación en el suelo RUG, donde los valores se mantuvieron constantes entre  $t_0$  y  $t_3$ , para disminuir en  $t_6$ , siempre por debajo del testigo, con excepción de la enmienda Pow Humus®. En este caso se estaría frente a la estructuración del suelo RUG, dado que también presentó un

comportamiento similar respecto de los PDR. Ambos son necesarios para el crecimiento de las plantas (Pagliai y Vignozzi, 2002).

RUG no presentó efectos significativos en lo que a los PAU se refiere, no descartándose cualquier cambio en los suelos RLV y MPC. Los valores observados para el suelo RUG, son variables a lo largo del tiempo, presentando un comportamiento similar entre el testigo y Kimelgran®, siendo constante el aumento de los poros de residuales (Pagliai y Vignozzi, 2002). Aquí el comportamiento de las demás enmiendas presenta una disminución hacia  $t_3$  para aumentar hacia  $t_6$ , lo que implica la estructuración y mejor respuesta del suelo RLV y MPC a las enmiendas aplicadas.

De acuerdo con Semmel *et al.* (1990), el reordenamiento de las partículas en agregados individuales puede derivar en el tamaño y distribución de los poros. En un suelo de baja estabilidad estructural, la humectación del suelo favorece el incremento de los poros finos y decrece en el contenido del agua disponible para las plantas y capacidad de aire o poros con aire (Chenu y Plante, 2006). En este caso, en la gran mayoría de los tratamientos los montos observados para los PAI se mantuvieron siempre por debajo del testigo, lo que podría ser un indicio de agregación favorecida por las enmiendas a nivel de clusters de arcilla (De Boodt, 1995)

La estabilidad de agregados tuvo una tendencia a disminuir en el tiempo en todos los casos. La disminución de los valores de VDMA entre  $t_3$  y  $t_6$ , puede considerarse como atribuible a un factor estacional, dado el inicio de las precipitaciones, aumentando entre 3 y 4 veces respecto del valor original, con efectos significativos para los suelos RLV y MPC.

Los tratamientos con menores variaciones entre  $t_1$  y  $t_3$  son los correspondientes a la enmienda Kimelgran®, lo que es deseable si se busca la estabilidad en el comportamiento del suelo dentro de la temporada (Ellies, 1999).

Los cambios en VDMA, asociados a factores estacionales y a cambios en los contenidos de agua a distintas porosidades, se producen por los ciclos de humectación y secado (Semmel *et al.*, 1990). Considerando que los riegos se realizaron hasta el mes de marzo e inicialmente se emularon las condiciones de laboreo para cada uno de los suelos analizados, el aporte de precipitaciones revierte el efecto del secado estival (Pathak *et al.*, 2011). Como señalan estos autores, la MO en estos casos no cumple un rol preponderante en la estabilidad de los agregados, en especial en los macroagregados. Es así como para el suelo MPC la VDMA varió entre  $t_0$  y  $t_6$  aumentando hasta el último mes, no así la MO que se mantuvo en el mismo rango de valores a lo largo del ensayo. En cuanto al suelo RLV, también se apreció un aumento de la VDMA, sin haber un cambio significativo de la MO; de manera similar el suelo RUG no presentó una variación hacia el final del ensayo respecto del contenido de MO, no siendo mayor aporte en la estabilidad de agregados.

Para la estabilidad de microagregados, evaluada como la RD (relación de dispersión), los tratamientos no fueron efectivos en el suelo MPC, aumentando hasta 2 veces su valor inicial, observándose un aumento sostenido de RD en todos los tratamientos de este suelo.

Sin embargo, esto podría deberse a un efecto estacional, dado que también aumenta la RD del testigo (MPCT). Aún cuando el contenido de arcilla es un factor directamente relacionado con la estabilidad de agregados (11,4%), se esperaba en RLV una baja estabilidad en relación a los otros dos suelos; no obstante, fue MPC quien presentó una menor estabilidad concordante con la desestructuración presente en la zona de muestreo.

Se tiene que los valores iniciales de RD en MPCT corresponden a 0,57 ( $t_0$ ), variando a 0,78 al finalizar ( $t_6$ ). Sin embargo, presenta un comportamiento heterogéneo a través de las mediciones, con alzas y bajas en el tiempo. A su vez, los otros cuatro tratamientos presentan el mismo comportamiento a nivel estadístico, no presentando diferencias significativas a lo largo del tiempo entre  $t_0$  y  $t_3$ , diferenciándose en  $t_6$ , donde la menor variación respecto de la medición anterior la presenta MPCQ, quien mantiene sus niveles estables aunque superiores al testigo, a lo largo del ensayo. Ello se condice con el aumento de la dispersión de la arcilla y la disminución de la porosidad gruesa, aumentando la resistencia del suelo (Oades, 1984); también se asocia a los ciclos de humectación y secado, que en esta etapa han aumentado debido a factores estacionales, considerando la fecha de muestreo para  $t_6$  y las condiciones climáticas de los días previos, comparado con los tres muestreos anteriores.

MPCP por su parte, muestra un aumento de la RD significativamente distinto hacia  $t_6$  (de 0,64 en  $t_3$  a 0,82 en  $t_6$ ), siendo necesario estudiar una estrategia de parcialización de esta enmienda si se busca tener algún efecto en el mediano plazo. En un estudio previo (Fernández, 2013) ya se había visto esta pérdida de efectividad hacia el sexto mes con una aplicación única de Pow Humus®. Para el suelo RLV, en cambio, la variación promedio a lo largo del tiempo bordea el 0,5 vs el 0,67 de MPC.

En este caso, aún cuando Aqua Power® es quien presentó los mejores resultados a lo largo del tiempo en cuanto a los datos (con una variación de la RD entre  $t_0$  y  $t_6$  de 0,42 a 0,62 respectivamente) es Quick Sol® quien resulta más efectivo, pues sus valores se mantuvieron constantemente cercanos al testigo e incluso menores a él hacia  $t_6$  (RLVQ=0,59 vs RLVT 0,63).

Por otra parte, en el caso del suelo Rungue, el tratamiento que mostró el mejor resultado fue Pow Humus®, que mantuvo relativamente homogéneos los niveles de estabilidad de microagregados a través del tiempo, por lo que el modo de acción de las distintas enmiendas depende de los grupos funcionales de los ácidos húmicos, los cuales actuarían de manera diferencial según tipo y contenido de arcilla (Chenu y Plante, 2006)

Finalmente, si lo que se quiere es mejorar la estabilidad de microagregados, no debe aplicarse Kimelgran® a suelos con contenidos de arcilla altos, pues si bien hubo un descenso en la RD en  $t_0$ , hubo un aumento sostenido entre  $t_1$  y  $t_6$ , llegando a niveles superiores a los mostrados en el testigo a lo largo de las mismas mediciones.

En cuanto a la resistencia a la penetración (RP), se apreciaron efectos en el tiempo considerando que los niveles observados en  $t_6$  fueron inferiores a los de  $t_0$ . Dada la amplitud

de la variación de los resultados, estadísticamente el efecto tiende a ser nulo, manteniéndose las distintas situaciones por debajo de 2 MPa, considerando crítico para el desarrollo de raíces (Taylor y Brar, 1991). Se observó también un aumento gradual de la RP en profundidad, lo que es esperable en materiales normalmente consolidados, después de estar sometidos a ciclos de humectación y secado homogéneos para todos los tratamientos (Horn *et al.*, 2007). Destaca el suelo RUG, donde el testigo se comporta como material disturbado sin estructuración a lo largo del tiempo, a diferencia de los tratamientos con enmienda, los que igualan su resistencia mostrando una posible estructuración de los suelos (Pagliai y Vignozzi, 2002).

Los análisis obtenidos para el flujo de aire ( $\text{cm h}^{-1}$ ) en el suelo MPC muestran una alta correlación con los PDR para casi todos los tratamientos, manteniéndose o aumentando, disminuyendo sólo en MPCQ, por tanto existiría una suficiente continuidad para asegurar la funcionalidad del suelo (Apéndice II.5)

Por otra parte, en los suelos RLV y RUG, la relación entre poros gruesos y flujo de aire no siempre fue satisfactoria, por lo que no siempre los poros que se están generando tienen la suficiente continuidad para asegurar la funcionalidad del suelo en la renovación del aire de éste al presentar una alta correlación al contrastar los resultados obtenidos en las mediciones de flujo de aire y los PDR, para  $t_0$  y  $t_6$  (Pagliai y Vignozzi, 2002). Esta situación ya ha sido vista por Dörner en suelos Andisoles, en los que, debido al manejo previo y al estado de degradación de la estructura, los ciclos iniciales de humedecimiento y secado generan una alta porosidad gruesa pero una baja capacidad de flujo de aire, gracias a la baja conexión y continuidad de los poros.

Respecto de los resultados para flujo de aire, se señala que se presentaron orificios generados por el control de temperatura y la presencia de lombrices, por lo que la segunda medición ( $t_6$ ) podría tener un error experimental. Los orificios fueron más evidentes en el suelo MPC, en todos sus tratamientos y menos visibles en el suelo RUG, debido a su capacidad de resiliencia y mayor contenido de arcilla.

Al analizar los datos obtenidos de las mediciones de temperatura, se observaron diferencias entre los distintos tratamientos, tanto al realizar mediciones diurnas en invierno y verano, como en el seguimiento semanal y las efectuadas con posterioridad a un riego, hasta condiciones de capacidad de campo.

En cuanto a la variación invierno-verano, se tiene que para los suelos de Rinconada de Lo Vial, sólo RLVA y RLVP podrían considerarse como efectivos, dado que presentan el mismo comportamiento a lo largo del día: menor temperatura en verano y mayor temperatura en invierno, lo que implica mayor aireación y retención de agua en los suelos comparados con el testigo, con la consiguiente capacidad de almacenamiento calórico (Jury *et al.*, 1991)

En el caso del suelo Mapocho, sólo MPCK mantiene menores niveles de temperatura respecto del testigo, estando los demás tratamientos por sobre esta curva (MPCT) en

verano. En invierno la situación es similar en cuanto a la cercanía de las temperaturas de los tratamientos respecto del testigo, pero en esta ocasión es MPCP quien se mantiene bajo MPCT a lo largo del día.

Para el suelo Rungue, la aplicación de enmiendas orgánicas resultó ser poco efectiva en verano, en cuanto a que todas las temperaturas son mayores al testigo; sin embargo, en invierno las temperaturas se mantuvieron inferiores a éste, generando una alta variabilidad anual, ello por la capacidad de las arcillas de retener altos contenidos de aguas, que en verano reduciendo el albedo, favoreciendo el almacenamiento de calor sensible, y en invierno disminuyendo el coeficiente de difusión térmico, restringiendo la absorción de calor (Warrick, 2002). Sin embargo, al observar la variación semanal (febrero-agosto), se tiene que las enmiendas generan menor temperatura en RLV, debido a su textura gruesa, lo que es ventajoso en verano, no así en invierno (Evet, 2002); a su vez, al aumentar el contenido de arcilla desaparece este efecto, tal como se aprecia en RUG, donde en un comienzo la temperatura de los diferentes tratamientos se mantiene por debajo del testigo, para ir nivelándose con él hacia el mes de agosto.

Esto implica que el contenido de agua no presenta un efecto sobre la temperatura de RUG de manera tal que ésta disminuya en el subsuelo; para el caso de RLV, en los meses de verano, sí se nota este efecto, época en la cual es importante tener menor temperatura que el testigo. Para la época de invierno, idealmente debe tenerse una temperatura mayor a la del testigo para evitar que las heladas ingresen en el subsuelo (FAO, 2010), tal como se apreció en la toma de muestra realizada durante el invierno donde la temperatura del suelo llegó a bordear 1°C.

Durante la toma de muestras realizada con posterioridad a un riego, considerando niveles de capacidad de campo (CC), se apreció diferencias entre los distintos suelos, donde RLV presentó temperaturas menores al testigo para todas las enmiendas aplicadas, con excepción de Kimelgran® que mostró un comportamiento similar al testigo. Para el suelo MPC todas las mediciones se mantuvieron cercanas al testigo, a diferencia de Kimelgran®, que nuevamente se destacó de las demás enmiendas, pero esta vez por mantenerse bajo el testigo con hasta 2°C de diferencia. En el caso del suelo RUG, todas las enmiendas presentaron valores por sobre el testigo.

Estas discrepancias se deben a las distintas composiciones de los suelos, pues al aumentar el contenido de arcilla se va perdiendo el efecto de la transmisión de calor, que es mayor en los suelos arenosos mantenidos a capacidad de campo; sin embargo, esta situación se favorece en la temporada de invierno, al mantener mayores temperaturas al testigo, debido a la lenta difusión del calor en el suelo y al aumento del contenido de agua (Jury *et al.*, 1991). A su vez, en ambos suelos se observan diferencias significativas en la variación de la retención de agua en los PDR, aumentando entre  $t_0$  y  $t_6$  para RLV, disminuyendo para RUG en igual período.

Al evaluar la temperatura registrada, diaria y semanalmente en los distintos tratamientos, también se observó la incidencia del contenido de agua, pues conforme el suelo seco se

humedece la conductividad térmica aumenta más rápidamente que la capacidad de calor volumétrica y, en consecuencia, la difusividad térmica se acrecienta. Sin embargo, conforme los poros del suelo se empiecen a llenar de agua, la capacidad calórica volumétrica aumentará más rápidamente que la conductividad térmica y por tanto la difusividad térmica alcanza los valores más altos cerca de la capacidad de campo y después decrece conforme el suelo se satura de agua (FAO, 2010).

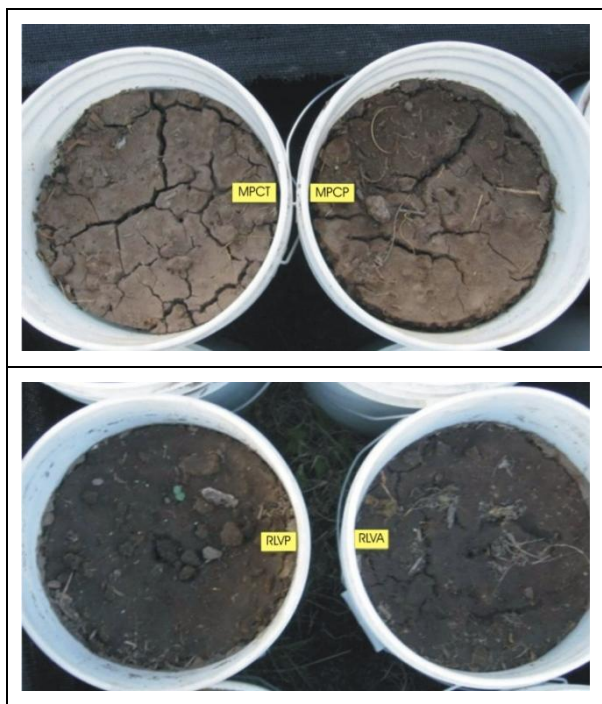
Así, idealmente el suelo debe mantenerse con un contenido de agua en la capa superficial del suelo cercana a CC para maximizar la difusividad (FAO, 2010), de manera tal que la temperatura no sea inferior a la superficie, especialmente si se considera que la capa crítica es aquella de la zona radicular de los cultivos (primeros 10 a 20 cm) y si éstos están con una temperatura superior en épocas de calor, tiende a quemar las raíces, situación inversa en invierno, donde existe la posibilidad de la formación de hielo en el subsuelo si existe agua en niveles superiores a CC, como se observó en las muestras obtenidas en el suelo RLV registrando 0,5 °C para la medición de invierno.

La conductividad térmica depende además, de la textura y la densidad aparente (Evelt, 2002), por tanto para los suelos arenosos como para suelos arcillosos, deben evitarse los suelos secos (FAO, 2010) sin llegar a niveles de saturación.

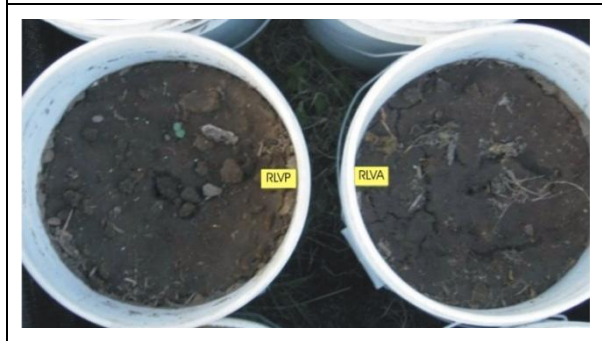
Un factor no considerado dentro de los resultados es la evaluación cualitativa del comportamiento del producto; éstos generan diferencias superficiales claramente visibles entre los distintos suelos, las que destacan por su variabilidad; algunos suelos presentaron grietas, otros una homogeneización de la superficie. Es decir, resulta fundamental realizar evaluaciones morfológicas de los rasgos superficiales de los suelos (figuras 21 a 26), pues permitirían explicar la dinámica del suelo cuando se aplican enmiendas como las analizadas.



**Figura 22.** Rasgos de superficie en suelo Rungue al 4° día de aplicadas las enmiendas Kimelgran® (RUGK) y Aqua Power® (RUGA).



**Figura 23.** Rasgos morfológicos superficiales en el suelo Mapocho acondicionado con Pow Humus® (MPCP) en comparación con el testigo (MPCT), al 4° día de aplicada la enmienda



**Figura 24.** Rasgos de superficie en suelo Rinconada de Lo Vial a 4° día de aplicadas las enmiendas Pow Humus® (RLVP) y Aqua Power® (RLVA).

La enmienda Aqua Power ® generó un recubrimiento de los agregados que favoreció su estabilidad y contracción en el mediano plazo, generando una alta presencia de grietas. Previamente se utilizó en estudios de conservación de suelos (Villaruel, 2010; Traub, 2011), disminuyendo la generación de sedimentos frente a un testigo sin enmienda, pero su acción no es inmediata, sino en un plazo de 1 a 3 meses.

Al cabo de 50 días (21 de marzo, 2011) no se advierten cambios sustanciales en los rasgos morfológicos superficiales de los suelos acondicionados (figuras 24 a 26), pero al tiempo final del ensayo (180 días) las diferencias entre los tratamientos aplicados a un mismo suelo desaparecen, lo que indica que su persistencia en el tiempo es baja y es necesario estudiar la posible parcialización de las aplicaciones.

**Figura 25.** Estado de los tratamientos RUGA (contenedor izquierdo) y RUGQ (contenedor derecho). El estado de friabilidad es levemente distinto, sin embargo se observaron diferencias al tacto.





**Figura 26.** Estado superficial del suelo Mapocho a casi dos meses de aplicadas las enmiendas. El contenedor superior corresponde a MPCA y el inferior a MPCQ.



**Figura 27.** Estado superficial de los tratamientos RLVP y RLVK (contenedor izquierdo y derecho, respectivamente).



## 5. CONCLUSIONES

Las aplicaciones de enmiendas orgánicas no generaron efectos claros sobre las propiedades físicas del suelo, destacando el factor tiempo como el principal agente modificador. Es así como los cambios se observaron entre el primer y tercer mes de iniciado el ensayo, en magnitudes que se relacionan con contenido de arcilla de cada suelo.

Al analizar los contenidos de MO, el suelo Rungue (RUG) resultó ser apto para la actividad biológica, promoviendo un incremento de lombrices y aumentando significativamente el contenido de MO entre los tiempos  $t_3$  y  $t_6$ . En la Serie Rinconada de Lo Vial las enmiendas Pow Humus® y Kimelgran® promovieron un incremento de la MO hacia el final del periodo de estudio.

La Da tuvo un incremento a medida que aumentó el número de ciclos de humectación y secado, generados por las variaciones climáticas, no dependiendo de la aplicación de enmiendas. Sin embargo, esta situación cambia cuando se analiza la distribución de tamaño de poros, donde sí se aprecian diferencias, aumentando sostenidamente el porcentaje de PDR y PAI a través del tiempo, aunque sin diferencias significativas con el testigo.

Ciclos de humectación y secado generan diferencias en la estabilidad de agregados (EA) en el tiempo; sin embargo, a nivel de enmienda también hubo efectos, mejorando la EA en el suelo Rungue tratado con Pow Humus® y Kimelgran®. Para la resistencia a la penetración (RP), en todos los tratamientos se observó un aumento de la RP hasta el tercer mes ( $t_3$ ), para luego disminuir a niveles incluso menores que el nivel inicial ( $t_0$ ); esto respondería a la entrada de la época de invierno, donde existen aporte de agua lluvia con dispersión de suelo, junto con la disminución del efecto de las enmiendas.

Respecto a la temperatura, se tiene que la gran mayoría de los tratamientos presentó temperaturas inferiores al testigo durante la medición de verano y superiores en invierno, excepto en el suelo RUG, en que las enmiendas no generaron diferencias con el testigo.

Finalmente, la utilidad de estas enmiendas orgánicas queda supeditada a una aplicación constante y continua a través del tiempo, dado que en el presente ensayo no se manifestó mayor variación de las propiedades físicas, con excepción del tiempo  $t_3$ . Hacia el sexto mes se pierde todo efecto de manera global en los tratamientos, volviendo a niveles aún inferiores a los evaluados en  $t_0$ .

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Abiven S.; S. Menasseri and C. Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – a literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry* (41): 1-12.
- Barzegar, A.R.; J.M. Oades; P. Rengasamy and R.S. Murray. 1995. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. *Geoderma* (65): 93 – 108.
- Barzegar, A.R.; A. Yousefi and A. Daryashenas. 2002. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physicals properties and yield of wheat. *Plant and Soil* (247): 295 - 301.
- Berryman, C.; D. Davies; C. Evans; M. Harrod; A. Hughes; R. Skinner; R. Swain and D. Soane. 1982. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Techniques for measuring soil physical properties. (Reference Book 441). London, Great Britain. 115 p.
- Blanco-Canqui H. and R. Lal. 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(6):481–504.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2010. Soil Organic Matter (pp: 322 – 356) *In: Elements of the Nature and Properties of Soils*. Pearson A.G. USA. 624 p.
- Bronick, C.J. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* (124): 3-22.
- Brownell J.R.; G. Nordstrom; J. Marihart and G. Jorgensen. 1987. Crop responses from two new leonardite extracts. *The Science of the Total Environment* (62): 491–499.
- Chamen T.; L. Alakukku; S. Pires, C. Sommer; G. Spoor; F. Tijink and P. Weisskopf. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. *Soil and Tillage Research* (73): 161–174.
- Chenu, C.; Y. Le Bissonnais and D. Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* (64): 1479-1486.
- Chenu, C. and A.F. Plante. 2006. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the ‘primary organo-mineral complex’. *European Journal of Soil Science* (57): 596 – 607.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripciones de Suelos, materiales y símbolos. Publicación N° 115. Santiago. 425 p.

Cortés, A. 2011. Estabilización física de camellones con paltos vía enmiendas orgánicas/cultivo de cobertura: IV Región de Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 45 h.

Cuevas, J.; O. Seguel; A. Ellies y J. Dörner. 2006. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal (Journal of Soil Science and Plant Nutrition)* 6(2): 1-12.

Currow R.N. and R.R. Duncan. 2012. Assessment for Salt Movement, Additions, and Retention. (pp: 141-157) *In*: Carrow R.N. and R.R. Duncan (eds). Saline and Sodic Turfgrass Soils Best Management Practices for Assessment and Reclamation. CRC Press-Taylor and Francis Group. Boca Raton, Florida, USA. 443 p.

Dane, J.H. and J.W. Hopmans. 2002. Water Retention and Storage (pp: 671-720) *In*: Dane, J.H. and G.C. Topp (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series N° 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.

De Boodt, M.F., 1995. Models of particle aggregation and their usefulness. *International Agrophysics* (9): 11-17.

D'Acqui L.P.; E. Daniele; F. Fornasier; L. Radaelli and G.G. Ristori. 1998. Interaction between clay microstructure, decomposition of plant residues and humification. *European Journal of Soil Science* (49): 579 - 587.

Dexter, A. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research* (11): 199 - 238.

Dexter, A. 2002. Soil Structure: the Key to Soil Function (pp: 57-69) *In*: Pagliai, M. and R. Jones (Eds.). Sustainable Land Management-Environmental Protection: A Soil Physical Approach. Advances in Geocology (35). Germany. 598 p.

Diacono M. and F. Montemurro. 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development* (30): 401-422.

Di Bonito, M. 2005. Trace Elements in Soil Pore Water: A Comparison of Sampling Methods. PhD thesis. United Kingdom, Nottingham: University of Nottingham. 298 p.

Ellies, A., 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque* (16): 101 - 110.

Ellies, A. 1999. Cambios estructurales y distribución de tensiones en suelos sujetos al tránsito de maquinaria. *Bosque* 20(1): 37 - 45.

Elmholt, S.; P. Schjønning; L.J. Munkholm and K. Debozs. 2008. Soil management effect on aggregate stability and biological binding. *Geoderma* (144): 455 – 457.

EPA (Environmental Protection Agency). 2007. The Use of Soil Amendments for Remediation, Revitalization and Reuse. U.S.A. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation (OSRTI). Solid Waste and Emergency Response (5203P) EPA 542-R-07-013. 52 p.

Evet, S.R. 2002. Water and Energy Balance at Soil-Plant-Atmosphere Interfaces (pp: 127-188). *In: Warrick, A.W. (Ed.). Soil Physics Companion. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 389 p.*

Eynard, A.; T. Schumacher; M. Lindtrom; D. Malo and R. Kohl. 2004. Wettability of soils aggregates from cultivated and uncultivated Ustolls and Usterts. *Australian Journal of Soil Research* (42):163 – 170.

Fernández, P. 2013. Cambio en las propiedades físicas de un suelo con camellones tratado con dos fuentes ácidas, V Región de Chile. Memoria Ingeniera Agrónoma. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, 25 h.

Flint, L. and A. Flint. 2002. Porosity (pp: 241 – 252). *In: Dane, J.H. and G.C. Topp (Eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series N°5. Madison Wisconsin, USA. 1692 p.*

FAO (Food and Agricultural Organization). 2010. Protección Contra las Heladas: Fundamentos, Práctica y Economía. Vol. 1. Serie Sobre el Medio Ambiente y la Gestión de los Recursos Naturales. N° 10, Roma, Italia: 240 p.

Gee, G. and D. Or. 2002. Particle-Size Analysis (pp: 255 – 288). *In: Dane, J.H. and G.C. Topp (Eds) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series N°5. Madison Wisconsin, USA. 1692 p.*

Glinski J.; J. Horabik and J. Lipiec (Eds.). 2011. Encyclopedia of Agrophysics. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 900 p.

Goss M.J. and A. Tubeileh, D. Goorahoo. 2013. A review of the use of organic amendments and the risk to human health. *Advances in Agronomy* (120): 275-379.

Grosbellet, C.; L. Vidal-Beaudert; V. Caubel and S. Charpentier. 2011. Improvement of soil structure formation by degradation of coarse organic matter. *Geoderma* (162): 27-38.

Grossman, R.B. and T.G. Reinsch. 2002. Bulk Density and Linear Extensibility (pp: 201-228). *In: Dane, J.H. and G.C. Topp, G.C. (eds) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series N°5. Madison Wisconsin, USA. 1692 p.*

Hartge, K.H. und R. Horn, 1992. Die Physikalische untersuchung von Böden. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart, Germany. 177 p.

Hayes, M.H.B. and C.E. Clapp. 2001. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Science* (166): 723 – 737.

Haynes R.J. and R. Naidu. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (51): 123–137.

Hirzel J. y F. Salazar. 2011. Uso de enmiendas orgánicas como fuente de fertilización en cultivos (pp: 1-30). Técnicas de conservación de suelos, agua y vegetación en territorios degradados. Curso de acreditación para operadores SIRSD 2011. Series INIA. 322 p.

Hopkins D.W. and E.G. Gregorich. 2005. Carbon as a Substrate for Soil Organisms (pp: 57-79). *In: Bardgett R.D., M.B. Usher and D. W. Hopkins (Eds.). Biological Diversity and Function in Soils.* Cambridge University Press. British Ecological Society. 411 p.

Imbufe, A.U.; A.F. Patti; D. Burrow; A. Surapaneni; W.R. Jackson and A.D. Milner. 2005. Effects of potassium humate on aggregate stability of two soils from Victoria, Australia. *Geoderma* (125): 321–330.

Instituto Nacional de Normalización, Chile. NCh 2880. 2004. Compost - Clasificación y Requisitos. Santiago, Chile: INN, 2004. 19 p.

Jury, W.; W.R. Gardner, W. R. and W.H. Gardner. 1991. Soil Physics. 5<sup>th</sup> Edition John Wiley & Sons, Inc. USA. 328 p.

Kemper, W.D.; R.C. Rosenau and A.R. Dexter. 1987. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperate. *Soil Science Society of America Journal* (51): 860-867.

Koolen, A.J. and H. Kuipers. 1983. Agricultural Soil Mechanics. Advanced Series in Agricultural Sciences 13. Springer-Verlag. Berlin, Germany. 241 p.

Körschens, M. 2006. The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research – a review. *Plant, Soil and Environment* 52 (Special Issue): 1–8.

Lal, R. and M.K. Shukla (Eds.). 2004. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, Inc. New York. USA. 682 p.

Lal R. 2002. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution* (116): 353-362.

Magdoff F. and H. van Es. 2009. Building Soils for Better Crops: Sustainable Soil Management. 3<sup>rd</sup> ed. Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) program, with funding from the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture. Handbook Series Book 10. 294 p.

Marín, E. 2011. Estabilización de camellones con cultivo de mandarina (*Citrus reticulata*) mediante el uso de dos fuentes de materia orgánica, IV Región de Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo, Mención Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 29 h.

Molina, N.C.; M.R. Cáceres and A.M. Pietroboni.. 2001. Factors affecting aggregate stability and water dispersible clay of recently cultivated semiarid soils of Argentina. *Arid Land Research and Management* (15): 77 - 87.

Munkholm, L.J.; P. Schjonning; K. Deboz; H.E. Jensen and B.T. Christensen. 2002. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *European Journal of Soil Science* (53): 129–137.

Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanism and implications for management. *Plant and Soil* (76): 319-337.

Oades, J. M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biochemistry* (5): 35-70.

Oades J. M. and A.G. Waters. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research* (29): 815–828.

Ohsowski, B.M; J.N. Klironomos; K.E. Dunfieldb and M.M. Hart. 2012. The potential of soil amendments for restoring severely disturbed grasslands. *Applied Soil Ecology* (60): 77– 83.

Öztürk, H.S.; C.Türkmen; E. Erdogan; O. Baskan; O. Denigz and M. Parlak. 2005. Effects of a soil conditioner on some physical and biological features of soils: results from a greenhouse study. *Bioresource Technology* (96): 1950-1954.

Pagliai, M. and N. Vignozzi. 2002. The Soil Pore System as an Indicator of Soil Quality (pp 71-82). In: Pagliai, M. and R. Jones. Sustainable Land Management-Environmental Protection: A Soil Physical Approach. Advances in Geocology (35). Gemany. 598 p.

Pagliai, M.; N. Vignozzi and S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research* (79): 131–143

Patel, S.V.; B.A. Golakiya; S.G Savalia and H.P.Gajera. 2008. A Glossary of Soil Sciences. International Book Distributing Co. India. 488 p.

Pathak, P., W. Suhas, R. Sudi. 2011. Long-term effects of management systems on crop yield and soil physical properties of semi-arid tropics of Vertisols. *Agricultural Sciences* (2): 435 – 442.

Peth, S. 2004: Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten – Auswirkungen auf thermische, hydraulische und mechanische Bodeneigenschaften. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde N°64. Kiel, Germany. 160 p.

Puget, P. ; C. Chenu and J. Balesdent. 2000. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science* (51): 595 - 605.

Quilty J.R. and S.R. Cattle. 2011. Use and understanding of organic amendments in Australian agriculture: a review. *Soil Research* (49): 1–26.

Rawls, W.J.; Y.A.Pachepsky; J.C. Ritchie; T.M. Sobecki and H. Bloodworth. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* (116): 61 - 75.

Reynolds, W.D.; B.T., Bowman; C.F. Drury; C.S. Tan and X. Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: Density and storage parameters. *Geoderma* (110): 131–146.

Sadzawka, A.; M. Carrasco; R. Grez y M. Mora. 2004. Métodos de Análisis Recomendados para los Suelos Chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 112 p.

SAG (Servicio Agrícola y Ganadero), Chile. 2008. Guía de Evaluación Ambiental. Aplicación de Residuos Sólidos al Suelo. Versión 3. [Santiago, Chile]: Ministerio de Agricultura - SAG. 19 p.

Semmel, H.; Horn, R.; Hell, U.; Dexter, A.R and Schulze, E.D. 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology* (3): 113 – 129.

Severson R.C. and H.T. Shacklette. 1988. Essential elements and soil amendments for plants: Sources and use for agriculture (Circular 1017), U.S. Geological Survey (USGS). Denver, U.S.A.. 48p.

Shaxson, T.F. 2006. Re-thinking the conservation of carbon, water and soil: a different perspective. *Agronomy for Sustainable Development* (26): 9–19.

Singh A.; N. Parmar; R.C. Kuhad and O. P. Ward. 2011. Bioaugmentation, Biostimulation, and Biocontrol in Soil Biology (pp: 1-23). In: Singh A., N. Parmar y R.C. Kuhad (Eds.),



Bioaugmentation, Biostimulation and Biocontrol. *Soil Biology*, Springer Serie. Vol. 28. 364 p.

Six, J.; E.T. Elliott and K. Paustian. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal* (63): 1350 – 1358.

Six J.; H. Bossuyt; S. Degryze and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* (79): 7–31.

SSGTC (Soil Science Glossary Terms Committee). 2008. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America. 92 p.

Taylor, H.M. and G.S. Brar. 1991. Effect on soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research* (19): 111-119.

Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* (33): 141-163.

Traub, M. 2011. Uso de una emulsión orgánica y mulch como medida de control de erosión en una ladera cultivada con vid, VI Región de Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo, Mención Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 28 h.

Valenzuela, F. 2012. Cambios estructurales mediante el manejo de la materia orgánica en un suelo cultivado con vid en el Valle del Huasco, Región de Atacama, Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo, Mención Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 42 h.

Villaruel, H. 2010. Uso de una emulsión orgánica como control de erosión en laderas con posterioridad al descepe, VI Región de Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 18 h.

Von Lütow M.; I. Kögel-Knabner; K. Ekschmitt; H. Flessa; G. Guggenberger; E. Matzner and B. Marschner. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry* (39): 2183–2207.

**APÉNDICE I**

**Cuadros complementarios**

**Apéndice I.1. Evolución en el tiempo de los poros de drenaje lento ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) en dos suelos de Chile central acondicionados con enmiendas orgánicas.**

<i>Tratamientos</i>	<i>Tiempo (meses)</i>							
	$t_0$		$t_1$		$t_3$		$t_6$	
<i>RLVT</i>	0,138	±0,020	0,144	±0,027	0,141	±0,061	0,144	±0,024
<i>RLVQ</i>	0,132	±0,029	0,138	±0,026	0,162	±0,026	0,150	±0,035
<i>RLVA</i>	0,127	±0,019	0,152	±0,035	0,136	±0,038	0,131	±0,018
<i>RLVP</i>	0,130	±0,024	0,113	±0,039	0,145	±0,021	0,130	±0,005
<i>RLVK</i>	0,116	±0,063	0,114	±0,033	0,129	±0,012	0,133	±0,035
<i>MPCT</i>	0,072	±0,025	0,067	±0,011	0,064	±0,019	0,057	±0,005
<i>MPCQ</i>	0,066	±0,004	0,053	±0,028	0,060	±0,009	0,052	±0,005
<i>MPCA</i>	0,070	±0,017	0,059	±0,018	0,091	±0,073	0,057	±0,004
<i>MPCP</i>	0,059	±0,015	0,072	±0,022	0,067	±0,010	0,052	±0,007
<i>MPCK</i>	0,055	±0,014	0,089	±0,050	0,064	±0,025	0,053	±0,005

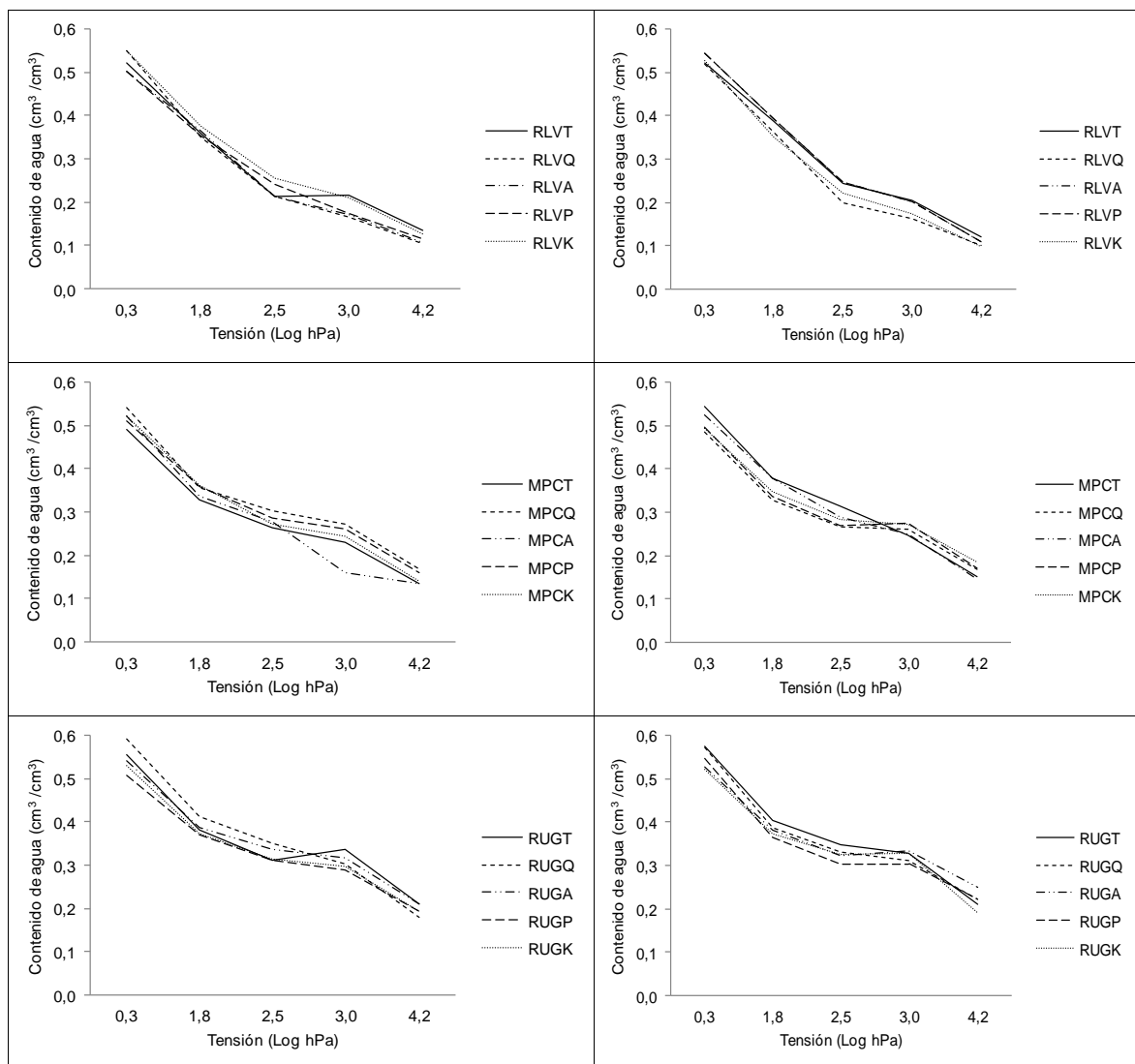
**Apéndice I.2. Evolución en el tiempo de la estabilidad de microagregados (RD), en suelo Rinconada de Lo Vial, Chile central, acondicionado con enmiendas orgánicas.**

<i>Tratamientos</i>	<i>Tiempo (meses)</i>							
	$t_0$		$t_1$		$t_3$		$t_6$	
<i>MPCT</i>	0,57	±0,07	0,62	±0,03	0,63	±0,16	0,78	±0,03
<i>MPCQ</i>	0,70	±0,07	0,63	±0,03	0,57	±0,11	0,76	±0,03
<i>MPCA</i>	0,63	±0,02	0,62	±0,03	0,61	±0,06	0,81	±0,03
<i>MPCP</i>	0,64	±0,11	0,63	±0,06	0,69	±0,04	0,82	±0,04
<i>MPCK</i>	0,64	±0,09	0,64	±0,02	0,61	±0,07	0,76	±0,05

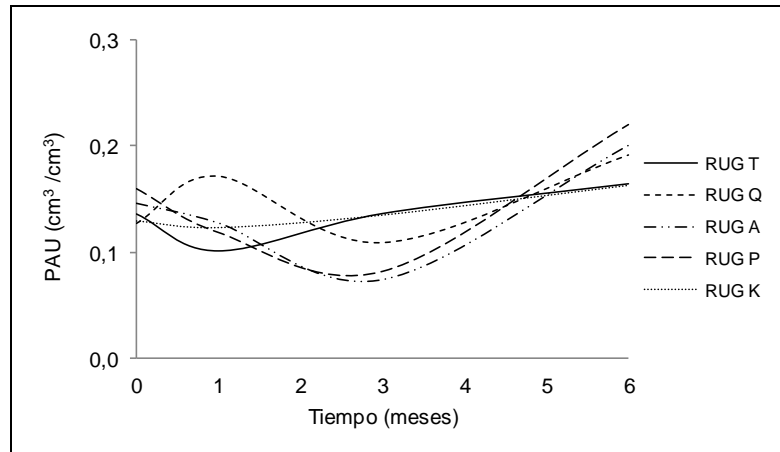
**APÉNDICE II**

**Gráficos complementarios**

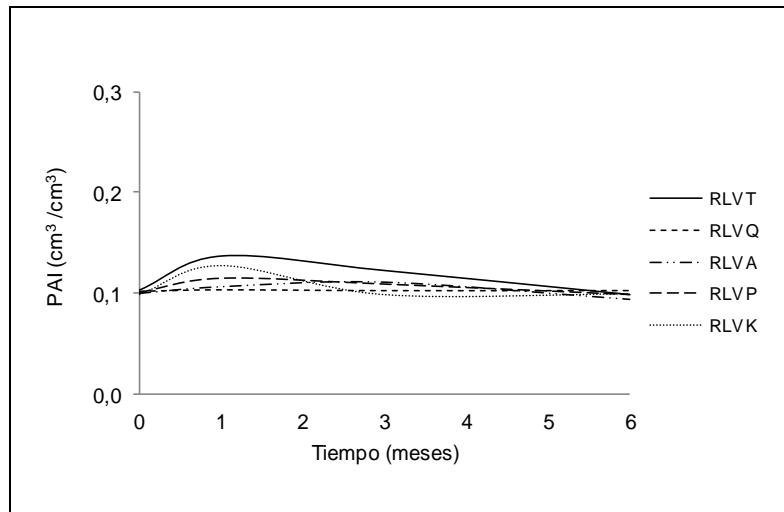
**Apéndice II.1. Evolución de la retención de agua en tres suelos de Chile central, acondicionados con enmiendas orgánicas, a 1 mes (t1, izquierda) y 3 meses (t3, derecha) de aplicadas**



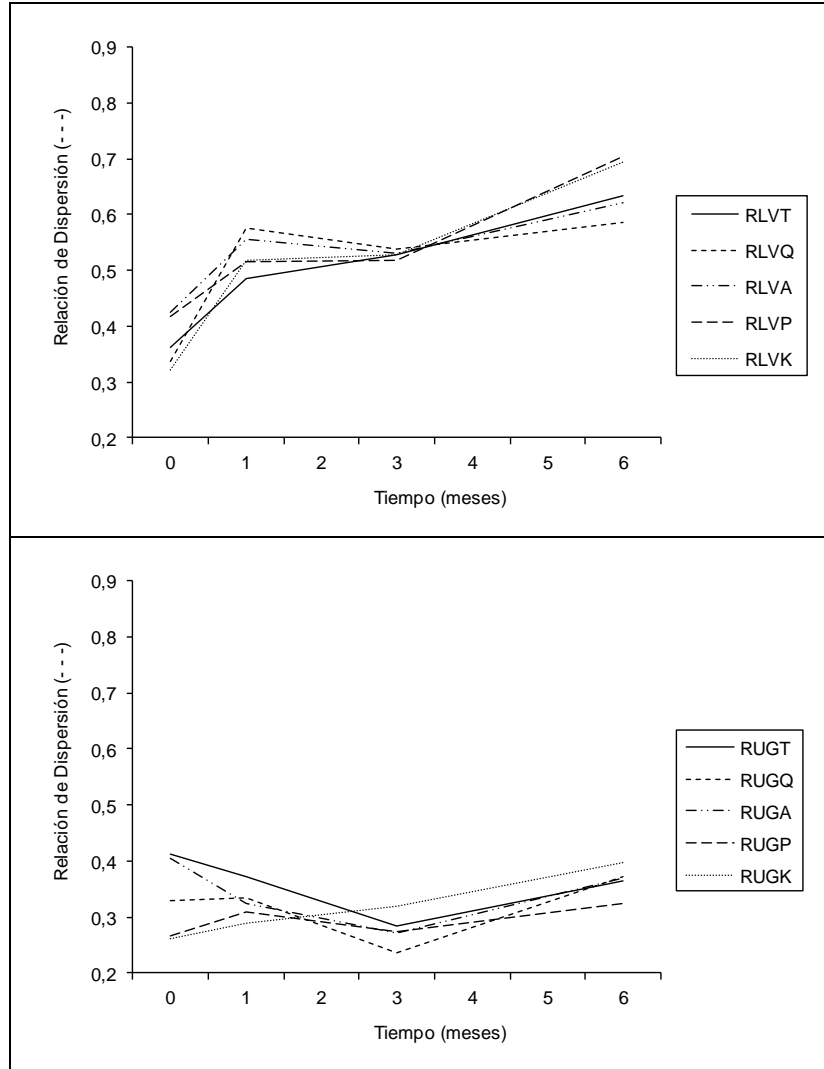
**Apéndice II.2.1 Evolución en el tiempo de los poros de agua útil en el suelo RUG, acondicionado con enmiendas orgánicas.**



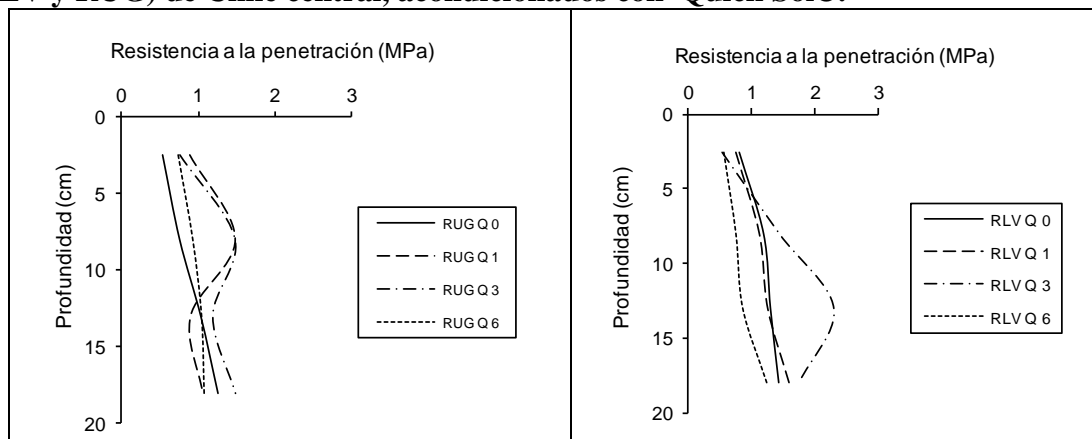
**Apéndice II.2.2. Evolución en el tiempo de los poros de agua inútil en el suelo RLV, acondicionado con enmiendas orgánicas.**



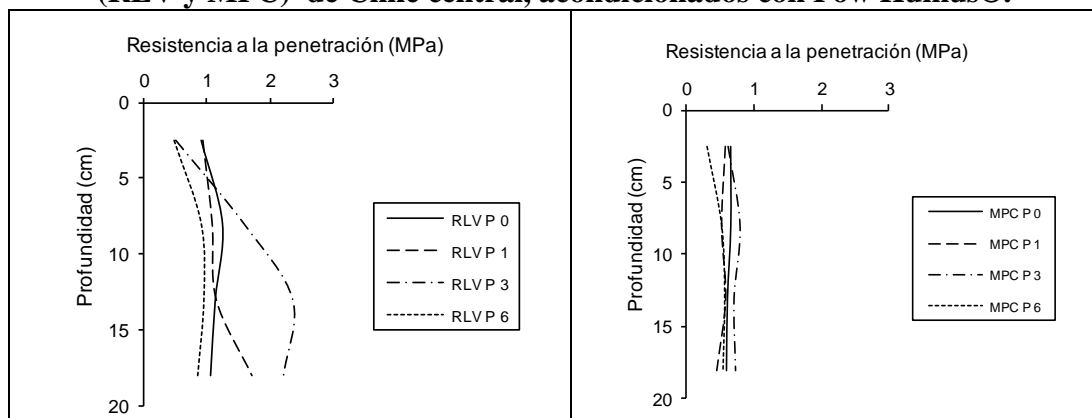
**Apéndice II.3. Evolución en el tiempo de la estabilidad de microagregados en los suelos RLV y RUG, acondicionados con enmiendas orgánicas.**



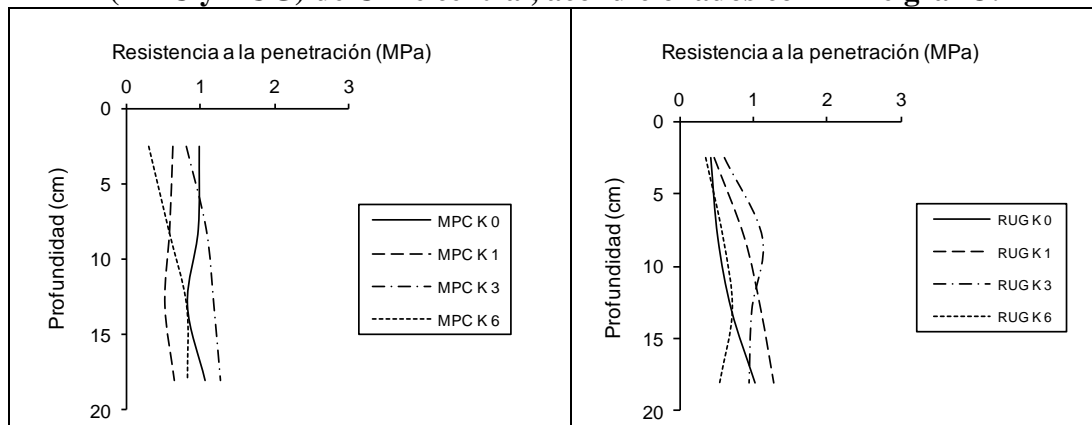
**Apéndice II.4.1. Evolución en el tiempo de la resistencia a la penetración de dos suelos (RLV y RUG) de Chile central, acondicionados con Quick Sol®.**



**Apéndice II.4.2. Evolución en el tiempo de la resistencia a la penetración de dos suelos (RLV y MPC) de Chile central, acondicionados con Pow Humus®.**

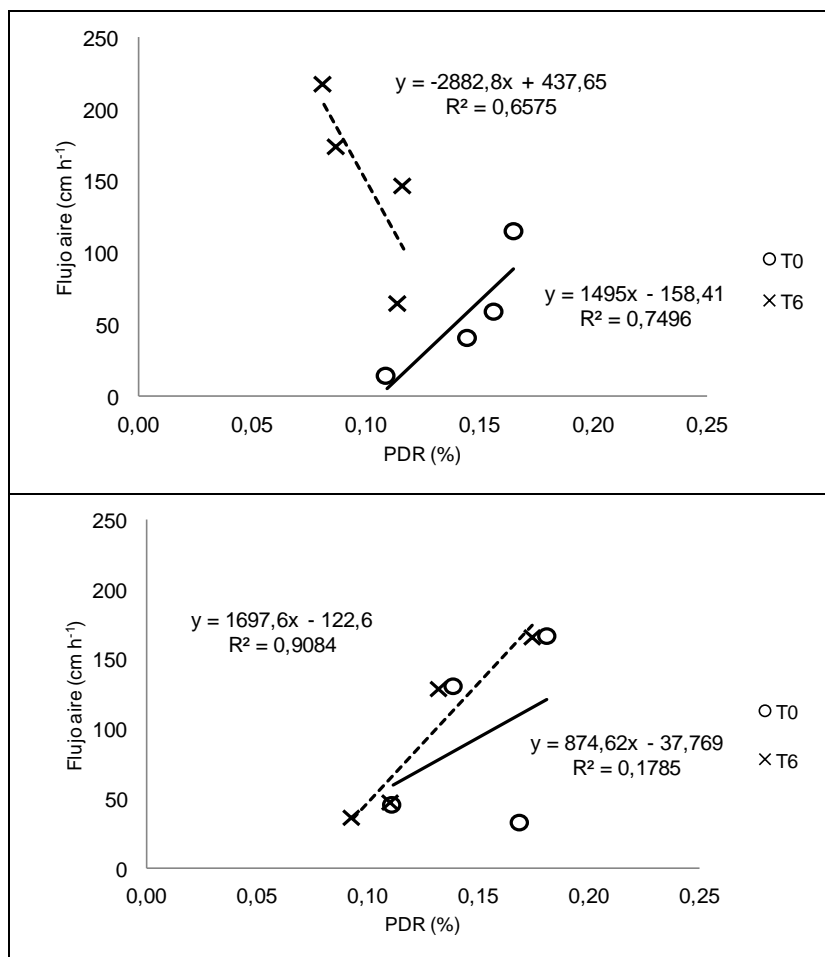


**Apéndice II.4.3. Evolución en el tiempo de la resistencia a la penetración en dos suelos (MPC y RUG) de Chile central, acondicionados con Kimelgran®.**





**Apéndice II.5. Relaciones entre poros de drenaje rápido (PDR) y flujo de aire al inicio ( $t_0$ ) y término ( $t_6$ ) del ensayo con enmienda Kimelgran® en los suelos MPC (izquierda) y RLV (derecha).**



## ANEXO I

## Tipos y características de enmiendas de suelo (EPA, 2007)

Amendment	Availability	Uses	Public Acceptance	Cost	Advantages	Disadvantages
<b>Organics</b>						
Biosolids	Sustainable supply; higher quantities in urban areas	Nutrient source; Organic matter (OM) sorbent <sup>1</sup> properties increase with increasing iron content.	Largely odordriven; Pathogen concerns largely driven by perception.	Materials generally free; Municipalities may pay for transport and use.	Multi-purpose, multibenefit soil amendment; highly cost-effective; EPA regulated <sup>2</sup> ; well characterized consistent quality.	Public concern/public perceptions; high nutrient loadings in some settings; some sources have high moisture content.
Manures	Sustainable supply; Higher quantities near confined animal feeding operations	Nutrient source; OM source.	Well accepted.	Materials generally free; transport and application fee.	Widespread and readily available.	Not consistently regulated <sup>2</sup> ; Variable quality; not routinely treated for pathogen reduction; generally uncharacterized.
Compost	Location-dependent; volumes limited; competing users	Nutrient source; OM source.	Readily accepted.	Product and transport costs can be high.	Readily accepted; stable product; can be used in or near water.	High cost; Limited availability; N quantity usually significantly lower than non-composted materials.
Digestates <sup>3</sup>	New material; very location dependent	Nutrient source; OM source.	May have odor problems.	To be determined; transport and application fee.		New enough so that not regulated <sup>2</sup> ; variable quality; not routinely treated for pathogen reduction; generally uncharacterized.
Pulp Sludges	Material available locally (Northwest and East)	OM source; slope stabilizer.	May have odor problems; may have dioxins; May be nutrient limiting.	Materials generally free; transport and application fee.	High C content; large volumes; locally available.	Highly variable quality; may contain other residuals, e.g., fly ash, waste lime, clay, which can be benefit or detriment for intended use. Total C may not reflect available C. Very low nutrient value.
Yard/Wood Waste	Material available locally	OM source; can be high C; can be used for bulking and structure.	Yard waste can be odorous.	Materials may be free; transport may be partially covered.	May be used to control erosion; variable sizes available.	Large category; High variability; may be hard to obtain; can contain herbicides.

Amendment	Availability	Uses	Public Acceptance	Cost	Advantages	Disadvantages
Ethanol Production Byproducts	New material; very location dependent	Nutrient source; OM source.	May have odor problems.	To be determined; transport and application fee.		New, not regulated <sup>2</sup> ; variable quality; Not routinely treated for pathogen reduction; generally uncharacterized.
<b>pH</b>						
Lime	Widespread	Increase pH; increase Ca.	Highly accepted.	Product, transport and application is \$8-30/ton based on transport distances.	Regulated <sup>2</sup> ; well characterized; very uniform; soil aggregation.	Agricultural limestone has low solubility and can become coated and ineffective at severely acidic sites. Can be source of fugitive dust.
Wood Ash	Locally available	Increase pH; Source of mineral nutrients, Ca, Mg, K; can work for odor control.	Accepted.	Materials generally free; locally variable cover and transport costs.	Acceptance; Cost; Multi-purpose; can limit odor of organic soil amendments.	Highly variable; lime equivalent will vary by burn temperature and age of material; dioxins should not be a problem but tests should be conducted to verify.
Coal Combustion Products	Most available in eastern U.S.	Increase pH; source of mineral nutrients (e.g., Ca).	Variable.	Materials generally free; transport and application fee.	Regulated <sup>2</sup> ; well characterized; soil aggregation; light color reduces surface temperature for seedlings; increases moisture-holding capacity; reduces odor of organic soil amendments.	Varies plant to plant; can be high B and salts; can leach Se and As.
Sugar Beet Lime	Locally available - primarily in west	Increase pH.	Accepted.	Materials generally free; transport and application fee.	More reactive than agricultural limestone.	Potential fugitive dust.
Cement Kiln; Lime Kiln	Locally available	Increase pH; high Ca.	Variable.	Materials can have associated cost; transport and application fee.	Highly soluble and reactive.	Potential fugitive dust; Highly caustic; variable content; may contain contaminants.
Red Mud	Locally available in TX and AR in U.S.	Increase pH; sorbent.	Variable.	Commercial product from a residual under development.	Demonstrated effective in limited testing in Australia and other sites at moderating pH and sorbing metals.	Potentially costly, high salt content; variable CCE.

Amendment	Availability	Uses	Public Acceptance	Cost	Advantages	Disadvantages
Lime-stabilized Biosolids	Locally available	Increase pH; OM and nutrient source; potential sorbent.	See biosolids.	See biosolids.	See biosolids; potential multi-purpose soil amendment.	Can have high odor; lower N content than conventional biosolids; variable lime content.
<b>Mineral</b>						
Foundry Sand	Large quantities locally available	Modifies texture; sorbent.	Variable.	Materials generally free; transport and handling fee.	Good filler; sand replacement.	Can have trace metals, significant Na; only Fe and steel sands currently acceptable.
Steel Slag	Locally available	CCE, sorbent, and Mn fertilizer.	Accepted.	Materials generally free; transport and grinding fee.	Combination of CCE and sorbent, including Mn.	May volatilize ammonia.
Dredged Material	Large quantities locally available	Modifies texture; top soil substitute useful for covering sites.	Variable.	Materials generally free; transport may be paid by generator.	Can be top soil substitute; ideal for blending with other residuals.	Needs dewatering; can have wide range of contaminants; can have Na.
Gypsum	Large quantities locally available	Good for sodic soil; good for low pH soil; good for soil structure.	Variable.	Materials generally free; transport fee.	Improves aggregation; offsets aluminum toxicity.	Different sources of waste gypsum and wide range of potential contaminants, many of which are regulated <sup>2</sup> .
Water Treatment Residuals (WTR)	Available wherever water is treated	Good for binding P; potential sorbent.	Accepted.	Materials generally free; transport costs may be covered by generator.	Moderates P availability when mixed with high P soil amendments.	Different materials have variable reactivities; May contain As and radioactive isotopes.
Coal Combustion Products (CCP)	Available where coal is burned	Sorbent; Improve water-holding capacity; Excellent mix for biosolids; Compost to create cover soil.	Variable.	Materials generally free; transport and application fee.	May have CCE value; large volumes available.	Large quantities generally necessary to achieve benefits; can have contaminants (Se, B, As and metals).

1: Sorbents, describes materials that can hold on to or absorb different contaminants.

2: Regulatory Requirements for Sites Using Selected Soil Amendments

3: Digestate, defined as a general category for organic wastes that have been partially treated through anaerobic digestion.

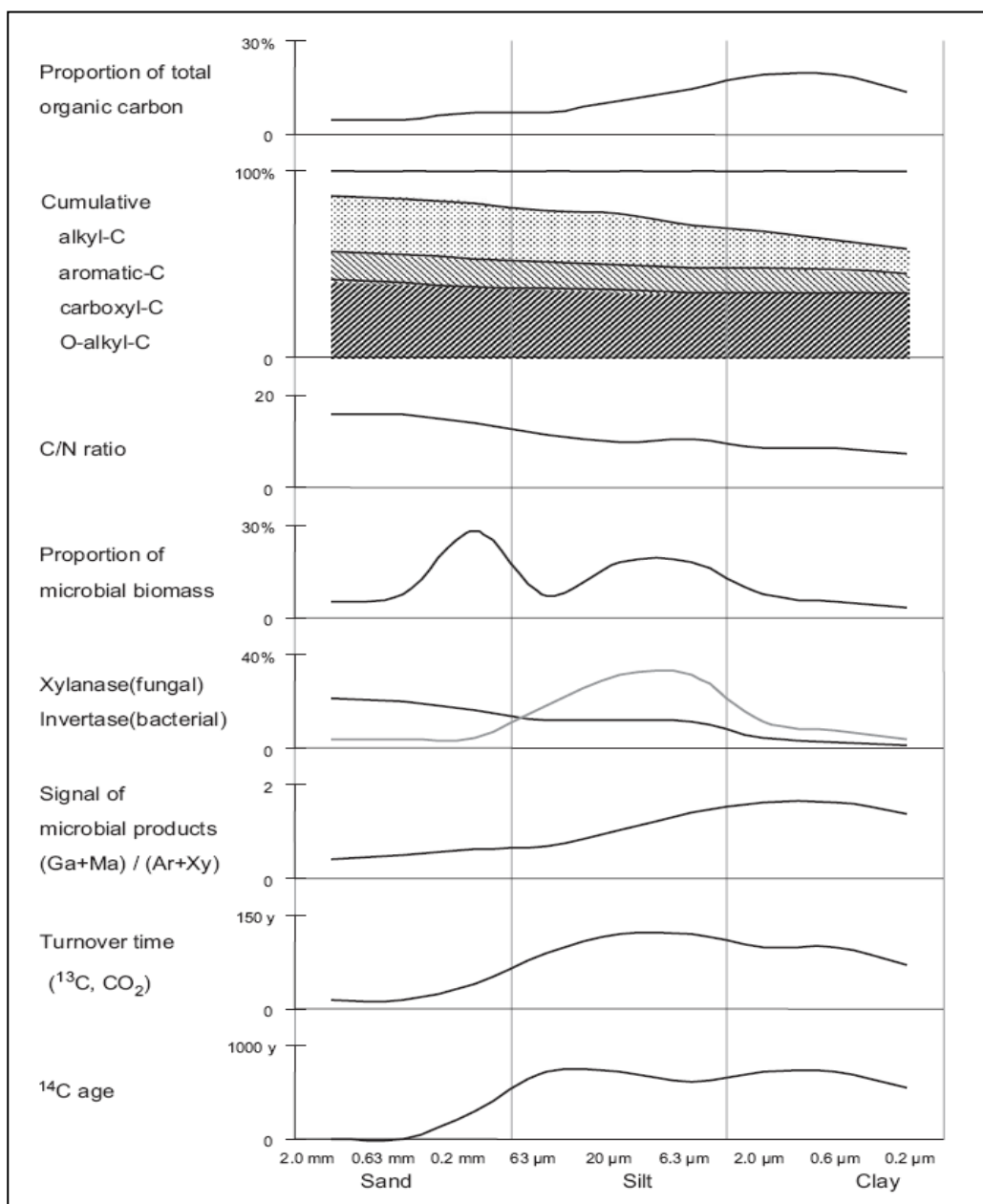
## ANEXO II

**Selección de enmiendas orgánicas fabricadas en Australia para uso agronómico con información obtenida de proveedores y fabricantes (Quilty y Cattle, 2011).**

Product type, recommended rate, estimated cost	Claimed benefits of application of the products
Composts Pelletised products: Application rates 0.075–5 t/ha Cost \$100–\$500/t Non-pelletised products: Application rates 0.5–30 t/ha Cost \$7–\$800/t	Microbial action makes the nutrients and minerals more available to plants. Adds nutrients and organic matter (OM) to the soil which release nutrients slowly. Promotes microbial and earthworm activity and facilitates greater nutrient retention. Humus form which is the base for the production of humic and fulvic acids. Improves soil structure and enhances the soils cation exchange capacity (CEC). Supply of OM, nutrients, and beneficial microbial species. Soil conditioner and economic nutrient supply. Increases carbon in the soil plant growth and yield Enhance suppression of plant diseases
Vermicasts Liquids: Application rates 10–100 L/ha Cost \$1–\$20/L Solids: Application rates 2–50 t/ha Cost \$250–\$1000/t	Contains fulvic and humic acids which hold and penetrate liquids into plant crops. Biologically activated fertiliser used to correct N deficiencies. Increase penetration of N into the plant at extremely high and efficient rates. A soluble plant food with nutrients up to 800% more available than other composts. Biologically active with a host of beneficial aerobic bacteria and fungi. Humic acids release vital minerals within the soil to become available to plants. Concentrated and natural blend of micro and macro nutrients. Promotes vegetative growth, flowering, and fruiting of all plant types. Releases minerals, elements, and plant growth stimulants already existing in the soil. Beneficial bacteria and fungi when applied to plant foliage can reduce pest infestation. A natural, highly concentrated whole plant food. Increased plant disease resistance
Humic substances Liquids: Application rates 1–30 L/ha Costs \$4–\$25/L Solids: Application rates 0.025–1 t/ha Costs \$40–\$800/t	Liquid humic acids and organic catalysts. Increases soil water-holding capacity and reduces erosion potential. Stimulates enzymes and encourages soil microorganisms. Increases cell permeability, root respiration, and nutrient translocation. Increases CEC of the soil and improves soil pH buffering capacity. Improves retention of water soluble fertilisers in the soil. Cellulose and lignite create humic energy in the soil. Stimulates beneficial microbial activity and root growth. Improves nutrient uptake in hydroponic plants. Increased retention and penetration of Ca in soil
Meat, blood and bone meal Liquid products: Application rates 1–30 L/ha Cost \$10–\$30/L Solid products: Application rates 0.1–1.2 t/ha Cost \$800–\$1200/t	Provides a source of N, P, and Ca. Improves soil structure. Promotes beneficial soil microorganisms. Encourages earthworms. Increased plant growth and yield. Balanced supply of N, P, and K. Organic matter including amino acids, albumin, globulin, cholesterol, and Ca. Growth promotants, triconanol and gibberellic acid Reduces waterlogging plant stress. Reduces plant stress recovery time.
Fish hydrolysate Application rates 2–60 L/ha Cost \$15–\$25/L	Organic N, P, K combination based on fish protein formulation technology. Immediately available natural source of nutrients. Promotes beneficial microorganisms and earthworm activity. Promotes greater efficiency of other fertilisers. Higher yields and improved food and nutrient levels for grazing. Contains amino acids, albumin, globulin, cholesterol, humic acid and protein. Manufactured using a low temperature, natural enzyme process. N in peptides and amino acids increase the availability of N. <u>Natural chelating properties</u>
Seaweed extracts Application rate 0.5–20 L/ha Cost \$10–\$30/L	Liquid extract of <i>Eklonia maxima</i> seaweed. Bull kelp ( <i>Durvillaea potatorum</i> ) is composted in a low temperature process. Extract produced using ‘cold cell burst method’. Active ingredients are growth hormones in auxins and cytokinins. Revitalises soil and assists in uptake of key nutrients Increases microbial activity, water retention, root growth and vigour
Bio-inoculants Application rates 1–20 L/ha Cost \$10–\$75/L	Assists in plant stress recovery and reduces nutrient leaching. Contains trace elements, vitamins, amino acids, plant growth hormones, enzymes. Organic plant growth stimulant or soil revitaliser. As a soil drench this creates biological barrier around roots and provides nutrients. Biochemical and biological disease control. Builds soil aggregate structure, improving water-holding capacity. Contains a range of soil microbial organisms which translocate soil nutrients to plants. Liberate plant available N, and improves nutrient retention in the soil. Provides a barrier of beneficial organisms when applied as a foliar spray. Enhances C sequestration and N fixation. Mineralisation of P, K, and trace elements and synthesis of Vitamin B12 through Co. Generates CO <sub>2</sub> which opens up the soil reducing tillage requirements. Crop residues are recycled and beneficial micro-flora are re-established. A microbial soil activator containing bacteria, fungi, yeast and trace elements.

## ANEXO III

**Distribución típica de carbono orgánico en las fracciones de las partículas de los principales suelos de zonas templadas: abundancia, composición, dinámica y relación con los parámetros microbiológicos (von Lutzow et al., 2007)**



## ANEXO IV

## Comparación de sistemas de clasificación de poros (di Bonito, 2005)

Size (m)	Soil system	Functional classification ( $\mu\text{m}$ )	Physical classification		Predominant water phenomena	Size ( $\mu\text{m}$ )	<sup>†</sup> Equivalent water pressure (kPa)
		<i>Greenland and Hayes, 1981</i>	<i>Brewer, 1964</i>	<i>Luxmoore, 1981</i>			
10 <sup>-2</sup>	Spaces as large as these are commonly formed between the clods of newly ploughed soil. Cracks in dry clay soils can reach widths of this order of magnitude.	<b>Transmission pores:</b> air movement and drainage of excess water $d > 50$	Macropores $d > 1000$	Macropores $d > 1000$	Channel flow through profile from surface ponding and/or perched water table	10000	- 0.015
10 <sup>-3</sup> (1 mm)	Pores of about this size and smaller are formed between aggregates of finely tilled soil as for a seed-bed.		Fine Macropores $75 < d < 1000$	Mesopores $10 < d < 1000$		Drainage; hysteresis; gravitational driving force for water dynamics	1000
10 <sup>-4</sup>	Pores between spherical particles 0.65 mm in diameter in closest packing have this size (Dallavalle, 1948). Roots will not extend into rigid pores smaller than this (Wiersum, 1957).	<b>Storage pores:</b> retention of water against gravity and release to plant roots $0.5 < d < 50$	Mesopores $30 < d < 75$	Micropores $d < 10$	Evapotranspiration; matric pressure gradient for water distribution	100	- 1.5
10 <sup>-5</sup>	Pores larger than about 15 $\mu\text{m}$ (corresponding to 9.8 kPa) are drained in most soils that can be said to be at Field Capacity.		Micropores $d < 30 (< 0.5)$	<b>Physico-Chemical classification (adsorption)</b> <i>IUPAC, 2001</i>		10	- 15
10 <sup>-6</sup> (1 $\mu\text{m}$ )	Pores down to this size are accessible to bacteria.	<b>Residual pores:</b> retention and diffusion of ions in solution $0.005 < d < 0.5$	Ultramicropores $0.5 < d < 0.1$	Macropores $d > 0.05$	Capillary condensation; transport	1	- 150
10 <sup>-7</sup>	Water in pores of about this size or larger is available to plants in non-saline soil (correspond to 1500 kPa).			Mesopores $0.002 < d < 0.05$		0.1	- 1500 (PWP#)
10 <sup>-8</sup>	When micropores are treated as slits between parallel plates, about half the pore space in dried aggregates of clay soil can commonly be attributed to plate separations of 10 nm or less (Sills <i>et al.</i> , 1974).	<b>Bonding spaces:</b> support major forces between soil particles $d < 0.005$	Cryptopores $d < 0.1$	Micropores $d < 0.002$	Physisorption; adsorbate-adsorbate and adsorbant-adsorbate interactions	0.01	- 15000*
10 <sup>-9</sup> (1 nm)	Roughly corresponding to the thickness of 3 layers of water molecules on a clay surface.			0.001		- 150000*	

<sup>†</sup>Calculated using equation (2.1); # PWP = Permanent Wilting Point.

\*These values are only indicatives: a different equation should be used above the PWP, and the relative vapour pressure of the soil water included

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por acompañarme en esta nueva travesía.

A Mario, por su paciencia y apoyo en los momentos difíciles.

A los profesores del magister por su comprensión pues, el hecho de no ser agrónoma hizo que muchas veces dudase de mis propias capacidades.

A Hugo Pérez, quien me ayudó con algunas mediciones de laboratorio.

A Manuel Casanova.

A Óscar Seguel, quien con sus consejos logró hacerme entender cuando estaba errada, pasando de ser un profesor más a un amigo.

A mis compañeros del laboratorio, quienes me ayudaron a muestrear: Nidia, Sebastián, José e Ignacio.

Y a todos aquellos que de una u otra manera cooperaron en la concreción de los años de estudio de postgrado, soportándome los malos días, apoyándome en los buenos, ayudándome con los análisis.

¡A todos, muchas gracias y suerte!