

APORTE DE CARBONO ORGÁNICO DE LA LABRANZA CERO Y SU IMPACTO EN LA ESTRUCTURA DE UN ANDISOL DE LA PRECORDILLERA ANDINA CHILENA

NO-TILLAGE ORGANIC CARBON CONTRIBUTION AND EFFECTS ON AN ANDISOL STRUCTURE FROM THE CHILEAN ANDEAN FOOTHILLS

Marco Sandoval-Estrada¹, Neal Stolpe-Lau¹, Erick Zagal-Venegas¹, María Mardones-Flores² y José Celis-Hidalgo³

¹Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Facultad de Agronomía. ²Centro EULA-Chile.

³Facultad de Medicina Veterinaria. Universidad de Concepción, Chile, Casilla 537, Chillán, Chile (masandov@udec.cl).

RESUMEN

El uso intensivo de los suelos derivados de cenizas volcánicas debido al aumento de las actividades agropecuarias, ha generado pérdidas por erosión hídrica creciente en estos suelos que se refleja en una menor producción y aumento en la demanda de insumos agrícolas. Por ello, el objetivo de esta investigación fue evaluar, después de tres años, el estado estructural de un suelo (Typic Haploxerand) sometido a cuatro técnicas de manejo de rastrojos con labranza cero en una rotación trigo-avena: 1) rastrojo quemado (T); 2) rastrojo hilerado (RH); 3) rastrojo parado (RP); y 4) rastrojo picado (RPC). Las variables evaluadas fueron: carbono orgánico del suelo (COS), estabilidad de los agregados mediante el diámetro peso medio (DPM), distribución de agregados estables al agua, conductividad hidráulica saturada (K_s), densidad aparente (D_a) y resistencia a la penetración (R_p). El diseño experimental fue de bloques completos al azar y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados mostraron un bajo DPM (0.20 a 0.28 mm) y un dominio de las fracciones estables al agua menores a 0.25 mm que superaron el 66%, en todos los tratamientos. Esto sugiere que el sistema estructural es susceptible a la degradación física; RP y RPC presentaron mejor estabilidad estructural y una mayor proporción ($p \leq 0.05$) de macroagregados (> 0.25 mm), además de un incremento significativo del COS ($p \leq 0.05$). El tratamiento RPC presentó valores significativamente menores de K_s (0.76 cm h^{-1}), D_a y R_p , lo cual es favorable para la sostenibilidad del sistema estructural del suelo.

Palabras claves: Labranza de conservación, materia orgánica, estabilidad de agregados, suelo.

INTRODUCCIÓN

Los modelos productivos dominantes en la agricultura chilena son los principales responsables de la degradación del recurso suelo. La quema

ABSTRACT

The intensive use of soils derived from volcanic ash, due to an increase in livestock and agricultural activities, has generated losses from increasing water erosion in the soils, which are reflected in lower production and an increase in the demand for agricultural inputs. Therefore, this study was conducted to evaluate, after three years, the structural state of a soil (Typic Haploxerand) subjected to four techniques for managing crop residues under zero tillage in wheat-oat rotation: 1) burned residues (T); 2) residues in rows (RH); 3) standing residues (RP); and 4) chopped residues (RPC). The evaluated variables were soil organic carbon (SOC), aggregates stability measured by mean weight diameter (MWD), distribution of water stable aggregates, saturated water conductivity (K_s), bulk density (D_a), and resistance to penetration (R_p). The experimental design was complete random blocks and means were compared with the Tukey test ($p \leq 0.05$). The results showed a low MWD (0.20 to 0.28 mm) and a dominance of water stable fractions smaller than 0.25 mm that was above 66% in all of the treatments. This suggests that the structural system is susceptible to physical degradation; RP and RPC had better structural stability and a higher proportion ($p \leq 0.05$) of macroaggregates (> 0.25 mm), as well as a significant increase in SOC ($p \leq 0.05$). The treatment RPC had significantly lower values of K_s (0.76 cm h^{-1}), D_a and R_p , which is favorable for sustainability of the soil structural system.

Key words: Conservation tillage, organic matter, aggregate stability, soil.

INTRODUCTION

The dominant agricultural production models are the main factors responsible for the degradation of the soil resource. Burning crop residues, use of the plow, and the natural slopes of the crop lands favor deterioration of these edaphic systems. Accelerated erosion in Chile began more than a century ago as a consequence of grain production. Today, erosion affects an area of 47 300 000 ha, equivalent

Recibido: Junio, 2007. Aprobado: Diciembre, 2007.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 42: 139-149. 2008.

de los rastrojos, el uso del arado, sumado a las pendientes naturales de los terrenos de cultivo favorecen el deterioro de estos sistemas edáficos. La erosión acelerada en Chile comenzó hace más de un siglo, como consecuencia de la producción de cereales. Hoy afecta a una superficie de 47 300 000 ha, lo que equivale a 60% del territorio nacional, y se concentra principalmente en las zonas áridas y semiáridas entre las regiones I y VIII y en las zonas subhúmedas secas de las regiones XI y XII (Pérez y González, 2001). El resultado de la degradación del suelo se manifiesta en la pérdida de las propiedades físicas, químicas y biológicas necesarias para la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres (Ellies, 2000; Lupwayi *et al.*, 2001).

La estructura del suelo es un factor clave en el sistema edáfico y en la habilidad del suelo para sostener la biota (Bronick y Lal, 2005). La estabilidad de los agregados es un indicador de la estructura del suelo (Six *et al.*, 2000) y es el resultado del arreglo de las partículas, floculación y cementación (Duiker *et al.*, 2003). La agregación se mide a través del carbono orgánico del suelo (COS), la biota, los puentes iónicos, arcilla y carbonatos (Bronick y Lal, 2005). La COS actúa como un núcleo central en la formación de los agregados del suelo; la biota y sus productos orgánicos contribuyen al desarrollo de la estructura del suelo (Chan *et al.*, 2003). La formación de carbonatos secundarios es importante en la dinámica de la agregación en suelos áridos y semi-áridos, pero la estructura es fundamental para la mayoría de los suelos y se puede cuantificar mediante la estabilidad de los agregados del suelo (Bronick y Lal, 2005). La estabilidad estructural del sistema suelo varía con los cambios de contenido de MO y prácticas de manejo (Six *et al.*, 2000).

Oades y Waters (1991) establecieron un orden jerárquico en la estructura de los suelos la cual presenta macroagregados (>0.25 mm) y microagregados (<0.25 mm). La estabilidad de los primeros varía con los cambios de contenido de MO y por las prácticas de manejo, debido a que los agregados son estabilizados transitoriamente por agentes como raíces, hifas y polisacáridos derivados de plantas y microorganismos (Bronick y Lal, 2005). El aumento en las operaciones de labranza de los suelos disminuye el C en los macroagregados (Six *et al.*, 2000). Además, la MO joven y más lábil es contenida principalmente en los macroagregados y menos en los microagregados (Jastrow *et al.*, 1996). En cambio, la estabilidad de los microagregados es menos sensible a las prácticas de manejo y al contenido de MO (Tisdall y Oades, 1982). Esto sugiere que el manejo de los suelos puede favorecer o disminuir la formación de distintos tamaños de agregados, afectando negativa o positivamente la estabilidad estructural del suelo, y por

to 60% of the national territory, and is concentrated principally in the arid and semiarid zones between regions I and VIII and in the dry subhumid zones of the regions XI and XII (Pérez and González, 2001). The result of soil degradation is manifest in the loss of physical, chemical and biological properties, which are necessary for sustainability of land ecosystems (Ellies, 2000; Lupwayi *et al.*, 2001).

Soil structure is a key factor in edaphic systems and the ability of the soil to sustain the biota (Bronick and Lal, 2005). Aggregate stability is an indicator of soil structure (Six *et al.*, 2000) and is a result of particle arrangement, flocculation and cementation (Duiker *et al.*, 2003). Aggregation is measured by means of soil organic carbon (SOC), the biota, ionic bridges, clay, and carbonates (Bronick and Lal, 2005). SOC acts as a central nucleus in the formation of soil aggregates, while the biota and their organic products contribute to the development of soil structure (Chan *et al.*, 2003). Formation of secondary carbonates is important in the dynamics of aggregation in arid and semiarid soils, but structure is fundamental for most of the soils and can be quantified through the stability of soil aggregates (Bronick and Lal, 2005). Structural stability of the soil system varies with changes in the OM content and with management practices (Six *et al.*, 2000).

Oades and Waters (1991) established a hierarchical order in soil structure, which have macroaggregates (>0.25 mm) and microaggregates (<0.25 mm). Stability of the first varies with changes in the OM content and with management practices since the aggregates are temporarily stabilized by agents such as roots hyphae and polysaccharides derived from plants and microorganisms (Bronick and Lal, 2005). An increase in tillage operations decreases C in the macroaggregates (Six *et al.*, 2000). In addition, young, more labile OM is contained more in the macroaggregates and less in microaggregates (Jastrow *et al.*, 1996), while stability of the microaggregates is less sensitive to management practices and OM content (Tisdall and Oades, 1982). This suggests that soil management can favor or decrease the formation of different aggregate sizes, affecting soil structural stability negatively or positively and, therefore, general sustainability of the system (Carter *et al.*, 2003). A decrease in macroaggregates contributes to increasing greenhouse effect gases because of organic C mineralization and favors soil erosion processes (Gupta and Germida, 1988; Sandoval *et al.*, 2003).

In Chile zero tillage is more advantageous than traditional tillage in soils derived from volcanic ash (Peña *et al.*, 1994; Rodríguez *et al.*, 2000). Chilean farmers have incorporated zero tillage in their present

tanto la sostenibilidad general del sistema (Carter *et al.*, 2003). La reducción de los macroagregados contribuye al aumento de los gases efecto invernadero por la mineralización de C orgánico y favorece los procesos erosivos de los suelos (Gupta y Germida, 1988; Sandoval *et al.*, 2003).

En Chile hay mayores ventajas de la labranza cero sobre la labranza tradicional en suelos derivados de cenizas volcánicas (Peña *et al.*, 1994; Rodríguez *et al.*, 2000). Los agricultores chilenos han incorporado la labranza cero en sus actuales sistemas productivos en suelos Andisols de la precordillera andina, pero con quema de rastrojos como una práctica habitual. Por tanto, la hipótesis de este trabajo es que la degradación del suelo tiene relación directa con la pérdida de su estructura y si se utiliza la labranza cero en combinación con ciclaje de los rastrojos, aumenta la incorporación de C al suelo y mejora su estructura. El objetivo de este estudio fue evaluar el estado estructural de un suelo derivado de cenizas volcánicas, después de tres años con distintos manejos de rastrojos agrícolas con labranza cero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del ensayo y tratamientos

El ensayo se hizo en un suelo de origen volcánico (Typic Haploxerand) en la comuna de El Carmen (36° 53' S y 71° 56' O) en un sector de la Precordillera Andina de la Región del Biobío, Chile. Estos suelos se han desarrollado en un régimen de temperatura térmico y de humedad xérico, con más de 100 d de déficit hídrico, y corresponden a la serie Santa Barbara. Son suelos poco evolucionados, formados sobre cenizas volcánicas recientes depositadas sobre substrato fluvio-glaciales, profundos a muy profundos, bien drenados, de texturas medias (franco limosas), y una topografía de lomajes con pendientes de 8 a 15% (Stolpe, 2006). Su mineralogía está dominada por minerales de ordenamiento de rango corto y son parte de la secuencia de meteorización que va desde materiales de suelo férrico, pasando por un horizonte vítrico y que termina en un horizonte ándico (Casanova *et al.*, 2007). Los suelos de esta serie presentan haloisitas y alófanos (Besoain y Sepúlveda, 1985). Este suelo se ha usado para la producción de cereales o forestación con pino insigne y eucalipto, por más de 100 años (Stolpe, 2006). El 76% de los suelos volcánicos de la zona de estudio presentan erosión entre moderada a muy severa (Peña *et al.*, 1994).

De 2000 a 2003 se compararon cuatro sistemas de manejo de suelo bajo labranza cero: 1) rastrojo quemado (T); 2) rastrojo hilerado (RH): el rastrojo es amontonado en hileras de 2 m de anchura a lo largo de la parcela, dejando franjas de 10 m de anchura entre hileras con poco rastrojo; al año siguiente los residuos de las hileras se distribuyen de nuevo con una picadora horizontal; 3) rastrojo parado (RP): el rastrojo se deja intacto a la altura de corte de la cosechadora; 4) rastrojo picado (RPC): el residuo vegetal es trozado

productivo systems in the Andisols of the Andean foothills, but burning crop residues is a habitual practice. Therefore, the hypothesis of this study is that soil degradation has a direct relationship with the loss of structure, and if zero tillage is used in combination with recycling crop residues, incorporation of C into the soil increases and its structure improves. The objective of this study was to evaluate the structural state of a soil derived from volcanic ash after three years with no tillage and different crop residue management systems.

MATERIALS AND METHODS

Trial location and treatments

The test was conducted in a volcanic soil (Typic Haploxerand) in the El Carmen Commune (36° 53' S and 71° 56' W) in a sector of the Andean foothills of the Biobío Region, Chile. These soils have developed under thermic temperature and xeric moisture regimes, with more than 100 d of water deficit, corresponding to the Santa Barbara series. These are little evolved soils formed on volcanic ash recently deposited on fluvio-glacial substrate; they are deep to very deep, well-drained, medium-textured (silty loam), with a topography of hills with slopes of 8 to 15% (Stolpe, 2006). Its mineralogy is dominated by short-range ordered minerals and is part of the weathering sequence that goes from ferri soil, passing through a vitric horizon, and ending in an andic horizon (Casanova *et al.*, 2007). The soils of this series have haloisites and alofanes (Besoain and Sepúlveda, 1985). This soil has been used for the production of cereals or for forestation with insigne pine and eucalyptus for more than 100 years (Stolpe, 2006). Seventy-six percent of the volcanic soils of the study area are moderately to severely eroded (Peña *et al.*, 1994).

From 2000 to 2003 four soil management systems under zero tillage were compared: 1) burning crop residues (T); 2) crop residues in rows (RH), in which the crop residues are piled into 2 m wide rows the length of the field with a hay rake, leaving 10 m between rows with little crop residues; after a year the crop residues are again distributed with a horizontal drill; 3) standing crop residues (RP): stalks are left intact at cutting height of the harvester; 4) chopped crop residue (RPC): plant residues are chopped into pieces with a horizontal chopper and scattered on the surface. Seeds and fertilizers were deposited in a narrow (2 cm width) furrow. Each experimental unit was 2000 m² and was replicated four times. Some average physical and chemical properties of the site at the beginning of the experiment are shown in Table 1.

Crop rotation was wheat (*Triticum aestivum* L.) and oats (*Avena sativa* L.). For wheat, seeding rate was 180 kg h⁻¹ and one application of fertilizer of 210 kg ha⁻¹ N, 150 kg ha⁻¹ P₂O₅ and 134 kg ha⁻¹ K₂O. For oats, seeding rate was 180 kg ha⁻¹ and one application of fertilizer of 210 kg ha⁻¹ N, 150 kg ha⁻¹ P₂O₅ and 134 kg ha⁻¹ K₂O.

con una picadora horizontal, y se esparcen en la superficie. Para la siembra se depositó la semilla y fertilizantes en un surco delgado (2 cm anchura). Cada unidad experimental tuvo 2000 m² y se usaron cuatro repeticiones. Algunas propiedades físicas y químicas promedio del sitio al inicio del ensayo se muestran en el Cuadro 1.

La rotación de cultivos fue trigo (*Triticum aestivum* L.) y avena (*Avena sativa* L.). Para trigo la dosis de semilla fue 160 kg ha⁻¹ y las dosis de fertilización fueron 170 kg ha⁻¹ N, 119 kg ha⁻¹ P₂O₅ y 35 kg ha⁻¹ K₂O. Para la avena se usó 180 kg ha⁻¹ de semilla y fertilización de 210 kg ha⁻¹ N, 150 kg ha⁻¹ P₂O₅ y 134 kg ha⁻¹ K₂O.

Recolección y preparación de las muestras de suelo

Se recolectaron 16 muestras inalteradas de suelo por tratamiento y por profundidad evaluada: 0-5 cm, 5-10 cm y 10-15 cm, para conservar la estructura natural del suelo. Las muestras de suelo se secaron en horno (40 °C) por 24 h y pasaron por un tamiz de 4.5 mm (Le Bissonnais, 1996). Se transfirieron 100 g por muestra a un conjunto de tamices de diferentes diámetros (2, 1, 0.5, 0.25 y 0.05 mm) ordenados de mayor a menor; los tamices se sumergieron 30 min en agua y se agitaron a 25 ciclos min⁻¹ (Yoder, 1936). El porcentaje de agregados por tamaño se calculó de la masa seca de los agregados que quedaron en cada tamiz. El diámetro peso medio (DPM) se determinó según Kemper y Rosenau (1986). El COS se determinó mediante combustión húmeda de la MO con una mezcla de dicromato y ácido sulfúrico; la absorbancia de la mezcla resultante del exceso de dicromato no usado en la oxidación de la MO y el dicromato reducido se midió colorimétricamente (Metson *et al.*, 1979). La conductividad hidráulica saturada de campo (K_s) se determinó usando el permeámetro Guelph, modelo 2800K1 (Soil Moisture Equipment, Santa Bárbara, California). Esta variable de conductividad hidráulica se usa para evaluar el efecto del manejo sobre la estructura del suelo (Dörner y Dec, 2007; Sandoval *et al.*, 2007a). Se hicieron 16 mediciones por tratamiento y se calculó K_s (Reynolds *et al.*, 1985):

$$K_s = \left(\frac{H_1 \cdot C_2}{\pi \cdot (2 \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + a^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))} \right) \cdot \left(X \cdot R_2 - \frac{X \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot H_2}{H_1 \cdot C_2} \right)$$

donde, K_s es la conductividad hidráulica saturada (cm h⁻¹); H_1 y H_2 es la altura de carga a 5 y 10 cm; a es el radio estandarizado del orificio donde se hacen las mediciones con el instrumento (3 cm); C_1 y C_2 son factores adimensionales dependientes de H_1/a y H_2/a ; R_1 y R_2 son las tasas de condición constante correspondientes a H_1 y H_2 (cm s⁻¹); X es una constante del reservorio (cm²), característica del instrumento usado.

La densidad aparente (D_a) del suelo se calculó como el cociente entre la masa de suelo seco a 105 °C (M_{ss}) y el volumen total (V_t)

Collection and preparation of soil samples

Sixteen unaltered soil samples were collected per treatment and evaluated depth: 0-5 cm and 10-15 cm, to conserve the natural structure of the soil. Soil samples were dried in an oven (40 °C) for 24 h and screened with a 4.5 mm mesh (Le Bissonnais, 1996). Of each sample 100 g were transferred to a set of sieves of different diameters (2, 1, 0.5, 0.25 and 0.05 mm) ordered from largest to smallest. The sieves were submerged in water for 30 min and shaken at 25 cycles min⁻¹ (Yoder, 1936). The percentage of aggregates by size was calculated from the dry mass of the aggregates that were left on each sieve. Mean diameter weight (MDW) was determined according to Kemper and Rosenau (1986). SOC was determined by wet combustion of OM with a mixture of dichromate and sulfuric acid; absorbance of the resulting mixture of excess unused dichromate in the oxidation of OM and reduced dichromate was measured by colorimetry (Metson *et al.*, 1979). Saturated water conductivity (K_s) was determined using the Guelph permeameter, model 2800K1 (Soil Moisture Equipment, Santa Barbara, California). This water conductivity variable is used to evaluate the effect of management on soil structure (Dörner and Dec, 2007; Sandoval *et al.*, 2007a). Sixteen measurements per treatment were performed, and K_s was calculated (Reynolds *et al.*, 1985):

$$K_s = \left(\frac{H_1 \cdot C_2}{\pi \cdot (2 \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + a^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))} \right) \cdot \left(X \cdot R_2 - \frac{X \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot H_2}{H_1 \cdot C_2} \right)$$

where, K_s is saturated water conductivity (cm h⁻¹); H_1 and H_2 are height of the head to 5 and 10 cm; a is the standardized radius of the hole where measurements are taken with the instrument (3 cm); C_1 and C_2 are adimensional factors that depend on H_1/a and H_2/a ; R_1 and R_2 are the constant condition rates corresponding to H_1 and H_2 (cm s⁻¹); X is a constant of the reservoir (cm²) characteristic of the instrument used.

Soil bulk density (D_a) was calculated as the quotient between the soil mass dried at 105 °C and the total volume this soil mass occupies without alteration and was determined with the cylinder method (Blake and Hartge, 1986). This allowed determination of the percentage of pores (P_t), where D_a is the mean value:

$$D_a = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad P_t = 1 - \frac{D_a}{2.65}$$

Resistance to penetration was measured using a cone penetrometer (30°) *in situ* for each treatment and for each evaluated depth: 0-5 cm, 5-10 cm and 10-15 cm (Bradford, 1986). This variable allowed detection of textural screens (or plow foot) caused by agricultural implements, which can affect the properties of mass flow and gas exchange in volcanic soils (Broquen *et al.*, 2004) and, together with

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas promedio del suelo (Typic Haploxerand) al inicio del ensayo (año 1999).
Table 1. Initial average physical and chemical properties of the soil (Typic Haploxerand) (year 1999).

Profundidad cm	textura	D _a g cm ⁻³	pH	C g kg ⁻¹	N P K		
					mg kg ⁻¹		
0 - 5	Franco limoso	0.72	5.7	78.9	49	23	436
5 - 10	Franco limoso	0.76	5.5	69.0	16	9	203
10 - 30	Franco limoso	0.78	5.7	45.2	15	6	175
30 - 60	Franco limoso	0.85	5.6	7.0	4	2	60

que ocupa esta masa de suelo sin alterar, y se determinó mediante el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986). Esto permitió determinar el porcentaje de poros (P_t), donde D_a es el valor medio:

$$D_a = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad P_t = 1 - \frac{D_a}{2.65}$$

La resistencia a la penetración se midió usando un penetrometro de cono (30°) *in situ* por tratamiento y por cada profundidad evaluada: 0-5 cm, 5-10 cm y 10-15 cm (Bradford, 1986). Esta variable permite detectar pantallas texturales (o pie de arado) debido al uso de herramientas agrícolas, que pueden afectar las propiedades de flujo de masa e intercambio gaseoso en suelos volcánicos (Broquen *et al.*, 2004), el que junto con la D_a son recomendados para determinar efectos en la estructura de los suelos (Horn *et al.*, 2007). Para corregir la alta variabilidad se incorporaron más mediciones con el mismo instrumento (n=48).

Análisis estadístico

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se hizo un análisis de varianza y se usó la prueba de comparación de medias Tukey (p≤0.05) (SAS, 1999) y los valores fueron normalizados según la ecuación (x+0.5)^{0.5}.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución de los agregados estables al agua muestra que ninguno de los tratamientos y profundidades estudiadas presentaron agregados mayores o iguales a 2 mm, predominando los menores a 0.25 mm con valores entre 66.5 a 77.5% (Cuadro 2). Esto indica que estos suelos volcánicos de precordillera andina presentan en forma natural una fragilidad estructural que favorece la erosión y compactación. Sandoval *et al.* (2007b) reportaron un predominio de macroagregados (>66%) en suelos volcánicos chilenos de la misma área de este estudio, pero del valle central. Esta diferencia se explica por la génesis de los suelos volcánicos, que a su vez depende de la edad de las cenizas volcánicas, del clima, de la vegetación dominante, y de la evolución mineralógica (Torn *et al.*, 1997). Estos resultados aportan un nuevo antecedente

D_a, is recommended to determine effects on soil structure (Horn *et al.*, 2007). To correct high variability, more measurements were incorporated with the same instrument (n=48).

Statistical analysis

The experimental design was complete random blocks with four replications. An analysis of variance was performed and means were compared with Tukey (p≤0.05) (SAS, 1999). Values were normalized by the equation (x+0.5)^{0.5}.

RESULTS AND DISCUSSION

The distribution of water stable aggregates shows that none of the treatments or depths studied had aggregates larger than or equal to 2 mm, and those smaller than 0.25 mm predominated with percentages of 66.5 to 77.5% (Table 2). This indicates that these volcanic soils of the Andean foothills have a natural structural fragility that favors erosion and compaction. Sandoval *et al.* (2007b) reported that macroaggregates (>66%) predominated in Chilean volcanic soils of the same study area, but in soils of the central valley. This difference is explained by the genesis of volcanic soils, which depends on the age of the volcanic ash, climate, dominant vegetation, and mineralogical evolution (Torn *et al.*, 1997). Our results contribute a new element to consider in the dynamics of formation and evolution of Andisols.

MDW values were low (0.02 to 0.28 mm), indicating a weak structural stability. According to Le Bissonais (1996), MDW values between 0.2 to 0.3 mm corresponded to a very unstable structural state. Nevertheless, the RP and RPC treatments had significantly higher MDW values than the T and RH treatments within the first 10 cm, while in the depth of 10 to 15 cm, the RP treatment had the highest value (p≤0.05).

The highest MWD values and the highest proportion of macroaggregates where those with greater contributions of crop residues (RP and RPC), suggesting an effect of OM in increasing structural stability. Therefore, the studied soil is

Cuadro 2. Distribución de agregados estables al agua, suma agregados ($\Sigma \geq 0.25$ mm) y diámetro peso medio (DPM) para los distintos tratamientos con labranza cero estudiados.**Table 2. Distribution of water stable aggregates, sum of aggregates ($\Sigma \geq 0.25$ mm) and mean weight diameter (DPM) for the different zero tillage treatment studied.**

Tratamientos [¶]	% [§]					$\Sigma \geq 0.25$	DPM mm
	$\geq 2^{\dagger}$	2-1 [†]	1-0.5 [†]	0.5-0.25 [†]	< 0.25 [†]		
(0-5 cm)[§]							
T	0.0	6.58	14.81	4.30	74.31	25.69c	0.22d
RH	0.0	7.55	16.83	6.28	69.31	30.69b	0.24c
RP	0.0	12.65	16.41	4.42	66.52	33.48a	0.28a
RPC	0.0	10.30	15.97	5.99	67.73	32.26ab	0.26b
CV (%)						3.69	2.97
(5-10 cm)[§]							
T	0.0	7.39	13.39	6.70	72.51	27.48c	0.23c
RH	0.0	6.58	14.85	5.23	73.32	26.58c	0.22c
RP	0.0	11.52	15.85	5.38	67.23	32.76a	0.27a
RPC	0.0	9.80	13.47	6.99	69.71	30.28b	0.25b
CV (%)						4.19	3.03
(10-15 cm)[§]							
T	0.0	9.19	14.45	5.25	71.10	28.90b	0.24b
RH	0.0	5.42	14.0	4.80	77.90	22.70c	0.20c
RP	0.0	11.36	15.18	5.16	68.29	31.71a	0.27a
RPC	0.0	5.15	11.47	6.08	77.29	25.69c	0.20c
CV (%)						3.30	1.85

[†]Abertura tamiz (mm). [§]Profundidad de suelo. [¶]Labranza cero con: rastrojo quemado (T), rastrojo hilerado (RH), rastrojo parado (RP) y rastrojo picado (RPC). Medias con distinta letra en una columna por profundidad son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

en la dinámica de la formación y evolución en suelos Andisols.

Los valores de DPM mostraron valores bajos (0.20 a 0.28 mm), indicando una estabilidad estructural débil. Según Le Bissonais (1996), valores de DPM entre 0.2 a 0.3 mm corresponderían a un estado estructural muy inestable. No obstante, los tratamientos RP y RPC presentaron valores significativamente ($p \leq 0.05$) mayores de DPM respecto a los tratamientos T y RH, dentro de los primeros 10 cm de profundidad, mientras que entre 10 a 15 cm, el tratamiento RP tuvo el mayor valor ($p \leq 0.05$).

Los mayores valores de DPM y mayor proporción de macroagregados correspondieron a los tratamientos con más aporte de rastrojos (RP y RPC), lo que sugiere un efecto de la MO en el incremento de la estabilidad estructural. Por tanto, el suelo estudiado es muy susceptible a la degradación física, dada su naturaleza. Estudios realizados en suelos volcánicos en la zona del ensayo y cultivados con labranza tradicional por más de 100 años, muestran un marcado efecto erosivo que no es fácil de identificar dada su profundidad y homogeneidad del perfil, típicos de estos suelos, registrándose pérdidas anuales de 15 t ha^{-1} (Peña *et al.*, 1994) y 20 t ha^{-1} (Rodríguez *et al.*, 2000). El predominio de microagregados detectado en este trabajo, junto a la topografía de lomaje y a las precipitaciones invernales

very susceptible to physical degradation by its very nature. Studies conducted on volcanic soils of the study area cultivated with traditional tillage for more than 100 years show marked effects of erosion. This is not easily identifiable given the depth and homogeneity of the profile, that is typical for these soils; annual losses are reported at 15 t ha^{-1} (Peña *et al.*, 1994) and 20 t ha^{-1} (Rodríguez *et al.*, 2000). The predominance of microaggregates detected in this study, together with the hilly topography and intense winter precipitation in the zone, favor water erosion of these soils.

The RH, RP and RPC treatments had significantly higher percentages of macroaggregates than T in the first 5 cm. Deeper (5-10 cm), the RP and RPC treatments had a higher percentage of macroaggregates ($p \leq 0.05$) than treatments T and RH. Between 10 and 15 cm, only RP had a percentage of macroaggregates significantly higher ($p \leq 0.05$) than the other treatments. This indicates that crop residues tend to favor the formation of macroaggregates when they remain on the soil. This would be due to an increase in SOC in the first 5 cm (Table 3), where burned crop residues (T) had significantly lower levels ($p \leq 0.05$) of organic C than the treatments in which residues were cycled and more than 74% microaggregates. The treatments in which crop residues were left on the

intensas en la zona, favorecería la erosión hídrica de estos suelos.

Los tratamientos RH, RP y RPC presentaron porcentajes de macroagregados significativamente mayores que T, en los primeros 5 cm de profundidad. A mayor profundidad (5-10 cm) los tratamientos RP y RPC tuvieron un mayor porcentaje ($p \leq 0.05$) de macroagregados que los tratamientos T y RH. Entre 10 a 15 cm, sólo RP tuvo un porcentaje de macroagregados significativamente mayor ($p \leq 0.05$) que los demás tratamientos. Esto indica que los rastrojos tienden a favorecer la formación de macroagregados cuando permanecen en el suelo, lo cual se debería a un aumento del COS en los primeros 5 cm (Cuadro 3), donde el rastrojo quemado (T) tuvo niveles significativamente menores ($p \leq 0.05$) de C orgánico que los tratamientos con ciclaje de residuos y con 74% de microagregados. Los tratamientos que dejaron los residuos vegetales sobre la superficie del suelo presentaron un mayor contenido de COS ($p \leq 0.05$), particularmente el tratamiento RPC. Aunque este aumento significativo de COS ocurrió sólo en los primeros 5 cm, se vislumbra la importancia del ciclaje de residuos como una práctica sostenible en el tiempo, en concordancia con Bronick y Lal (2005). Además, se han reportado pérdidas de MO en suelos volcánicos chilenos de $2.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ con labranza tradicional y quema de rastrojos (Rodríguez *et al.*, 2000), lo cual demuestra que el ciclaje de rastrojos mejora el contenido de C en el suelo y disminuye las pérdidas de suelo por erosión hídrica (Peña *et al.*, 1994).

El aumento en la intensidad de cultivos reduce el C en los macroagregados y con ello su estabilidad (Six *et al.*, 2000; Sandoval *et al.*, 2007b). No es posible explicar los resultados obtenidos considerando sólo el aumento del COS, pues si bien hay un mayor contenido de COS en los tratamientos RH y RPC a mayor profundidad, éstos no difirieron significativamente de los tratamientos T y RH (Cuadro 3). El aporte de MO joven y más lábil sirve como fuente primaria de C a la biomasa microbiana y fungosa del suelo, importantes en la formación de macroagregados (Gupta y Germida, 1988; García-Oliva *et al.*, 2004). De hecho, el tratamiento RP generó más macroagregados hasta los 15 cm estudiados, lo cual podría explicarse debido al efecto positivo que generaría la permanencia de los tallos en pie, respecto de las condiciones ambientales como la temperatura y humedad, favoreciendo la actividad de los microorganismos. Bronick y Lal (2005) señalan que los macroagregados pueden formarse mediante la acumulación de microagregados, alrededor de MO particulada y núcleos de bacterias alrededor de las raíces. En suelos Andisols de la zona del presente estudio se encontraron los mayores contenidos

soil surface had a higher content of SOC ($p \leq 0.05$), especially treatment RPC. Although this significant increase in SOC occurred only in the first 5 cm, the importance of cycling crop residues can be seen as a sustainable practice over time, in concordance with Bronick and Lal (2005). Furthermore, losses of $2.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ OM from Chilean volcanic soils have been reported with traditional tillage and burning crop residues (Rodríguez *et al.*, 2000), which shows that recycling crop residues improves C content in the soil and reduces soil loss from water erosion (Peña *et al.*, 1994).

The increase in cropping intensity reduces C in macroaggregates and, thus, their stability (Six *et al.*, 2000; Sandoval *et al.*, 2007b). It is not possible to explain the results obtained considering only the increase in SOC since, although there is a higher content of SOC in treatments RP and RPC at greater depth, these do not differ significantly from treatments T and RH (Table 3). Young, more labile OM is a primary source of C, contributing to microbial and fungal biomass in the soil, important in the formation of macroaggregates (Gupta and Germida, 1988; García-Oliva *et al.*, 2004). Indeed, the RP treatment generated more macroaggregates up to the depth of 15 cm, the study limit. This could be explained by the positive effect that would be generated by leaving the stalks standing, relative to environmental conditions such as temperature and humidity, favoring microbial activity. Bronick and Lal (2005) state that macroaggregates can form by the accumulation of microaggregates on particulate OM and bacterial nuclei on the roots. In the Andisol soils of the study area, higher contents of arbuscular mycorrhizae have been found under zero tillage than under traditional tillage (Borie *et al.*, 2003). Mycorrhizogenic arbuscular fungi generate glomalin, which contributes to soil aggregate stabilization (Rillig

Cuadro 3. Contenido (g kg^{-1}) de carbono orgánico del suelo (COS) en los distintos tratamientos con labranza cero. Table 3. Soil organic carbon (SOC) content (g kg^{-1}) in the different zero tillage treatments.

Tratamientos [†]	Profundidad (cm)		
	0-5	5-10	10-15
T	79.0c	67.3a	43.6a
RH	81.7b	66.8a	43.7a
RP	86.6a	68.3a	44.0a
RPC	87.1a	68.1a	43.4a
CV (%)	2.14	2.46	3.61

[†] Labranza cero con: rastrojo quemado (T), rastrojo hilerado (RH), rastrojo parado (RP) y rastrojo picado (RPC). Medias con distinta letra en una columna por profundidad son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

de micorrizas arbusculares en manejo de labranza cero con respeto a labranza tradicional (Borie *et al.*, 2003). Los hongos micorrizógenos arbusculares generan glomalina que contribuye a la estabilización de los agregados del suelo (Rillig *et al.*, 2002). Al respecto, Graham *et al.* (2002) señalan que buenas condiciones de humedad, temperatura y aportes de biomasa aumentan el ritmo del ciclo de la MO en el suelo.

Los rendimientos de avena y trigo en las tres temporadas de rotación de cultivos, así como el tipo y cantidad de rastrojos presentes en las tres temporadas de rotación se muestran en el Cuadro 4. En los cultivos de trigo y avena se obtuvieron menores rendimientos con RH, lo cual se debió a que la superficie sin siembra equivale a 8% del total. Si bien la labranza cero con quema (T) tuvo un mayor rendimiento en los primeros 2 años, esta situación se invierte al tercer año, con respecto a los tratamientos RP y RPC. Aunque no se produjo una baja en los rendimientos con labranza cero y rastrojos en la superficie, es recomendable observar los efectos de la adición de MO a largo plazo.

El tratamiento RPC presentó un valor de K_s (0.76 cm h^{-1}) significativamente menor ($p \leq 0.05$) en relación con los otros tratamientos (Cuadro 5). Esto se debería al aumento de COS en los primeros centímetros del suelo producto del aporte de rastrojos, lo cual coincide con lo encontrado por Sandoval *et al.* (2007a) quienes asociaron mayores valores de COS a menores valores de K_s . Además, la labranza de conservación produce un aumento de poros pequeños y los rastrojos en la superficie reducen la evaporación (Figuroa y Morales, 1992); en consecuencia, una mayor proporción de poros pequeños disminuye la K_s .

Cuadro 4. Rendimiento de grano (t ha^{-1}) y niveles de rastrojos aportados por temporada para los tratamientos con labranza cero: rastrojo quemado (T), rastrojo hilerado (RH), rastrojo parado (RP) y rastrojo picado (RPC).

Table 4. Grain yield (t ha^{-1}) and levels of residues contributed per season for the zero tillage treatments: burned residues (T), residues in rows (RH), standing residues (RP) and chopped residues (RPC).

Cultivo-(años) [†]	T	RH	RP	RPC
Avena-(2000-2001)				
Rendimiento grano	5.8	5.2	4.9	4.9
Cantidad rastrojo [‡]	-	3.5	7.7	7.7
Trigo-(2001-2002)				
Rendimiento grano	6.8	5.4	6.5	6.7
Cantidad rastrojo [‡]	-	3.7	7.4	6.8
Avena-(2002-2003)				
Rendimiento grano	4.7	4.6	5.1	5.1
Cantidad rastrojo [‡]	-	3.2	6.7	6.1

[†] Cultivo según rotación y periodo correspondiente.

[‡] Cantidad de rastrojo del cultivo anterior (t ha^{-1}).

et al., 2002). In this regard, Graham *et al.* (2002) state that good moisture and temperature conditions plus contributions of biomass increase the OM cycle rhythm in the soil.

Oat and wheat yields in the three crop rotation seasons, as well as the type and quantity of residues present in the three rotation seasons, are shown in Table 4. Lower yields of wheat and oats were obtained with RH because an area equivalent to 8% of the total was not sown. Although zero tillage with residue burning (T) had higher yields in the first 2 years, the situation is the inverse in the third year, compared with the RP and RPC treatments. Even though yields did not drop with zero tillage and residues left on the surface, it is recommended that the effects of the addition of OM be observed in the long term.

The RPC treatment had a K_s value (0.76 cm h^{-1}) significantly lower ($p \leq 0.05$) than the other treatments (Table 5). This would be due to the increase in SOC in the first few centimeters of the soil, product of the contribution made by residues. This coincides with the findings of Sandoval *et al.* (2007a), who associated higher SOC values with lower K_s values. Conservation tillage also produces an increase in small pores, and residues on the surface reduce evaporation (Figuroa and Morales, 1992). Consequently, a larger proportion of small pores decrease K_s .

From the environmental standpoint, moderate K_s values can be considered favorable since nutrients decrease their downward movement within the soil profile, thus reducing risk of polluting underlying groundwater (Bronick and Lal, 2005).

Likewise, the RPC treatment was different ($p \leq 0.05$) from the rest of the treatments in terms of soil quality structural indicators such as bulk density

Cuadro 5. Valores medios de conductividad hidráulica saturada (K_s), densidad aparente (D_a), resistencia a la penetración (R_p) y porosidad total (P_t), para los distintos tratamientos con labranza cero estudiados (0-15 cm de profundidad).

Table 5. Mean values for saturated water conductivity (K_s), bulk density (D_a), resistance to penetration (R_p) and total porosity (P_t) for the different zero tillage treatments studied (depth 0.15 cm).

Tratamientos [†]	K_s (cm h^{-1})	D_a (g cm^{-3})	R_p (MPa)	P_t (%)
T	1.32a	0.69a	1.56a	74.0
RH	1.23a	0.70a	1.52a	73.6
RP	1.33a	0.66a	1.49a	75.1
RPC	0.76b	0.61b	1.24b	77.0
CV (%)	35.5	5.8	8.2	

[†] Labranza cero con: rastrojo quemado (T), rastrojo hilerado (RH), rastrojo parado (RP) y rastrojo picado (RPC). Medias con distinta letra en una columna por profundidad son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Desde el punto de vista ambiental, valores de K_s moderados pueden considerarse como favorables pues los nutrientes disminuyen su movimiento descendente dentro del perfil del suelo, reduciendo el riesgo de contaminación de las napas profundas (Bronick y Lal, 2005).

De la misma manera, el tratamiento RPC fue diferente ($p \leq 0.05$) a los demás tratamientos, con relación a los indicadores de calidad estructural del suelo como densidad aparente (D_a), resistencia a la penetración (R_p) y porosidad total (P_t). Estas diferencias deben interpretarse como favorables, puesto que menores valores de D_a y R_p en RPC, indican un menor grado de compactación del suelo y una estructura más favorable. Los valores de P_t muestran que el tratamiento RPC presenta la mayor cantidad de espacio poroso dentro de la matriz del suelo. Esto se explica debido a que coincide con el mayor nivel de COS alcanzado (Cuadro 3), pues el C es importante para la porosidad (Thomsen *et al.*, 1999). La labranza de conservación en suelos volcánicos produce un aumento de poros pequeños (Figuroa y Morales, 1992) que favorecen la retención de agua y protegen la MO del ataque microbiano (Bronick y Lal, 2005). Esto coincide con Rachman *et al.* (2003), quienes indican que la MO promueve la retención de agua en el suelo debido a su naturaleza coloidal, favoreciendo su porosidad.

El valor K_s (0.76 cm h^{-1}) obtenido con el tratamiento RPC se debe interpretar como una condición favorable en situaciones de escasez de agua para la actividad biológica que sostiene el sistema suelo (Poulenard *et al.*, 2001).

CONCLUSIONES

El suelo estudiado (Typic Haploxerand) se caracteriza por una estabilidad estructural frágil. Este problema se acentúa con el uso de prácticas agrícolas no sostenibles, como la quema de los rastrojos que reduce el COS, el tamaño y la estabilidad de los agregados, favoreciendo la erosión hídrica en estos suelos de lomaje. Considerando los resultados de este estudio, los tratamientos RP y RPC son las alternativas más promisorias para un manejo estructural sostenible en estos suelos de lomaje.

La introducción de prácticas agronómicas como labranza cero combinada con la permanencia de rastrojos en la superficie del suelo, favorecen la estabilidad estructural y aumentan el contenido de carbono en el suelo. Ambas técnicas combinadas, labranza cero y permanencia de rastrojos en superficie, posibilitan la sostenibilidad de estos suelos volcánicos, especialmente la labranza cero que deja los rastrojos picados y dispersos en la superficie del suelo. Además, el ciclaje

(D_a), resistencia to penetration (R_p) and total porosity (P_t). These differences should be interpreted as favorable given that lower D_a and R_p values in RPC indicate a lower degree of soil compaction and a more favorable structure. The P_t values show that the RPC treatment has more pore space in the soil matrix. This is explained by its coincidence with the higher SOC level (Table 3), and C is important for porosity (Thomsen *et al.*, 1999). Conservation tillage in volcanic soils produces an increase in small pores (Figuroa and Morales, 1992) that favor water retention and protect OM from microbial attack (Bronick and Lal, 2005). This coincides with Rachman *et al.* (2003), who state that OM promotes water retention in the soil due to its colloidal nature, which favors porosity.

The K_s value (0.76 cm h^{-1}) obtained with the RPC treatment should be interpreted, in situations of water scarcity, as a condition favorable to biological activity that sustains the soil system (Poulenard *et al.*, 2001).

CONCLUSIONS

The soil studied (Typic Haploxerand) is characterized by fragile structural stability. This problem is accentuated with the use of non-sustainable agricultural practices such as burning crop residues which reduces SOC and aggregate size and stability, thus favoring water erosion in these hillside soils. Considering the results of this study, the treatments RP and RPC are promising alternatives for sustainable structural management in these hillside soils.

The introduction of agronomic practices such as zero tillage combined with leaving residues on the soil surface favors structural stability and increases soil carbon content. The two techniques, zero tillage and residues on the surface, combined, make sustainability of these volcanic soils possible, especially zero tillage with chopped residues scattered on the soil surface. In addition, cycling plant residues on the soil increases carbon capture with the positive implications of helping to mitigate the problem of global warming.

—End of the English version—



de residuos vegetales en el suelo aumenta la captura del carbono con las implicancias positivas de ayudar a mitigar el problema del calentamiento global.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parte de la tesis del autor principal en el programa de Doctorado en Ciencias Ambientales del Centro EULA

de la Universidad de Concepción, la que fue financiada por el proyecto FONDEF D99I-1081.

LITERATURA CITADA

- Blake, G. R., and K. H. Hartge. 1986. Bulk Density. *In*: Klute, A. (ed). Methods of Soil Analysis, Part I. Agronomy Monographs, 9. American Society Agronomy, Madison, WI. pp: 363-375.
- Besoain, E. M., y G. Sepúlveda. 1994. Composición mineralógica de las arcillas ($<2\mu$) de algunas series de suelos volcánicos de la región central-sur de Chile. *In*: Tosso, J. (ed). Suelos Volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile. pp: 215-256.
- Borie, F., R. Rubio, y J. Rouanet. 2003. Cero labranza y actividad de las micorrizas arbusculares. *In*: Vidal, I. (ed). Manejo Sustentable de Suelos, Sociedad Chilena de Ciencias del Suelo, Boletín No. 19, Chillán, Chile. pp: 7-16.
- Bradford, J. M. 1986. Penetrability. *In*: Klute, A. (ed). Methods of Soil Analysis, Part I. Agronomy Monographs, 9. American Society Agronomy, Madison, WI. pp: 463-477.
- Bronick, C. J., and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Broquen, P., G. Falbo, F. Candan, V. Pellegrini, y J. Girardin. 2004. Resistencia a la penetración de un Humic Vitrikerand y un Vitrandic Haploxeroll con diferentes usos. *Agro Sur* 32: 16-27.
- Carter, M., H. Kunelius, J. Sanderson, J. Kimpinski, H. Platt, and M. Bolinder. 2003. Productivity parameters and soil health dynamics under long-term 2-year potato rotations in Atlantic Canada. *Soil Tillage Res.* 72: 153-168.
- Casanova, M., W. Luzio, y R. Maldonado. 2007. Correlación entre World Referente Base y Soil Taxonomy para los suelos de la VII región del Maule de Chile. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 7: 14-21.
- Chan, K. Y., D. P. Heenan, and H. B. So. 2003. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: a review. *Aust. J. Exp. Agric.* 43: 325-334.
- Dörner, J., y D. Dec. 2007. La permeabilidad del aire y conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización funcional de los poros del suelo. *R. C. Suelo Nutr. Veg.* 7: 1-13.
- Duiker, S. W., F. E. Rhoton, J. Torrent, N. E. Smeck, and R. Lal. 2003. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 606-611.
- Ellies, A. 2000. Soil erosion and its control in Chile: an overview. *Acta Geologica Hispanica* 3-4: 271-278.
- Figueroa, B., y F. J. Morales. 1992. Manual de Producción de Cultivos con Labranza de Conservación. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 273 p.
- García-Oliva, F., M. Oliva, and B. Sveshtarova. 2004. Effect of soil macroaggregates crusing on C mineralization in tropical deciduous forest ecosystem. *Plant and Soil* 259: 297-305.
- Graham, M., R. Haynes, and J. Meyer. 2002. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biol. Biochem.* 34: 93-102.
- Gupta, U., and J. Germida. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 20: 777-786.
- Horn, R., K. H. Hartge, J. Bachmann, and M. B. Kirkham. 2007. Mechanical stresses in soils assessed from bulk-density and penetration-resistance data sets. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:1455-1459.
- Jastrow, J. T., Boutton, and R. Miller. 1996. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 801-807.
- Kemper, W., and R. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. *In*: Klute, A. (ed). Methods of Soil Analysis, Part I. Agronomy Monographs, 9. American Society Agronomy, Madison, WI. pp: 425-442.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Lupwayi, N. Z., M. A. Arshad, W. A. Rice, and G. W. Clayton. 2001. Bacterial diversity in water-stable aggregates of soils under conventional and zero tillage management. *Appl. Soil Ecol.* 16: 251-261.
- Metson, A., L. Blakemore, and D. Rhoades. 1979. Methods for the determination of soil organic carbon: a review, and application to New Zealand soils. *N. Z. J. Sci.* 22: 205-228.
- Oades, J., and A. Waters. 1991. Aggregate hierarchy in soil. *Austr. J. Soil Res.* 29: 815-828.
- Peña, L., P. Carrasco, M. Sandoval, y M. Figueroa. 1994. Efecto de la labranza de conservación de suelos en terrenos de lomajes de la cuenca del río Biobío. *Agro-Ciencia* 10: 27-32.
- Pérez, C., y J. González. 2001. Diagnóstico sobre el estado de degradación del recurso suelo en el país. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu, Chillán, Chile. 196 p.
- Poulenard, J., P. Podwojewski, J. L. Janeau, and J. Collinet. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Paramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45: 185-207.
- Rachman, A., S. Anderson, C. Gantzer, and A. Thompson. 2003. Influence of long-term cropping systems on soil physical properties related to soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 637-644.
- Reynolds, W., D. Elrick, and B. Clothier. 1985. The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. *Soil Sci.* 139(2): 172-180.
- Rillig, M. C., S. F. Wright, and V. T. Eviner. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil* 238: 325-333.
- Rodríguez, N., E. Ruz, A. Valenzuela, y C. Belmar. 2000. Efecto del sistema de laboreo en las pérdidas de suelo por erosión en la rotación trigo-avena y praderas en la precordillera andina de la región centro sur. *Agric. Téc. (Chile)* 60:259-269.
- Sandoval, M., N. Stolpe, E. Zagal, M. Mardones, y J. Junod. 2003. El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *Theoria* 12: 65-71.
- Sandoval, M., C. Castillo, E. Zagal, N. Stolpe, y P. Undurraga. 2007a. Parámetros hidráulicos determinados en un Andisol bajo diferentes rotaciones culturales después de diez años. *R. C. Suelo Nutr. Veg.* 7: 32-45.
- Sandoval, M., N. Stolpe, E. Zagal, and M. Mardones. 2007b. The effect of crop-pasture rotations on the C, N and S contents of soil aggregates and structural stability in a volcanic soil of south-central Chile. *Acta Agr. Scand. Section B-Soil & Plant Science* 57: 255-262.
- SAS Institute. 1999. SAS Release 8.1 Edition. SAS Institute, Inc. Cary, N.C. USA.
- Six, J., K. Paustian, E. Elliott, and C. Combrink. 2000. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 681-689.
- Stolpe, N. 2006. Descripción de los principales suelos de la VIII región de Chile. Universidad de Concepción, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile. 84 p.
- Tisdall, J., and J. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Thomsen, I. K., P. Schjonning, J. E. Olesen, and B. T. Christensen. 1999. Turnover of organic matter in differently textured soils: II. Microbial activity as influenced by soil water regimes. *Geoderma* 89: 199-218.

Torn, M., S. Trumbore, O. Chadwick, P. Vitousek, and D. Hendricks. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature* 389: 170-173.

Yoder, R. 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28: 337-351.