

PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ANDOSOL MÓLICO BAJO LABRANZA DE CONSERVACIÓN*

PHYSICAL PROPERTIES OF A MOLLIC ANDOSOL UNDER CONSERVATION TILLAGE

Jesús Arcadio Muñoz Villalobos¹, Klaudia Oleschko Lutkova², Miguel Agustín Velásquez Valle¹, Jaime de Jesús Velázquez García¹, Mario Martínez Menes³ y Benjamín Figueroa Sandoval³

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. INIFAP. Margen derecha canal Sacramento, km 6.5. Gómez Palacio, Durango, México. ²Instituto de Geología, Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México. Juriquilla, Querétaro. ³Posgrado de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, km. 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. Autor para correspondencia: villalobos.arcadio@inifap.gob.mx.

RESUMEN

Las propiedades físicas de los Andosoles mólicos están condicionadas por una textura fina, aunque su contenido en arcilla no suele pasar de 20 a 25%, escasas en arenas y tanto más cuanto mayor es la evolución. El conocimiento de su estabilidad estructural permite a los Andosoles mantener una estructura muy porosa (porosidad entre el 71 y 78%) con una densidad aparente muy baja, entre 0.5 y 0.8 kg m⁻³, y una permeabilidad muy elevada. Cuando se secan las partículas primarias (arcillas) en los agregados se contraen fuertemente y por esta razón la capacidad de retención de agua puede reducirse hasta en 60% de la inicial. El objetivo fue evaluar los efectos de la labranza de conservación, sobre la humedad gravimétrica, la resistencia mecánica y la densidad aparente, como indicadores de la calidad física del Andosol bajo el manejo de labranza de conservación y labranza convencional en dos fechas del muestreo. El área de estudio se ubicó en la cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán. Se tomaron muestras a una profundidad de 0 a 10 y de 10 a 20 cm. Se hizo un análisis estadístico completamente al azar, pruebas de medias por el método de Tukey y análisis de correlaciones Pearson. En la labranza de conservación se documentó el contenido máximo de la humedad gravimétrica (60.8%) durante el primer muestreo, porcentaje que disminuyó hasta

ABSTRACT

The physical properties of mollic andosols are conditioned by a fine texture, although the clay content does not usually overpass 20 to 25%, poor in sands and the more the higher the evolution. The knowledge of its structural stability allows the andosols to maintaining a quite porous structure (Porosity between 71 and 78%) with a very low bulk density, between 0.5 and 0.8 kg m⁻³, and a very high permeability. When the primary particles get dried (clays) in the aggregates, they contract themselves quite strongly and for this reason the water holding capacity can be reduced up to 60% from the initial. The objective was to evaluate the effects of conservation tillage on gravimetric moisture, the mechanical resistance and bulk density as indicators of the physical quality of andosol, under conservation tillage management and conventional tillage in two sampling dates. The study area was located in the basin of Lake Patzcuaro, Michoacán. Samples of gravimetric moisture, mechanical resistance and bulk density were taken at a depth of 0 to 10 and 10 to 20 cm. A completely randomized statistical analysis, means tests by the method of Tukey and Pearson correlation analysis were done. In the conservation tillage management treatment, the maximum gravimetric moisture got documented (60.8%) during the first sample, the percentage decreased

* Recibido: abril de 2011
Aceptado: octubre de 2011

56.41%, cuatro años después cuando se realizó el segundo muestreo. Cabe mencionar que las diferencias en humedad del Andosol, son altamente significativas entre labranza convencional con labranza de conservación, en el primer muestreo ($R^2 = 0.804$), mientras que en el segundo muestreo, esta diferencia no fue estadísticamente significativa. Con el análisis estadístico se observó que la resistencia mecánica se incrementó de un muestreo (2001) al otro (2004) y que sus valores abarcan un amplio rango desde 184.4 hasta 274.9 kPa en labranza convencional, que se incrementa aún más bajo la labranza cero, llegando a valores entre 152.8 y 285.4 kPa. La densidad aparente mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos comparados. En general, entre muestreos, la densidad aparente se incrementó de 0.53 a 0.57 kg m⁻³ en la labranza convencional, variando de 0.51 a 0.55 kg m⁻³ en el campo con labranza de conservación. Se encontró una alta correlación entre la resistencia mecánica, la humedad gravimétrica y la densidad aparente del suelo, concluyendo que estas propiedades del Andosol, son indicadores de naturaleza integral indicativa de la dinámica de sus propiedades físicas, como una medida del grado de su compactación por efecto del manejo, lo cual permite reconocerlas para un diagnóstico instantáneo del deterioro de la calidad física del suelo.

Palabras clave: densidad aparente, humedad gravimétrica, resistencia mecánica.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un cuerpo heterogéneo con una alta variabilidad espacio-temporal, provocada principalmente por la dinámica de los procesos internos y su interacción con factores externos, como el clima y la topografía, los cuales modifican las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de un punto a otro (Hillel, 1998). Un factor externo que favorece la variabilidad de las propiedades del suelo es la labranza continua, la cual provoca rompimiento de los agregados y degradación de la estructura en la zona de influencia del laboreo y aumenta la susceptibilidad a la disgregación superficial y en consecuencia, se aceleran los procesos erosivos (Chien *et al.*, 1997).

Los andosoles, a diferencia de los vertisoles, tienen una microestructura bien desarrollada y estable al agua, además de tener una resistencia mecánica alta a las fuerzas externas, acompañada por una macroestructura inestable y pobremente desarrollada (Oleschko y Chapa, 1989; Salton

up to 56.41%, four years later, when the second sampling was performed. It is noteworthy that differences in the andosol's gravimetric moisture, are highly significant between conventional tillage with conservation tillage in the first sampling ($R = 0.804$), whereas in the second one, this difference was not statistically significant. According to the statistical analysis, it was shown that the mechanical resistance increased from one sampling (2001) to another (2004) and their values span a wide range from 184.4 to 274.9 kPa for the conventional tillage treatment, which is further increased under zero tillage, reaching values between 152.8 and 285.4 kPa. The bulk density showed significant differences ($p \leq 0.05$) between the compared treatments. In general, during sampling, ρ_b increased from 0.53 to 0.57 kg m⁻³ in the conventional tillage, ranging from 0.51 to 0.55 kg m⁻³ in the field with conservation tillage. A high correlation between the mechanical resistance, gravimetric moisture and bulk density was found, concluding that these properties are indicators of the andosol's integrated nature indicative of the dynamics of their physical properties, as a measurable degree of compaction as a result of its management, which allows instantaneous diagnosis recognition of the soil's physical quality deterioration.

Key words: bulk density, gravimetric moisture, mechanical resistance.

INTRODUCTION

The soil is a heterogeneous body, with high spatial-temporal variability, caused mainly by the dynamics of internal processes and their interaction with external factors such as climate and topography, which modify the physical, chemical and biological properties of the soil, from one point to another (Hillel, 1998). An external factor that favors the variability of the soil's properties is the continuous tillage, which causes disruption of the aggregates and degradation of the structure in the area of influence of tillage and increases the susceptibility to the surface disruption and thus accelerating the erosive processes (Chien *et al.*, 1997).

The andosols, unlike vertisols, have a well-developed microstructure stable to water, besides having a high mechanical resistance to external forces, accompanied by an unstable and poorly developed macrostructure (Oleschko and Chapa, 1989; Salton and Mielniczuck, 1995). The

y Mielniczuck, 1995). El análisis de la dinámica de las propiedades físicas del suelo, se utiliza como indicador de la calidad del suelo y de la magnitud de los procesos de degradación de la estructura y la compactación del mismo. Este método considera los cambios espaciales y temporales que pueden ocurrir en las propiedades del suelo y proporciona evidencias sobre su comportamiento e incrementa la certeza de los pronósticos acerca de la respuesta de estos atributos a diversos usos, bajo determinadas prácticas de manejo (Ovalles y Rey, 1995; Alperin *et al.*, 2002).

Existen métodos de siembra alternativos que se puede combinar con los cultivos en agricultura de ladera, incrementando en gran medida la protección y conservación del suelo. Uno de ellos es la labranza de conservación. Actualmente se han logrado avances significativos en la aplicación de la labranza mínima o cero en combinación con una cubierta de residuos (labranza de conservación), para proteger el suelo contra el impacto de las gotas de lluvia y el arrastre, lo que disminuye de una manera efectiva la erosión. Existen numerosos reportes de estudios donde los residuos de cosecha se han utilizado para disminuir la erosión en sistemas de labranza de conservación (Richardson y King, 1995; Thierfelder *et al.*, 2005).

Diferentes procesos y mecanismos involucrados tanto en la génesis de estructura del suelo como en su degradación, operan dentro de un amplio rango de escalas, empezando desde la escala sub-microscópica donde se realizan los procesos de unión de las partículas sólidas elementales (PSE) del tamaño de arcillas, que se mantienen posteriormente unidas por las fuerzas tanto electromagnéticas como de otra naturaleza, formando microagregados del tamaño inferior a 0.25 mm. Los agregados de tamaño mayor a 0.25 mm (macroagregados), obtienen una gran parte de su estabilidad al efecto del agua a partir de la interacción con las raíces de plantas vivas o parcialmente descompuestas, más que nada con las hifas de hongos y residuos de la descomposición sucesiva de las plantas (Dexter, 2004).

El suelo sigue siendo uno de los principales recursos indispensables para el desarrollo de las actividades agrícolas; sin embargo, en muchas regiones del mundo su uso y manejo hasta la fecha, no son sustentables (Bruma *et al.*, 1998). En los últimos años se ha puesto mayor énfasis en la optimización de las propiedades físicas del suelo, a través de un manejo sustentable que disminuye el riesgo de los efectos negativos que acompañan la labranza de conservación, y que ha sido ampliamente reconocido como un sistema de

analysis of the soil's dynamic physical properties is used as an indicator of soil quality and the magnitude of the processes of degradation of the structure and compaction. This method considers the spatial and temporal changes that may occur in the soil's properties, providing evidence of their behavior and increasing the accuracy of the predictions of the response of these attributes to different uses under certain management practices (Ovalles and King, 1995; Alperin *et al.*, 2002).

There are alternative planting methods that can be combined with crops in hillside agriculture, greatly increasing the soil's protection and conservation. One of them is the so called conservation tillage. Currently, there have been significant advances in the application of the minimum or zero tillage, in combination with a residue cover (conservation tillage) to protect the soil against the impact of raindrops and drag, which effectively decreases the erosion. There are many reports of studies, where crop residues were used to reduce erosion in the conservation tillage systems (Richardson and King, 1995; Thierfelder *et al.*, 2005).

Different processes and mechanisms involved, in both, the soil's structure genesis and in its degradation, operate within a wide range of scales, starting from the sub-microscopic scale where the elementary solid particles (ESP) union processes are performed, with the size of clays that are later held together by electromagnetic forces as well as with others of different nature, to form micro-aggregates smaller than 0.25 mm. The aggregates larger than 0.25 mm (macro-aggregates) derive much of their stability to the effect of water from the interaction with living plant's roots and partially decomposed, mostly with the hyphae of fungi and residue derived from the plant's successive decomposition (Dexter, 2004).

The soil is still one of the main resources required for the development of agriculture activities. However, in many regions, its management and use are up to this date, not sustainable (Bruma *et al.*, 1998). In recent years, greater emphasis has been placed upon optimizing the soil's physical properties, through sustainable management that reduces the risk of negative effects that accompany the conservation tillage, which has been widely recognized as a management system ensuring the development of a stable structure, resistant to degradation under agricultural use (Lal, 2000). The main challenges in the management of the soil's physical properties are linked to

manejo, que asegura el desarrollo de una estructura estable y resistente a la degradación de los suelos sometidos al uso agrícola (Lal, 2000). Los principales retos del manejo de las propiedades físicas del suelo, están vinculados al incremento de la productividad agronómica, así como al mejoramiento de la calidad ambiental, vía la eficiencia de flujos de masa y energía (Slepetiene y Slepetys, 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en la comunidad de Sta. Isabel de Ajuno, ubicada en la cuenca del lago de Pátzcuaro, en el estado de Michoacán, en un Andosol mólico de textura migajón arenoso (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores promedio de las propiedades físicas y químicas del Andosol[†].
Table 1. Andosol's physical and chemical properties mean values[†].

Propiedades físicas		Propiedades químicas	
Textura	Migajón arenoso	pH	5.5
Densidad real	2.72 kg m ⁻³	CIC	39.5 cmol kg ⁻¹
Densidad aparente	0.6-0.8 kg m ⁻³	MO	1.74
Porosidad total	45%		

CIC= capacidad de intercambio catiónico; MO= materia orgánica; [†]= Chapa (1987) y Tiscareño-López *et al.* (1999).

En ambos tratamientos se sembró maíz criollo, entre la última semana de abril y la primera de mayo. La fertilización se dividió en dos etapas, en la primera se aplicó la mitad del nitrógeno con 180 kg de nitrato de amonio (60 unidades de N) y 130 kg de superfosfato de calcio triple (90 unidades de fósforo) en la siembra y en la segunda escarda se aplicó el resto del nitrógeno; la siembra y fertilización se realizó con maquinaria para labranza cero.

La parcela experimental se estableció en unas terrazas de base ancha, donde se evaluaron dos tratamientos de labranza: labranza convencional (LCv) y labranza cero (LCz). El tratamiento LCv consistió en un paso de arado, rastra y trazo de siembra; mientras que en el tratamiento LCz, el cultivo se sembró directamente sobre el suelo con presencia de residuos del cultivo anterior en un 30% de la superficie del terreno. Al final del ciclo se hicieron dos muestreos de suelo con una diferencia de cuatro años entre el primer muestreo y el segundo muestreo (2001 a 2004) para obtener información sobre resistencia a la penetración (γ), contenido de humedad (W_i) y densidad aparente (ρ_b).

the increasing agricultural productivity and improvement of the environmental quality, via the efficiency of mass and energy flows (Slepetiene and Slepetys, 2005).

MATERIALS AND METHODS

This study was conducted in the community of St. Elizabeth of Ajun, located in the basin of Lake Patzcuaro in Michoacán State in a mollic andosol sandy loam texture (Table 1).

Landrace maize was planted in both treatments, between the last week of April and early May. Fertilization was divided into two stages, in the first one, half of the nitrogen

applied with 180 kg of ammonium nitrate (60 units of N) and 130 kg of calcium superphosphate triple (90 units of phosphorus) in the planting and during the second weeding the rest of nitrogen was applied; the seeding and fertilization was done with zero tillage machinery.

The experimental plot was established in a broad-based terrace, where two tillage treatments were tested: conventional tillage (LCv) and zero tillage (LCz). The LCv treatment consisted of passing a plow, harrow and seed lining, while in the LCz treatment, the crop is directly planted on the soil with residues of previous crop on 30% of the land surface. At the end of the cycle, two soil samplings were performed, with a gap of four years between the first sampling and second one (2001 to 2004) in order to get information on penetration resistance (γ), moisture content (W_i) and bulk density (ρ_b).

Sampling for physical properties

For the first sampling of soil's physical properties, grids of 15*55 m were drawn (to approximate a rectangle to the dimensions of the terrace) in each tillage system with

Muestreo de propiedades físicas

Para el primer muestreo de las propiedades físicas del suelo, se trazaron cuadrículas de 15*55 m (para aproximar un rectángulo a las dimensiones de la terraza), en cada sistema de labranza con unidades de muestreo de 5*5 m, orientadas de este a oeste, con el fin de ubicar los mismos puntos en el segundo muestreo. Los muestreos se realizaron en los puntos de intersección de la cuadrícula a una profundidad de 0 a 10 cm y 10 a 20 cm.

Resistencia mecánica (γ), humedad del suelo (W_i) y densidad aparente (ρ_b)

La densidad aparente (ρ_b) se determinó con el método del cilindro de volumen conocido, donde un cilindro de PVC se introduce en el suelo obteniendo una muestra de suelo inalterada que se seco a la estufa a 105 °C durante 24 h, para determinar la masa de suelo seco. Con estos datos se estimó ρ_b dividiendo la masa de suelo entre el volumen del cilindro. Simultáneamente se determinó el contenido gravimétrico de humedad (W_i). La resistencia mecánica se determinó con un penetrómetro de impacto que posee una punta cónica de área conocida, el método consiste en introducir la varilla de la herramienta directamente en el suelo.

La resistencia a la penetración (γ) se calculó considerando el número de golpes necesarios (N) para alcanzar una profundidad de penetración de 10 y 20 cm (DP), la masa del golpe (3.85 kg), la aceleración de la gravedad (9.81 m s⁻²), la distancia del golpeo (DG) y el área del cono (A=0.002001 m²).

Análisis estadísticos

Para evaluar el efecto de los tratamientos de labranza sobre las propiedades físicas estudiadas, se realizó el análisis de varianza y prueba de medias por el método de Tukey para un diseño completamente al azar. Se hizo también un análisis de correlaciones Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resistencia mecánica

En el Cuadro 2 se muestran los valores de las propiedades físicas estudiadas (γ , W_i y ρ_b) del Andosol para tratamientos de labranza en los dos muestreos realizados. Los datos

sampling units of 5*5 m, oriented east to west, in order to locate the very same points in the second sampling. The samples were taken at the points of intersection of the grid to a depth of 0 to 10 cm and 10 to 20 cm.

Mechanical resistance (γ), soil moisture (W_i) and bulk density (ρ_b)

The bulk density (ρ_b) was determined using the known volume cylinder method, where a PVC cylinder gets buried into the ground, getting an undisturbed soil sample, which got dried in an oven at 105 °C for 24 h to determine the mass of dry soil. With these data, the ρ_b was estimated, dividing the mass of soil by the volume of the cylinder. Simultaneously determining the gravimetric moisture content (W_i). The mechanical resistance was determined with an impact penetrometer, which has a conical tip of known area; the method involves introducing the tool's shaft directly into the ground.

The resistance to penetration (γ) is calculated considering the number of strokes required (N) to achieve a penetration depth of 10 and 20 cm (DP), the stroke's mass (3.85 kg), the acceleration of gravity (9.81 m s⁻²), the distance of the blow (DG) and the cone area (A= 0.002001 m²).

Statistical analysis

In order to evaluate the effect of the tillage treatments on the physical properties studied, an analysis of variance and a mean test by Tukey's method for a completely randomized design were performed. There was also a Pearson correlation analysis.

RESULTS AND DISCUSSION

Mechanical resistance

The Table 2 shows the values of andosol's physical properties studied (γ , W_i and ρ_b) for tillage treatments in both samplings performed. The data indicates that γ showed significant differences between treatments and sampling dates. The mechanical resistance increased from one sampling to another. The change was from 184.4 to 274.9 kPa for the LCv treatment and 152.8 to 285.4 kPa in the zero tillage. The most evident changes occur in the zero tillage treatment at presenting a difference of 132.6

muestran que la γ presentó diferencias significativas entre tratamientos y fechas de muestreo. La resistencia mecánica se incrementó de un muestreo a otro. La variación fue de 184.4 a 274.9 kPa en el tratamiento de LCv y de 152.8 a 285.4 kPa en la labranza cero. Los cambios más evidentes se presentan en el tratamiento de labranza cero al tener una diferencia de 132.6 kPa entre un muestreo y otro, lo que permite apreciar un claro aumento en la compactación en la capa superficial del suelo, atribuida a la falta de movimiento de la capa por el laboreo y la existencia de procesos continuos de empaquetamiento de las partículas del suelo, mayor continuidad en el espacio poroso y mejoramiento de la estructura.

Sin embargo, a pesar de estas diferencias, existe menor variabilidad de la γ en el tratamiento de LCz, al presentar coeficientes de variación más bajos. Así mismo Sharma, *et al.*, (2005) reportan que la densidad aparente y la densidad real son buenos indicadores para establecer el estado actual de la distribución de la porosidad, y que la resistencia mecánica no registra diferencias entre los sistemas de manejo de los cultivos (Mulholland *et al.*, 1999; Hussain *et al.*, 2000).

Densidad aparente

La densidad aparente (ρ_b) mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos, la ρ_b en el tratamiento de LCv fue mayor que la registrada en la LCz en los dos muestreos. En general la ρ_b se incrementó entre muestreos de 0.53 a 0.57 kg m⁻³ en la LCv, mientras que para el tratamiento de LCz varió de 0.51 a 0.55 kg m⁻³. En un estudio sobre la dinámica estructural del Andosol mólico bajo sistemas de labranza, Oleschko y Chapa (1989) reportan que el tratamiento de cero labranza mostró valores de ρ_b menores de 0.63 kg m⁻³. La ρ_b refleja un ligero aumento de la masa del suelo y en consecuencia, una disminución del espacio poroso, atribuible al efecto de compactación ejercida por fuerzas externas, como el tráfico de maquinaria, lo anterior se confirma con una mayor γ , variable que se incrementa con el tiempo, como la ρ_b .

En el mismo sentido Kuht y Reintam (2001) observaron una mayor estabilidad estructural en los suelos cultivados bajo labranza cero. Este efecto, se observa cuando la ρ_b aumenta al manejar el suelo con un sistema de cultivo convencional, a uno donde el suelo se maneja bajo labranza cero (Lipiec y Hakansson, 2000). El incremento de la ρ_b en el tiempo sugiere una degradación mínima del suelo por compactación; sin embargo, estos cambios no son tan drásticos para afectar la calidad física del perfil.

kPa between one sampling and the another, allowing a particularly marked increase in the compaction of the topsoil, attributed to the lack of movement of the tillage layer and the existence of a continuous process of packing-particles of the soil, greater continuity in the pore space and improvement of the structure. However, despite these differences, there is less γ variability in the LCz treatment, by presenting lower coefficients of variation.

Likewise Sharma, *et al.*, (2005) report that the bulk density and true density are good indicators to establish the current state of the distribution of porosity and that mechanical resistance does not record differences between crops' management systems (Mulholland *et al.*, 1999; Hussain *et al.*, 2000).

Bulk density

The bulk density (ρ_b) showed significant differences ($p \leq 0.05$) between treatments (Figure 1). The ρ_b in the treatment of LCv was higher than that in the LCz in both samplings (Table 2). Overall, ρ_b between samplings increased from 0.53 to 0.57 kg m⁻³ in LCv, while for the treatment of LCz ranged from 0.51 to 0.55 kg m⁻³. In a study on mollic andosol's structural dynamics under tillage systems, Oleschko and Chapa (1989) report that zero tillage treatment showed values lower than 0.63 kg ρ_b m⁻³. The ρ_b reflects a slight increase in the soil's mass and, consequently, a decrease of porous space, attributable effect to the exerted compaction by external forces, such as machinery transit for the preparation and planting; this is confirmed by a higher γ , variable that increases with time just as the ρ_b does.

In the same way, Kuth and Reintam (2001) observed a greater structural stability in cultivated soils under zero tillage. This effect is observed when the ρ_b increases by managing the ground with a conventional culture system, to one where the land is managed under zero tillage (Lipiec and Hakansson, 2000). The ρ_b increasing over time suggests minimum soil degradation by compaction; however, these changes are not so drastic to affect the physical quality of the profile.

In this regard, Quiroga *et al.* (1999); Álvarez and Barranco (2005) reported that in soils managed under zero tillage, bulk density and penetration resistance are higher than 1.35 kg m⁻³, while the macro-porosity and hydraulic conductivity are lower in the stratum 0 to 10 cm and in the sub-surface layer it showed a similar behavior. The bulk density (ρ_b)

Al respecto, Quiroga *et al.* (1999) y Álvarez y Barranco (2005), reportan que en suelos manejados bajo labranza cero, la densidad aparente y la resistencia a la penetración son mayores de 1.35 kg m^{-3} , mientras que la macroporosidad y la conductividad hidráulica son menores en el estrato de 0 a 10 cm y en la capa sub-superficial registraron un comportamiento similar. La densidad aparente (ρ_b) puede ser incluida dentro del grupo mínimo de propiedades físicas a medir para evaluar la calidad física de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica y la cohesión del mismo. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos (Cuadro 2).

may be included within the minimum set of physical properties measured to evaluate the soil's physical quality as an indicator of the structure, mechanical resistance and its cohesion. With an increase in the bulk density, the mechanical resistance tends to increase and the soil's porosity tends to decrease; these changes limit the growth of the roots to critical values (Table 2).

The bulk density's critical values for root growth vary depending to the texture of the soil and the species concerned. For example, for sandy soils, a bulk density of 1.76 kg m^{-3} limits the growth of the roots of sunflower, while in clay soils the critical value is 1.46 to 1.63 kg m^{-3} , for the same species (Doran *et al.*, 1994; Cunha *et al.*, 1997).

Cuadro 2. Medias y desviación estándar ($p < 0.05$) de las propiedades físicas del Andosol obtenidas con métodos tradicionales.
Table 2. Means and standard deviation ($p < 0.05$) of the Andosol's physical properties obtained using traditional methods.

Años	Parámetros	(kPa)		W _i (%)		ρ _b (kg m ⁻³)	
		0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
Labranza convencional							
2001	$\bar{X}$	184.4	360.6	58.1	60	0.53	0.61
	DE	24.35	36.83	0.962	0.996	0.014	0.012
2004	$\bar{X}$	216.7	513.5	50.64	54.61	0.57	0.72
	DE	21.47	45.93	2.081	2.008	0.009	0.01
Labranza de conservación							
2001	$\bar{X}$	152.8	329.9	60.8	62.61	0.51	0.63
	DE	23.82	20.97	2.585	0.426	0.017	0.009
2004	$\bar{X}$	285.4	583.1	56.41	58.29	0.55	0.66
	DE	22.52	50.82	2.221	1.331	0.008	0.012

γ = resistencia mecánica; W_i = humedad gravimétrica; ρ_b = densidad aparente; DE = desviación estándar.

Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate. Por ejemplo, para suelos arenosos una densidad aparente de 1.76 kg m^{-3} limita el crecimiento de las raíces de girasol, mientras que en suelos arcillosos, ese valor crítico es 1.46 a 1.63 kg m^{-3} , para la misma especie (Doran, *et al.*, 1994; Cunha *et al.*, 1997).

Esta afirmación, está basada en que los primeros 10 cm de la capa superficial, no se ha removido con maquinaria agrícola en un periodo de cuatro años (Cunha *et al.*, 1997; Dorel *et al.*, 2000). En el mismo sentido, la compactación se puede definir como el aumento en la densidad (valores mayores de 1.3 kg m^{-3}), a niveles que limiten los procesos básicos en el suelo como el movimiento de agua y nutrientes, la aireación y el crecimiento de raíces (o la disminución de la porosidad)

This statement is based that in the first 10 cm of the surface layer, has not been removed by farming machinery in four years (Cunha *et al.*, 1997; Dorel *et al.*, 2000). Likewise, the compaction can be defined as the increase in density (values greater than 1.3 kg m^{-3}) to levels that limit the basic processes in the soil and the movement of water and nutrients, aeration and growth of roots (or the decrease in porosity) (Cornia *et al.*, 1994; Arvidsson, 1998). The agricultural soil's susceptibility to compaction leads, in many cases, to lower yields as a result of its effects on the plant's growth and water movement in the soil (Arvidsson, 1998; Quiroga *et al.*, 1999).

In soils with different texture, the adequate, critical, and limiting bulk density values may vary according to the parental material from which they had developed, such as:

(Comia *et al.*, 1994; Arvidsson, 1998). La susceptibilidad de los suelos agrícolas a la compactación conduce, en muchos casos, a bajos rendimientos agrícolas como resultado de sus efectos sobre el crecimiento de la planta y el movimiento del agua en el suelo (Arvidsson, 1998; Quiroga *et al.*, 1999).

En suelos con diferente textura los valores de densidad aparente adecuados, críticos y limitantes, pueden variar de acuerdo con el material parental a partir del cual ellos se han desarrollado; por ejemplo, en suelos con textura de fina a media los valores adecuados de la densidad aparente están por debajo de 1.3 kg m^{-3} , con un valor crítico de 1.4 kg m^{-3} , por arriba del cual la densidad aparente comienza a ser un factor limitante para el desarrollo del cultivo. Para suelos de texturas medias, los valores críticos de la densidad aparente se ubican en el rango entre 1.3 y 1.55 kg m^{-3} , mientras que para suelos de textura gruesa, entre el rango más amplio, abarcando los valores entre 1.3 y 1.8 kg m^{-3} , a partir del último valor la densidad empieza a ser limitante para el desarrollo de las raíces de las plantas (Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Ferreras *et al.*, 2000).

Humedad gravimétrica

La humedad gravimétrica (W_i) mostró diferencias significativas entre tratamientos, los valores de las medias indican un mayor porcentaje de humedad en el tratamiento de LCz (Cuadro 2), al alcanzar un máximo 60.8% en el primer muestreo después del primer ciclo de cultivo, porcentaje que disminuyó hasta 56.41% en el segundo muestreo cuatro años después. La variación de la ρ_b y la γ en el tiempo, el incremento sugiere una disminución del espacio poroso en el suelo por compactación lo cual pudiera afectar la capacidad de almacenaje de agua; sin embargo, estos cambios no fueron muy fuertes si se considera que el valor de W_i entre muestreos bajó de 58.1 a 50.64 en el tratamiento de LCv, mientras que en la LCz la diferencia fue de 4.39% entre un muestreo y otro como lo consideran algunos autores que han hecho trabajos similares (Cabria y Culot, 2001).

En el Cuadro 2 se muestra que los porcentajes de W_i en el tratamiento de LCz fueron mayores que en el tratamiento de LCv, en ambos muestreos, al tomar en cuenta las lluvias de cada año. Las precipitaciones en el área donde se realizó el estudio fueron de 472 mm en el año 2001 y de 963 mm en el año de 2004. Cabe aclarar que en el tiempo en que se muestreo fue el tiempo de secas para esta región, y los productores aprovechan la humedad residual para sembrar el maíz.

in soils with fine and medium texture, the adequate bulk density values are below 1.3 kg m^{-3} , with a critical value of 1.4 kg m^{-3} , higher values than these, the bulk density becomes an impediment for the crop's development. For medium textured soils, the medium bulk density values are between a range from 1.3 and 1.55 kg m^{-3} , while for rough textured soils, in the widest range, covering values between 1.3 and 1.8 kg m^{-3} , higher than the latter value, the bulk density becomes a limiting factor for the plant's roots development (Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Ferreras *et al.*, 2000).

Gravimetric moisture

Between treatments, the gravimetric moisture (W_i) displayed significant differences, for the LCz (Table 2), the mean values indicate a higher humidity percentage, reaching a maximum 60.8% in the first sampling after the first cultivation cycle, this percentage decreased in the second sampling 54.41% four years later. The ρ_b and γ variation over time, due to compaction the increase suggests the soil's diminished porous space which could affect the water storage capacity; however, these changes were not quite significant considering that W_i 's values between samplings decreased from 58.1 to 50.64 in the LCv treatment, while in the LCz's the difference was 4.39% between one sampling and the other, as considered by other authors whom have written similar papers (Cabria y Culot, 2001).

Considering each year's rain fall, W_i 's percentages of the LCz treatment were higher than those of the LCv's in both samplings, as shown in Table 2. In 2001, the precipitation was of 472 mm in the area under study and 963 mm in 2004. Is noteworthy to mention that during the sampling time, it was also the drought season of this area, because of this, the producers used the residual humidity for the seeding of maize.

This suggests that at the second sampling, higher humidity should've been recorded; however, variation of humidity over time can be partially attributed to the use of machinery before the seeding, which for the LCv treatment's case, it's linked to the direct evaporation's humidity loss, due that the second sampling got seeded later on than the first one, leaving the soil exposed for a longer time.

For the LCz treatment, where there is no mechanical weed control, besides direct evaporation, water losses are due to the weed's water extraction left in the field after the maize

Esto sugiere que debería haberse registrado más humedad en el segundo muestreo; sin embargo, la variación del contenido de humedad en el tiempo, se pueden atribuir en parte al manejo del suelo con maquinaria, antes de la siembra, lo cual está relacionado con la pérdida de humedad por evaporación directa en el caso del tratamiento de LCv, debido que se sembró mas tarde en el segundo muestreo que en el primero, de tal manera, que el suelo duró más tiempo expuesto.

En el caso del tratamiento de LCz donde no hay un control mecánico de malezas, las pérdidas de agua se debieron, aparte de la evaporación directa, a la extracción de agua que toma la maleza que permanece sobre el terreno después de que el maíz se cosechó; además, en estos tratamientos no se movía el suelo hasta el siguiente ciclo de cultivo. Por otra parte, se debe considerar la posibilidad de la reducción de los espacios de almacenamiento de agua en la estructura del suelo si se incrementaron los valores de ρ_b y la γ . La evolución de la resistencia mecánica a través del tiempo, se observó un aumento de este índice, del primer al segundo muestreo; tanto en el incremento en la densidad aparente como en la disminución del contenido de humedad de suelo en el mismo año de muestreo (Chagas *et al.*, 1995; Arvidsson y Håkansson, 1996; Díaz-Zorita, 1999).

Las diferencias en las propiedades (γ , ρ_b y W_i) que se encontraron entre los muestreos para un mismo tratamiento, también mostraron diferencias entre los tratamientos, incrementado o disminuyendo sus valores de las propiedades físicas evaluadas, por ejemplo la W_i se incrementó 58.1%, en el tratamiento de LCv, a 60.8%, mientras que en LCz el incremento fue de 5.8% de humedad, con respecto al tratamiento de LCv. La γ aumentó en la capa superficial, con una diferencia de 132.5 kPa para LCz y de 32.3 kPa en LCv, mientras que la ρ_b se mantuvo entre 0.51 a 0.57 kg m⁻³. La W_i en LCz se redujo en 4.39 % y para la LCv la reducción fue de 7.46 %. Por lo tanto, al comparar los tratamientos en el mismo muestreo, el contenido de humedad se conservó por más tiempo en el sistema de labranza cero, lo que se puede atribuir a la falta de laboreo y al efecto de la cobertura de residuos sobre la superficie del suelo (Navarro *et al.*, 2000).

Análisis de correlación entre variables

De acuerdo con los resultados de las correlaciones Pearson (Cuadro 3), la resistencia mecánica tiene una relación directa con la densidad aparente y una relación inversa con la humedad gravimétrica. Esto significa que cuando la resistencia mecánica del suelo se incrementó la ρ_b sufrió

was harvested; even so, in this treatments, the ground were not moved until the next crop's cycle. On the other hand, if the ρ_b and γ 's values are increased, the possibility to reduce the soil's water storage structure must be considered. From the first sampling to the second one, an increase through time of the mechanical resistance's index was noted. This proved to be quite relevant during the very same year of the sampling, for both, the increase in the bulk density and the soil's moisture content diminishing (Chagas *et al.*, 1995; Arvidsson y Håkansson, 1996; Díaz-Zorita, 1999).

The difference in the properties (γ , ρ_b and W_i) found between the samplings of the same treatment, also showed differences between treatments, increasing or decreasing the physical properties' values evaluated, for example in the LC v treatment, W_i got 58.1% increased, while for LCz's the humidity increased 5.8%, with respect to the LCv treatment. In the surface layer γ increased, with a difference of 132.5 kPa for LCz and 32.3 kPa for LCv, while the ρ_b stayed between 0.51 a 0.57 kg m⁻³. The W_i or LCz decreased in 4.39% and for the LCv it was 7.46% reduction. Because of this, by comparing the treatments in the same sampling, the moisture content's conservation for a longer time under zero tillage was noted, which can be attributed either to the lack of laboring and the effect caused by the residue's covering over the surface of the soil (Navarro *et al.*, 2000).

Correlation analysis between variables

According to the Pearson correlation's results (Table 3), the mechanical resistance has a direct relation with the bulks density and an inverse relation with the gravimetric moisture. This means, that when the soil's mechanical resistance increased, ρ_b got higher as well in both depths, with a probability of 0.67 and 0.82 at both of them. And the gravimetric moisture (W_i) had an inverse proportional correlation with γ up to a -0.74% probability that the humidity stuck in the ground gets lower when γ increases.

The high correlation between the bulk density (ρ_b) and the gravimetric moisture (W_i) is quite clear when an inverse relation (R^2 from -0.82 to -0.99) is displayed. Since the probability's values are negative, the hypothesis that states, that when ρ_b is increased the soil's moisture store capacity is reduced, is proven to be correct.

The Table 3 presents the correlations between the sampled physical properties with traditional methods, and a high correlation (R^2 between 0.7 and 0.9) is shown for the

un incremento en las dos profundidades con probabilidad de 0.67 y 0.82 a las dos profundidades. La humedad gravimétrica se correlacionó inversamente proporcional con la γ hasta en -0.74% de probabilidad de que la humedad retenida en el suelo sea menor cuando la γ se incrementa.

Es evidente la alta correlación de la densidad aparente con la humedad gravimétrica al mostrar una relación inversa (R^2 de -0.82 hasta -0.99). Este comportamiento demuestra la hipótesis que dice, que cuando hay un incremento de la ρ_b la capacidad de retención de humedad del suelo se reduce es cierta, ya que los valores de probabilidad son negativos.

En el Cuadro 3 se presentan las correlaciones entre las propiedades físicas muestreadas con los métodos tradicionales, y se observa una alta correlación (R^2 entre 0.7 y 0.9) para las variables de densidad aparente y resistencia mecánica con una menor coincidencia de las áreas degradadas y por ende de las correlaciones encontradas para el contenido de humedad. En este último caso los datos presentan una mayor variabilidad sin llegar a una tendencia de comportamiento clara, ya que entre las variables de interés se observan tanto correlaciones positivas como negativas, fluctuando la R^2 entre 0.42 y 0.99. Las variaciones que aquí se interpretan como efecto del muestreo destructivo para las técnicas tradicionales, donde se espera un mayor número de errores al momento de medir la variable de interés.

bulk density and mechanical resistance variables with a minor coincidence of degraded areas and thus for the correlations found for the moisture content (W_i) as well. In the latter case the data show greater variability without a clear trend behavior, as among the variables of interest are observed both positive and negative correlations, ranging between 0.42 and the R^2 0.99. The variations are interpreted as an effect of destructive sampling for the traditional techniques, where it is expected a greater number of errors measuring the variable of interest.

CONCLUSIONS

The conservation tillage (zero with a layer of stubble) did not significantly modify the andosol's physical properties, even though this management was applied during four years, showing a lower spatial and temporal variability than that observed in conventional tillage.

The results of this study indicate that traditional sampling methods are a good choice for accurate and precise monitoring, and rapid and accurate prediction of soil's physical quality and its behavior under different management systems.

Cuadro 3. Correlaciones Pearson de las propiedades físicas del Andosol obtenidas con métodos tradicionales, a dos profundidades del muestreo.

Table 3. Pearson correlations of Andosol's physical properties obtained using traditional methods at two sampling depths.

Variables	γ (0-10 cm)	γ (10-20 cm)	W_i (0-10 cm)	W_i (10-20 cm)	ρ_b (0-10 cm)
γ (10-20 cm)	0.95				
W_i (0-10 cm)	-0.46	-0.67			
W_i (10-20 cm)	-0.55	-0.74	0.99		
ρ_b (0-10 cm)	0.67	0.82	-0.82	-0.99	
ρ_b (10-20 cm)	0.42	0.68	-0.91	-0.88	0.86

γ = resistencia mecánica; W_i = humedad gravimétrica; ρ_b = densidad aparente.

CONCLUSIONES

La labranza de conservación (cero con una capa de rastrojo), no modificó significativamente las propiedades físicas del Andosol, aún cuando este manejo se aplicó durante cuatro años, mostrando una menor variabilidad espacial y temporal que la observada en la labranza convencional.

Traditional methods are accurate compared to other current methods, easier and faster to use to creating data banks of the dynamic andosol's physical properties, so, it's concluded, that they are suitable for monitoring the soil's physical quality under the different management systems under study.

End of the English version



Los resultados de este estudio indican que los métodos tradicionales de muestreo son una buena opción para el monitoreo preciso y exacto, y un rápido y acertado pronóstico de la calidad física del suelo y de su comportamiento bajo diferentes sistemas del manejo.

Los métodos tradicionales son precisos en comparación con otros métodos actuales, son más fáciles y rápidos de usar para crear los bancos de datos de la dinámica de las propiedades físicas del Andosol, por lo que se concluye que son aptos para el monitoreo de la calidad física del suelo bajo los diferentes sistemas de manejo estudiados.

LITERATURA CITADA

- Álvarez, C. y Barraco, M. 2005. Efecto de los sistemas de labranza sobre las propiedades edáficas y rendimiento de los cultivos. *In: indicadores de calidad física de suelos*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Centro Regional Buenos Aires Norte. Estación experimental agropecuaria General Villegas. República de Argentina. Boletín técnico. Núm. 4. 5-18 pp.
- Alperín, M. I.; Borges, V. G. y Sarandón, R. 2002. Caracterización espacial de los tipos de cobertura de Suelo usando técnicas geoestadísticas a partir de información satelital. *Rev. Fac. Agron.* 105(1):40-51.
- Arvidsson, J. and Håkansson, I. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil Tillage Res.* 39:175-197.
- Arvidsson, J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. *Soil Tillage Res.* 49:159-170.
- Bruma, J.; Finke, P. A.; Hoosbeek, M. R. and Breeuwsma, A. 1998. Soil and water quality at different scales: concepts, challenges, conclusions and recommendations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* 50:5-11.
- Cabria, F. N. and Culot, J. Ph. 2001. Efecto de la agricultura continúa bajo labranza convencional sobre características físicas y químicas en un suelo bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo.* 19:11-19.
- Comia, R.; Stenberg, M.; Nelson, T.; Rydberg, P. and Hakansson, I. 1994. Soil and crop responses to different tillage systems. *Soil Tillage Res.* 29:335-355.
- Chagas, C. J.; Santanatoglia, O. J. and Castiglioni, M. 1995. Tillage and cropping effects on selected properties of an Argiudoll in Argentina. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26 (5 y 6):643-655.
- Chien, Y. J.; Lee, D. Y.; Guo, H. Y. and Houn, K. H. 1997. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Sci.* 162(4):291-298.
- Cunha, M. J.; Hernández, M. J. and Sánchez, G. B. 1997. Effect of various soil tillage systems on structure development in a haploxeralf of central Spain. *Soil Technol.* 11:197-204.
- Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality. *Soil Tillage Res.* 79:129-130.
- Díaz-Zorita, M. 1999. Efecto de seis años de labranzas en un Hapludol del noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo.* 17(1):31-36.
- Doran, J. W. and Parkin, T. B. 1994. Defining and assessing soil quality. *In: defining soil quality for a sustainable environment*. Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. F. and Stewart, B. A. (eds.). *Soil Sci. Soc. Amer.: Madison, Wis.* 3-21 p.
- Dorel, M.; J. Roger-Estrade, H. M. and Delvaux, B. 2000. Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. *Soil Use Manage.* 16, 133-140.
- Ferreras, L. A.; Costa, J. L.; García, F. O. and Pecorari, C. 2000. Effect of no tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern «Pampa» of Argentina. *Soil Tillage Res.* 54(1-2):31-39.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press Division of Harcourt & Company. Soil structure and aggregation. 6nd ed. Academic Press. London, U. K.
- Hussain, A.; Black, C.; Taylor, I. and Roberts, J. 2000. Does an antagonist relationship between ABA and ethylene mediate shoot growth tomato (*Lycopersicum esculentum*) plants encounter compacted soil? *Plant Cell Environ.* 23:1217-1226.
- Kuht, J. and Reintam, E. 2001. The impact of Dep. Rooted plants on the qualities of compacted soils *In: Stott, D.; Mohtar, R. and Steinhardt, G. (eds.). Sustaining the global farm.* 632-636 p.

- Lal, R. 2000. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century. *Soil Sci.* 165: 191-207.
- Lipiec, J. and Hakansson, I. 2000. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil Tillage Res.* 53:87-94.
- Mulholland, B.; Hussain, C. A.; Black, I. and Taylor, J. R. 1999. Does root-sourced aba have a role in mediating growth and stomatal responses to soil compaction in tomato (*Lycopersicum esculentum*). *Physiological Plantarum.* 107:267-76.
- Navarro-Bravo, A. B. Figueroa-Sandoval, V.; Ordaz-Chaparro, M. y González, C. F. V. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra* 18:61-69.
- Oleschko, K. and Chapa, G. J. R. 1989. Structural dynamics of a Mollic Andosol of Mexico under tillage. *Soil Tillage Res.* 15:25-40.
- Ovalles, V. F. A. y Rey, B. 1995. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del lago de valencia. *Agron. Trop.* 44(1):41-65.
- Panayiotopoulos, K.; Papadopoulou, C. and Hatjiionndou, A. 1994. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedling. *Soil Tillage Res.* 31:323-337.
- Quiroga, A. R.; Buschiazzi, D. E.; and Peinemann, N. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Tillage Res.* 52:21-28.
- Richardson, C. W. and King, K. W. 1995. Erosion and nutrient losses from zero tillage on a clay soil. *J. Agric. Eng. Res.* 61:81-86.
- Salton, J. C. y Mielniczuk, J. 1995. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um podzólico vermelho-escuro de El dorado do Sul (RS). *Revista Brasileira de Ciencia do Solo.* 19(2):313-319.
- Slepetiene, A. and Slepetys, J. 2005. Status of humus in soil under various long-term tillage systems. *Geoderma.* 127:207-215.
- Sharma, K. L.; Mandal, U. K.; Srinivas, K.; Vittal, B. K.; Mandal, J. K.; Grace, K. P. R. and Armes, V. 2005. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil Tillage Res.* 83:246-259.
- Thierfelder, C.; Amézquita, E. and Stahr, C. 2005. Effects of intensifying organic manuring and tillage practices on penetration resistance and infiltration rate. *Soil Tillage Res.* 82:211-226.
- Tiscareño-López, M.; Báez-González, A. D.; Velázquez-Valle, M.; Potter, K. N.; Stone, J. J.; Tapia-Vargas, M. and Claverán-Alonso, R. 1999. Agricultural research for watershed restoration in central Mexico. *J. Soil and Water Conservation.* 54(6):686-692.