Regeneración de la estructura edáfica y su efecto sobre el ingreso del agua. Evaluación del agregado de enmiendas en Argiudoles bajo siembra directa

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias del Suelo.

Emmanuel Adrián Gabioud

Ing. Agrónomo - Universidad Nacional de Entre Ríos - 2009

INTA – Área de Recursos Naturales – EEA Paraná

FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano

Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis
María Carolina Sasal
Ing. Agrónoma - Universidad Nacinal de Rosario
Doctora de la Universidad de Buenos Aires. Área Ciencias Agropecuarias

Co-director de Tesis
Celio Ignacio Chagas
Ing. Agrónomo - Universidad de Buenos Aires
Doctor de la Universidad de Buenos Aires. Área Toxicología

Consejero de Estudios
Marcelo Germán Wilson
Ing. Agrónomo - Universidad Nacional de Entre Ríos
Doctor en Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente - Universidad Da Coruña, España

JURADO DE TESIS

Director de Tesis
María Carolina Sasal
Ing. Agrónoma - Universidad Nacinal de Rosario
Doctora de la Universidad de Buenos Aires. Área Ciencias Agropecuarias

JURADO
Adrián E. Andriulo
Ing. Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario
Doctor en Ciencia del Suelo – Institut National Agronomique de Paris-Grignon, Francia

JURADO
Carina R. Alvarez
Ing. Agrónoma - Universidad de Buenos Aires
Doctora de la Universidad de Buenos Aires. Área Ciencias Agropecuarias

JURADO
Silvia del Carmen Imhoff
Ing. Agr. – Universidad Nacional del Litoral
Dra. en Ciencias Agropecuarias – Universidade de Sao Pablo, Brasil

Fecha de defensa de la tesis: 9 de AGOSTO de 2018

Dedicatoria

A Andrea y Francina, mis dos grandes amores.

Agradecimiento

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y al Grupo de Recursos Naturales de la EEA Paraná por el aporte económico e infraestructura para la realización de este trabajo.

A Carolina Sasal y Marcelo Wilson por su apoyo incondicional durante todos estos años

A los evaluadores Adrián Andriulo, Carina Álvarez y Silvia Imhoff, por el tiempo dedicado a este trabajo y por sus valiosas sugerencias.

A Celio Chagas, por su tiempo y sus valiosas sugerencias

A Mariela, Stella, Nati, José, Seba, Hernán y Caro por la ayuda en los muestreos de campo, en los análisis de laboratorio, en la presentación oral y por apoyarme en aquellos días que no eran de los mejores.

A mi familia por el apoyo desde siempre.

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo, y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: Introducción General 1
1.1 El suelo y su uso agrícola, generalidades. 2
1.2 Estructura de suelos limosos 4
1.3 Utilización de enmiendas orgánicas como práctica mejoradora de la estructura del suelo. 8
1.4 Utilización de enmiendas inorgánicas como práctica mejoradora de la estructura del suelo. 10
1.5 Métodos para evaluar la condición estructural en suelos 13
1.5.1 Métodos visuales directos 14
1.5.2 Mediciones directas complementarias 17
1.5.3 Mediciones complementarias de laboratorio 18
1.5.4 Métodos indirectos 20
1.6 Hipótesis de trabajo 21
1.7 Objetivo General: 22
1.8 Objetivos Específicos: 22
CAPÍTULO II: Caracterización del estado estructural de un Argiudol en manejos agrícolas contrastantes de mediano-largo plazo y relación con la infiltración 23
2.1 Introducción 24
2.2 Materiales y Métodos 26
2.2.1 Caracterización del sitio de estudio 26
2.2.2 Condiciones climáticas de la zona de estudio 28
2.2.3 Ensayo de labranzas de larga duración 31
2.2.4 Ensayo de rotaciones de cultivos bajo SD 32
2.2.5 Mediciones a campo 32
2.3 Resultados y Discusión 39
2.3.1 Efecto de sistemas de labranza sobre el estado estructural 39
2.3.2 Efecto de las rotaciones de cultivo bajo SD sobre el estado estructural 42
2.3.3 Caracterización estructural mediante el ingreso del agua al suelo 46
2.4 Conclusión 49
CAPÍTULO III: Evaluación de la aplicación de enmiendas orgánicas o inorgánicas como prácticas de corto plazo para la regeneración de la estructura 50
3.1 Introducción 51

3.1.1 Oportunidades de disponibilidad de enmiendas orgánicas e inorgánicas en la Provincia de Entre Ríos 52
3.2 Materiales y Métodos 55
3.3 Resultados y Discusión 64
3.3.1 Análisis de la evolución estructural usando el Perfil Cultural 64
3.3.2 Propiedades físicas de las estructuras del Perfil Cultural a los 20 meses post aplicación. 72
3.3.3 Estado estructural del suelo determinado mediante las propiedades físicas ponderadas 81
3.3.4 Modificaciones en el Carbono Orgánico del Suelo por el agregado de enmiedas. 84
3.3.4 Estudio del escurrimiento de agua 85
3.4 Conclusión: 88
CAPÍTULO IV: Consideraciones Finales 90
BIBLIOGRAFÍA 94

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1.	Características del suelo del sitio experimental……..	28
Tabla 2.	Valores de la proporción de ocupación en los perfiles culturales de las distintas estructuras encontradas en las parcelas LV y SD del ensayo de labranza……..	40
Tabla 3.	Valores de Dap y de PE de las distintas estructuras encontradas en las parcelas LV y SD del ensayo de labranza……..	42
Tabla 4.	Valores de la proporción de ocupación en los perfiles culturales de las distintas estructuras……	45
Tabla 5.	Valores de Dap y de PE de las distintas estructuras encontradas en las parcelas Sj – Sj y Mz – Tr/Sj bajo SD del ensayo de rotaciones……..	46
Tabla 6.	Caracterización físico – química de las enmiendas C y Y utilizadas……..	57
Tabla 7.	Proporción de estructura P a los 20 meses post aplicación para los tratamientos de enmiendas……...	68
Tabla 8.	Valores de Dap, RC y PT de las distintas estructuras halladas en los perfiles culturales a los 20 meses post aplicación de las enmiendas……...	73
Tabla 9.	Valores de PE, de las distintas estructuras halladas en los perfiles culturales a los 20 meses post aplicación de las enmiendas……..	76
Tabla 10.	Valores de DMPd, de Γ y P a los 20 meses post aplicación para cada tratamiento de enmiendas…….....	80
Tabla 11.	Valores de DMPc, de Γ, P, Φ y Δ a los 20 meses post aplicación para cada tratamiento de enmiendas…….....	80
Tabla 12.	Valores ponderados del perfil completo para Dap, PT, P>300µm, P 300-50µm, P 50-12,5, P< 12,5µm, PE, RC, DMPm, DMPe, DMPd y DMPc, a los 20 meses post aplicación para cada tratamiento de enmiendas……..	82
Tabla 13.	Valores ponderados de las estructuras superficiales del perfil para Dap, PT, P>300µm, P 300-50µm, P 50-12,5, P< 12,5µm, PE, RC, DMPm, DMPe, DMPd y DMPc, a los 20 meses post aplicación para cada tratamiento de enmiendas……..	82
Tabla 14.	COS para dos profundidades de la condición inicial y a los 20 meses post aplicación de los tratamientos de enmiendas……	84
Tabla 15.	Parámetros de la curva de escurrimiento a los 20 meses post aplicación de los tratamientos de enmiendas…….	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución en la provincia de Entre Ríos de los principales Órdenes de suelos…...	3
Figura 2.	Imagen del perfil de suelo serie Tezanos Pinto……...	28
Figura 3.	Temperaturas media, media máxima y media mínima mensuales de la EEA Paraná INTA……...	29
Figura 4.	Marcha mensual de la humedad relativa media de la EEA Paraná INTA……...	29
Figura 5.	Precipitación anual desde 1935 hasta 2005 de la EEA Paraná INTA……...	30
Figura 6.	Distribución porcentual de las precipitaciones anuales de la EEA Paraná INTA…….....	30
Figura 7.	Parcelas ensayo de larga duración de labranzas. INTA EEA Paraná……...	31
Figura 8.	Parcelas ensayo de rotaciones de cultivos. INTA EEA Paraná……	32
Figura 9.	Imagen de una trinchera donde se describirán y delimitarán los distintos tipos de estructuras……...	33
Figura 10.	Descripción de los tipos de estructuras identificadas en los perfiles culturales…….	34
Figura 11.	Foto ensamblada de un Perfil Cultural, la imagen corresponde a un lote de producción bajo SD de la EEA Paraná y en ella se pueden observar las delimitaciones realizadas a campo de los tipos de estructuras encontrados……	35
Figura 12.	Imagen de un Perfil Cultural de un lote de producción bajo SD de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados……..	35
Figura 13.	Imágenes de perfiles culturales de lotes de producción bajo SD EEA Paraná. La Fig. a) esquematiza el criterio para evaluar el espesor de P; la b) esquematiza el procedimiento para cuantificar la continuidad de P……	36
Figura 14.	Esquema y foto del simulador de lluvia empleado para las mediciones a campo de escurrimiento……	38
Figura 15.	Imagen del Perfil Cultural de la parcela LV del ensayo de labranzas de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados…	39
Figura 16.	Imagen del Perfil Cultural de la parcela SD del ensayo de labranzas de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados…	41
Figura 17.	Imagen del Perfil Cultural de la parcela Sj – Sj bajo SD del ensayo de rotaciones de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados…….	43
Figura 18.	Imagen del Perfil Cultural de la parcela Mz – Tr/Sj bajo SD del ensayo de rotaciones de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados…….	44
Figura 19.	EB (mm h^{-1}) para LV y SD en dos momentos de simulación: barbecho y post cosecha……	47
Figura 20.	EB para rotación Mz-Tr/Sj y para Sj-Sj bajo SD……...	48
Figura 21.	Distribución en la provincia de Entre Ríos de las granjas de pollos parrilleros; granjas de gallinas ponedoras y frigoríficos avícolas……	52
Figura 22.	Ubicación y distribución de los tratamientos de enmiendas. EEA Paraná INTA……..	56
Figura 23.	Momentos de muestreo de la condición estructural y de aplicación de las enmiendas en el ensayo en la EEA Paraná……...	58
Figura 24.	Instrumental utilizado y forma de medición de RC a campo…….	59
Figura 25.	Mesa de tensión con placas de yeso para la determinación de la distribución de tamaño de poros……	60
Figura 26.	Cilindros de muestra no disturbada en proceso de humectación……	60
Figura 27.	Imágenes de los pre tratamientos de laboratorio de la metodología de Le Bissonnais (1996)…….	62
Figura 28.	Ejemplo de modelo bilineal plateau donde se señalan los parámetros de la curva de escurrimiento estudiados……	63
Figura 29.	Distribución de estructuras presentes en el Perfil Cultural representativo de la situación inicial, antes de la aplicación de las enmiendas…….	64
Figura 30.	Descripción visual del cambio en la distribución en el Perfil Cultural de las estructuras. Columnas representan el tiempo post aplicación, y las filas representan los tratamientos de enmiendas…….	65

Figura 31. Proporción de estructura Γ a los 2, 12 y 20 meses post aplicación para los tratamientos de enmiendas…… 67
Figura 32. a) proporción de estructura P a los 2, 12 y 20 meses post aplicación. b) proporción de estructura P para los tratamientos de enmiendas……... 68
Figura 33. a) espesor de estructura P (cm) a los 20 meses post aplicación y b) continuidad de estructura P (%) a los 20 meses post aplicación, para los tratamientos de enmiendas……... ……..... 69
Figura 34. a) correlación entre el % de Γ y P b) continuidad de estructura P (%) a los 20 meses post aplicación, para los tratamientos de enmiendas……...……... 70
Figura 35. Distribución de tamaños de poros de las estructuras halladas en los Perfiles Culturales a los 20 meses post aplicación de las enmiendas…….. 75
Figura 36. Estabilidad de agregados medido mediante el DMPm para las estructuras Γ y P de los distintos tratamientos de enmiendas a los 20 meses post aplicación…… 78
Figura 37. Estabilidad de agregados medido mediante el DMPe para la estructura Γ en los tratamientos de enmiendas, a los 20 meses post aplicación……...……..…….. 79
Figura 38. Representación gráfica del modelo bilineal plateau para los tratamientos Testigo y Yeso…… 87

ABREVIATURAS

Γ	Estructura Gamma
Δ	Estructura Delta
Φ	Estructura Phi
C	Cama de pollo
Ca	Calcio
COS	Carbono Orgánico del Suelo
Dap	Densidad aparente del suelo
DAt	Densidad aparente textural
DMP	Diámetro medio ponderado
DMPc	Diámetro medio ponderado pretratamiento capilaridad
DMPd	Diámetro medio ponderado pretratamiento disgregación mecánica
DMPe	Diámetro medio ponderado pretratamiento estallido
DMPm	Diámetro medio ponderado promedio de los tres pretratamientos
EA	Estabilidad de Agregados
EB	Escurrimiento Base
h-s	Ciclos de humedecimiento y secado
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
LV	Labranza Vertical
MO	Materia Orgánica
Mz	Cultivo de maíz
P	Estructura Laminar (Platy)
PC	Perfil Cultural
PE	Porosidad Estructural
PT	Porosidad Total
P>300µm	Porosidad mayor a 300 micrones
P 300-50µm	Porosidad entre 300 y 50 micrones
P 50-12,5 µm	Porosidad entre 50 y 12.5 micrones
P< 12,5µm	Porosidad menor a 12.5 micrones
RC	Resistencia al corte
SD	Siembra Directa
Sj - Mz	Rotación soja - maíz
Sj - Sj	Monocultivo de soja
Tr/Sj	Rotación trigo - soja
Tr/Sj-Mz	Rotación trigo/soja-maíz
Y	Yeso agrícola

RESUMEN

Regeneración de la estructura edáfica y su efecto sobre el ingreso del agua. Evaluación del agregado de enmiendas en Argiudoles bajo siembra directa

La descripción de la estructura superficial de suelos limosos bajo siembra directa (SD) destaca la presencia de estructura laminar (P) que restringe significativamente el ingreso de agua. En el corto plazo, las prácticas de labranza y en el mediano-largo plazo, las rotaciones de cultivos, generan cambios estructurales relevantes. En Entre Ríos existe la oportunidad de emplear cama de pollo (C) y yeso (Y) como enmiendas a corto plazo para modificar la condición estructural. El objetivo es contribuir al estudio de la regeneración de la estructura de suelos Argiudoles bajo SD mediante prácticas de manejo agrícola. Se aplicó la metodología del Perfil Cultural (PC) y simulaciones de lluvia en ensayos de campo (labranzas; rotaciones de cultivos y enmiendas) y mediciones de laboratorio (Dap: densidad aparente, PE: porosidad estructural, EA: estabilidad de agregados, distribución de tamaños de poros, entre otros) a los fines de cuantificar los cambios en la condición estructural del suelo. Los ensayos de mediano-largo plazo de laboreo y secuencia de cultivos generaron cambios estructurales contrastantes en el horizonte superficial donde las mediciones de escurrimientos fueron mayores en SD con respecto a LV. El estado estructural de SD se caracterizó por la presencia de estructura P superficial entre 5 a 10 cm de espesor, que se magnificó en Sj-Sj. Las enmiendas de disponibilidad regional, mostraron potencialidad para remediar las condiciones estructurales desfavorables del suelo. La C aumentó la proporción de estructura gamma (Γ), en detrimento de P, debido al fomento de la actividad biológica del suelo. Γ presentó mejoras en las condiciones físicas de Dap, PT, PE y distribución de tamaños de poros. El Y aumentó la EA, principalmente de la estructura Γ. Se ha logrado avanzar en el conocimiento de la evolución de P y su regeneración. Se está en condiciones de proponer prácticas agrícolas bajo SD que optimicen la producción y minimicen el impacto ambiental.

Palabras clave: estructura gamma; estructura laminar; labranzas; rotaciones de cultivos; cama de pollo; yeso agrícola; perfil cultural

ABSTRACT

Regeneration of the soil structure and its effect on water infiltration. Assessment of soil amendments applied on Argiudols under no-tillage

Surface soil structure of silty soils under no-till is characterized by the development of a P structure that restricts water infiltration. Cultural practices can be used to modify soil structure in the short term, e.g. tillage practices, and in the medium-long term, e.g. crop sequences. Poultry litter (C) and gypsum (Y) are available soil amendments in Entre Ríos Province, for short-term modification of soil structure. The objective of this study is to advance in the understanding of regeneration of surface soil structure of agricultural soils under no-till. Changes in soil structure and associated soil properties were evaluated in long-term field experiments through cultural profile technique and rainfall simulations in the field, and soil bulk density (Dap), aggregate stability (AE), soil pore distribution, among others, evaluations in the laboratory. Long-term field experiments exhibited contrasting soil structure in the surface layer among tillage practices. No-till treatments were characterized by the presence of soil P structure between 5 to 10 cm deep, that was greater thickness for only soybean (Sj-Sj) crop sequence. No-till plots were also characterized by increased runoff (e.g. reduced water infiltration) compared to vertical tillage. The addition of soil amendments suggested potential for restoring soil structure under no-till. Addition of C increased the proportion of Γ structure and decreased P structure, due to promotion of soil biological activity. The increased Γ structure type with C addition was also associated to improved soil physical conditions (Dap, PT, PE and soil pore distribution). The addition of Y increased EA of Γ structure type. The results of this work contribute to explain the temporal evolution of P structure formation and its regeneration. The use of poultry litter and gypsum in no-till agricultural systems seem to be promising practices for optimizing crop production and minimizing environmental impact.

Keywords: Gamma structure; Platy structure; tillage; crop rotations; poultry litter; gypsum; cultural profile.

CAPÍTULO I

Introducción General

1.1 El suelo y su uso agrícola, generalidades

El suelo es un sistema biofísico complejo y dinámico sobre el cuál el hombre ejerce actividades productivas. El uso agrícola del suelo genera procesos que pueden alterar su estructura y, en consecuencia, la entrada de aire, agua y raíces, la disponibilidad de nutrientes, la vida de los organismos y, por ende, la productividad de los agroecosistemas. Durante años, la producción agrícola ha intentado reemplazar procesos naturales con prácticas de manejo, por ejemplo las labranzas. Como resultado se ha generado compactación y erosión del suelo, aumentos en los costos de producción y, en muchos casos, disminución de rendimientos (Fowler, 2006).

Para atenuar la degradación de suelos, varias décadas atrás se desarrollaron diversos programas de transferencia que propiciaban la adopción de sistemas de labranza conservacionistas como la reducción de laboreos, la utilización de labranza vertical y más recientemente la siembra directa (SD). La SD comprende una serie de prácticas agronómicas que permiten un manejo del suelo con una perturbación mínima de su estructura y biodiversidad (European Conservation Agriculture Federation, 1999).

Argentina es uno de los países con mayor superficie bajo SD, con alrededor de 25 Mha, lo que constituye cerca del 78,5 % del total de área cultivada del país (AAPRESID, 2012). Además, la superficie destinada al cultivo de soja se ha duplicado en los últimos 10 años, alcanzando las 20,2 Mha en la campaña 2013/2014 (Bolsa de Comercio de Rosario, 2014) y dando origen a un escenario de simplificación agrícola (Aizen et al. 2009). En consecuencia, la producción agrícola bajo SD plantea la necesidad de estudiar nuevos aspectos de la degradación física de los suelos cultivados, a fin de asegurar que la evolución de la estructura edáfica no constituya una limitante a su sustentabilidad.

En la región pampeana, el 65% de los suelos del orden Molisol pertenecen al gran grupo Argiudol (Imbellone et al. 2010). En el caso de la provincia de Entre Ríos (Figura 1), los Molisoles (gran grupo Argiudol en su mayoría) ocupan una superficie de alrededor del 25% de la provincia y entre el 50 y el 75% de la superficie se destina a la producción de granos (Bolsa de Cereales de Entre Ríos) y el principal cultivo es la soja. Los subgrupos vérticos y ácuicos son los más importantes (53 y 30 % respectivamente de representatividad dentro del gran grupo) (Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Entre Ríos, 1984). Ambos suelos tienen horizontes superficiales con características similares y de buena aptitud agrícola, diferenciándose en el tipo de arcilla predominante del horizonte B, con la presencia de esmectitas en el caso del subgrupo vértico (Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Entre Ríos, 1984).

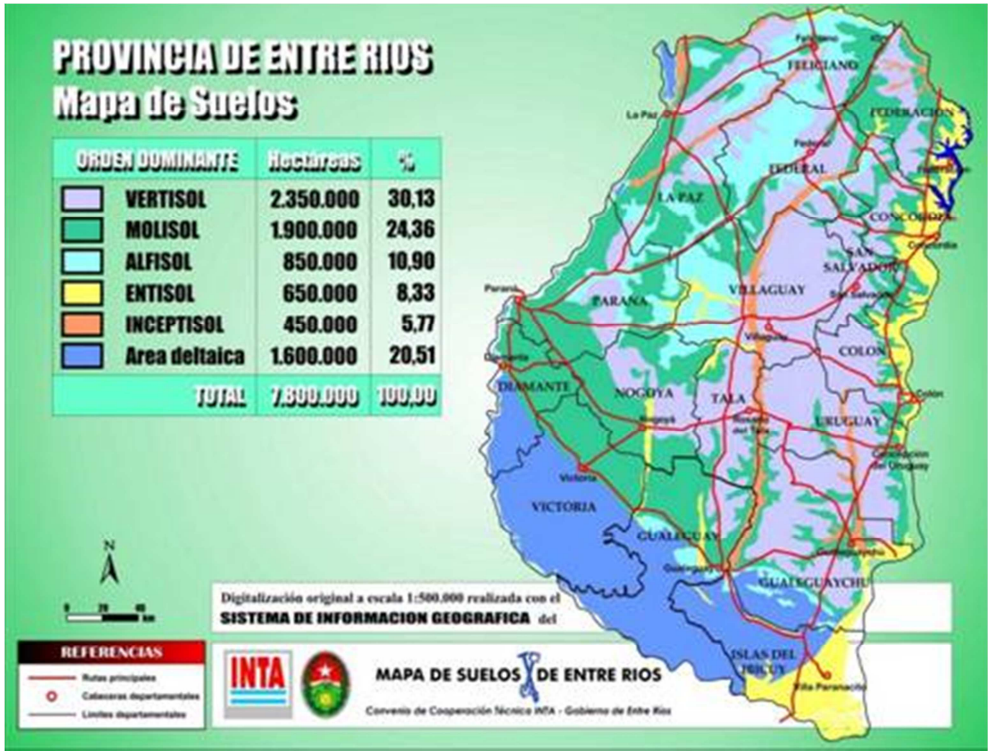

Figura 1: distribución en la provincia de Entre Ríos de los principales Órdenes de suelos (Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Entre Ríos, 1984).

1.2 Estructura de suelos limosos

La estructura del suelo fue definida por Dexter (1988) como "la heterogeneidad espacial de los diferentes componentes o propiedades del suelo". La caracterización de la estructura en condiciones de campo de producción cobra mucha relevancia debido a que condiciona los procesos físicos, químicos y biológicos que repercuten en el óptimo funcionamiento del suelo. Por esto, la evaluación de la estructura del suelo es un importante componente para definir la calidad del suelo (Ball y Munkholm, 2015).

La estructura de los horizontes limosos cultivados en campos de producción, presenta heterogeneidad espacio-temporal debido a procesos antropogénicos (labranza y compactación) y a procesos naturales (clima, crecimiento radical y actividad de microrganismos y de la fauna). Dichos procesos alteran la disposición espacial, el tamaño y la forma de los agregados del suelo, así como el sistema de poros inter e intra - agregados (Dexter, 1988). El comportamiento físico de los suelos limosos de clima húmedo ha sido ampliamente estudiado por muchos autores. Estos suelos se caracterizan por su susceptibilidad natural a compactarse y a presentar estructuras de tipo masivas, homogéneas; además, en estos suelos, el tránsito continuo y no controlado de implementos agrícolas y las labores de remoción del suelo conducen a su degradación y, en presencia de pendientes, a procesos de erosión hídrica (Voorhees y Lindstrom, 1984; Alakukku, 1998; Topp et al. 2002; Fernández et al. 2015). En este sentido, la compactación del suelo comprende más que sólo un aumento en la densidad aparente (Dap), altera significativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Kahnt et al. 1986; Oades, 1993; Hakansson, 1994; Soane y Van Ouwerkerk, 1995). La degradación por compactación afecta los flujos de gas y de agua, el espacio, geometría y conectividad de poros debido al amasado, la homogeneización y la pérdida de estructura (Briggs y

Courtney, 1985; Röhrig et al. 1998; Langmaack et al. 1999) y conlleva impactos ambientales negativos tales como el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Soane y Van Ouwerkerk, 1995; Ball et al. 1999; Bessou et al. 2010) o de la erosión por escorrentía (Batey, 2009). Además, alteraciones de la estructura que conlleven al desarrollo de estructuras compactadas, afectan la configuración radical de los cultivos (Gliriski y Lipiec, 1990; Lipiec y Simota, 1994) y el contacto suelo - raíz (Veen et al. 1992).

Suelos arenosos y limosos suelen desarrollar una compactación a nivel superficial de corto plazo cuando se cambia de la labranza convencional a la siembra directa (SD), lo cual se ve reflejado en aumentos de la Dap y la resistencia a la penetración y en disminuciones de la macroporosidad (Carter, 1990; Logan et al. 1991; Pierce et al. 1994). Dicha compactación superficial resulta principalmente del colapso de los poros más grandes del suelo por la acción de tensiones externas o internas ejercidas sobre el suelo (Hill et al. 1985). Voorhees y Lindstrom (1984) y Pierce et al. (1994) reportan que los suelos arcillo - limosos bajo SD requieren de 3 a 4 años para recuperarse de la compactación y recobrar una porosidad más favorable para el desarrollo vegetal. Considerando un plazo más largo, la acumulación de carbono orgánico superficial proporciona una forma estructural menos susceptible a la compactación (Logan et al. 1991; Álvarez et al. 1995; Thomas et al. 1996).

La evolución de la estructura del suelo después de la compactación cobra importancia para el caso de la SD. Diversos estudios reportan a la regeneración de la estructura de suelos limosos bajo SD como una evolución desde estructuras compactas (masivas) hacia estructuras fragmentadas en largo plazo. Dicha evolución depende de factores naturales tales como la contracción y expansión que se produce durante los ciclos de humedeciendo y secado y la acción del crecimiento de plantas, fauna y otros mecanis-

mos biológicos de agregación o fisuración (Dexter, 1988; Taboada et al. 2004; Drewry, 2006; Taboada et al. 2008; Boizard et al. 2013).

En la actualidad, los suelos limosos de la región pampeana argentina son predominantemente cultivados bajo SD. Dicha práctica resulta adecuada para mitigar procesos erosivos asociados a la labranza. Sin embargo, combinada con la simplificación de las secuencias o monocultivo este sistema puede generar degradación de la estructura superficial del suelo, compactación, reducción en la tasa de infiltración y en la estabilidad de la estructura ocasionando aumento en las pérdidas de agua por escurrimiento (Sasal et al. 2017 a y b). Este problema se acentúa por el tránsito generalizado no controlado y las repetidas pasadas de maquinaria durante la cosecha de los principales cultivos de verano (soja y maíz), en condiciones de humedad por encima del óptimo para el pasaje de ruedas. Además, la baja capacidad de regeneración natural de la estructura del suelo se ve reducida debido a la ausencia de procesos de congelación-descongelación y la arcilla tipo illita, que tiene baja capacidad de contracción-hinchamiento (Senigagliesi y Ferrari, 1993; Taboada et al. 1998; Hussein y Adey, 1998; Rajarama y Erbachb, 1999). En este sentido, la recuperación natural de la porosidad es mucho más lenta en sistemas de labranza reducida (Boizard et al. 2013).

Trabajos recientes que describen la estructura superficial de suelos limosos bajo SD destacan un ordenamiento vertical de distintos tipos de estructuras y, en general, la presencia de estructura de tipo laminar, denominada P (platy, por su traducción del inglés), en los primeros centímetros de suelo (VandenBygaart et al. 1999; Pagliai et al. 2003; Morras et al. 2004; Sasal et al. 2006; Álvarez et al. 2009; Sasal 2012; Lozano et al. 2013; Álvarez et al. 2014). La estructura P se caracteriza por la presencia de agregados alargados orientados de manera paralela a la superficie. Este tipo de estructura se puede presentar en forma de capas continuas o discontinuas a lo largo del perfil cerca de

la superficie e incluso desde la superficie y se ha demostrado que restringe de manera significativa el ingreso de agua al suelo (Sasal, 2012) debido a la tendencia elongada y horizontal que presentan sus poros (Pagliai et al. 1983; Drees et al. 1994; VandenBygaart et al. 1999; Sasal et al. 2006; Álvarez et al. 2014), lo cual los hace menos efectivos en la conducción de agua que aquellos de sentido vertical.

El origen de la estructura P todavía está en discusión. Sin embargo, Sasal et al. (2017b) determinaron que la compactación es una condición necesaria para su desarrollo y que el papel del clima (mediante los ciclos de humedecimiento y secado) es importante en la generación de grietas horizontales que se desarrollan desde la superficie hasta alrededor de 10 cm de profundidad. En el mismo trabajo se demostró que el tránsito no es un factor determinante para la evolución de la estructura P en SD. Sin embargo, la alternancia de períodos de humectación y secado es determinante en las modificaciones estructurales del suelo, particularmente en suelos compactados.

Si bien, como se mencionó anteriormente, la estructura P tiene origen en la reestructuración por ciclos de h-s y actividad de raíces desde una condición previa densificada (Sasal, 2012), la formación de estructura P puede considerarse como un proceso de regeneración o de degradación de la estructura del suelo según su efecto sobre el funcionamiento hídrico. Así, un caso de re-establecimiento de porosidad estructural que se habría perdido por compactación, debido a la formación de una estructura laminar con poros de orientación preferencialmente horizontal que restringe el ingreso del agua al suelo, constituye un proceso de degradación. Aunque seguramente ofrecerá una mejora en la infiltración si se la compara con la situación previa compactada. En consecuencia, surge la necesidad de profundizar el análisis de la evolución de la estructura bajo SD y particularmente del efecto que diferentes prácticas de manejo puedan imprimirle.

En este contexto, el entendimiento de procesos y la identificación de prácticas que contribuyen con la regeneración estructural es clave ya que la alteración de la estructura edáfica puede tener consecuencias ambientales a escalas local (como aumento de la erosión, disminución de fertilidad y reducción de la biodiversidad), regional (como la contaminación del agua subterránea y la eutrofización de cursos de agua superficiales) y global que incluye el impacto sobre el clima (Matson et al. 1997; Rockström et al. 2009).

1.3 Utilización de enmiendas orgánicas como práctica mejoradora de la estructura del suelo

La aplicación de enmiendas orgánicas, como fuente de macro y microelementos para las plantas, es una práctica tradicional en la agricultura. Además de suministrar nutrientes en el corto plazo, la aplicación de enmiendas orgánicas tiene efectos benéficos en las propiedades físicas del suelo (Lemmermann y Behrens, 1935; Low, 1954).

El agregado de materia orgánica exógena es decir, los materiales orgánicos añadidos al suelo (de origen tan diverso como animal, vegetal o incluso urbano), según el informe elaborado sobre “la materia orgánica y la biodiversidad dentro de la Estrategia Temática Europea del Suelo del año 2006”, es una alternativa para poder mejorar la calidad, fertilidad y productividad de los suelos que presenten algún síntoma de degradación (Tejada et al. 2010). Estas adiciones deben contribuir a proporcionar materia orgánica lábil en cantidad suficiente como para estimular la vida de los microorganismos que habitan en el suelo. Con la adición de enmiendas orgánicas al suelo se produce un incremento en el contenido de materia orgánica del mismo. Este incremento depen-

derá de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, de la dosis de material orgánico y de la forma y frecuencia de aplicación (Moreno et al. 2007).

De forma general, la adición de enmiendas orgánicas puede influir positivamente en su estructura, incrementando la formación y estabilidad de agregados (Tisdall y Oades, 1982; Piccolo y Mbagwu, 1990; Sasal et al. 2000), disminuyendo la Dap (Khaleel et al. 1981; Clapp et al. 1986; Tester, 1990), mejorando las tasas de infiltración de agua, la conductividad hidráulica (Unc y Goss, 2006) y la capacidad de retención hídrica del suelo (Stevenson, 1982; Roldán et al. 2003). Estos cambios en las propiedades físicas edáficas permiten además disminuir la escorrentía, reduciendo la pérdida de nutrientes, y mejorando así el desarrollo vegetal (Bastida et al. 2008). Por lo expuesto, se puede destacar que el aumento de agregados estables detectado en suelos enmendados es fundamental para que mejore la productividad y fertilidad de los suelos.

Es bien conocido que los restos orgánicos de cosecha mejoran el contenido de carbono orgánico del suelos (COS) y la estabilidad estructural, variando según las características bioquímicas y la biodegradabilidad de los residuos (Martens, 2000; Abiven et al. 2007; Annabi et al. 2007). La descomposición de los residuos estimula la actividad microbiana lo cual resulta en la producción de agentes biológicos de agregación (polisacáridos, hifas fúngicas) e incrementa la estabilidad de los agregados (EA) al aumentar la hidrofobicidad de los agregados y la cohesión de las partículas (Chenu et al. 2000; Cosentino et al. 2006; Annabi et al. 2007). La incorporación de materiales orgánicos con mayores tasas de biodegradabilidad induce aumentos fuertes pero transitorios sobre estabilidad de los agregados respecto de materiales recalcitrantes que pueden tener un efecto más débil pero de mayor duración. Cosentino et al. (2006) y Abiven et al. (2007) reportaron un importante incremento de carácter transitorio en la agregación del suelo luego de la adición de residuos de cosecha, contribuyendo a las va-

riaciones intra – anuales observadas en muchas de las propiedades físicas. Por otra parte, la ubicación de los residuos en el suelo influye sobre la disponibilidad de los agentes de agregación. Cuando los residuos son incorporados mediante labranzas, la tasa de descomposición es más rápida dado que se incrementa el área de contacto con los microorganismos en comparación con los residuos dejados en superficie (Wagner y Wolf, 1999).

Si bien la literatura reporta mejoras en distintos indicadores de calidad física del suelo, se desconoce el efecto de la utilización de una enmienda orgánica para regenerar estructura P bajo SD. Paralelamente, en la actualidad la necesidad de encontrar nuevas fuentes de materia orgánica exógena, por ejemplo aquellas basadas en residuos provenientes de producciones animales intensivas, se complementa con la necesidad de darle distinto final a residuos de producciones animales en confinamiento. Cabe destacar que, su empleo se debe realizar conociendo claramente el tipo de material orgánico a tratar, y en qué condiciones debe ser usado para no originar problemas en lugar de beneficios (Krebs et al. 1998). Por lo anteriormente expuesto, es necesario realizar una caracterización previa de los residuos orgánicos que se utilicen como enmienda para los suelos, evitando con ello cualquier riesgo que derive de su uso, así también es recomendable realizar un monitoreo de las propiedades edáficas y las respuestas de los cultivos de la zona donde se utilicen estos tipos de enmiendas (Singh y Agrawal, 2008).

1.4 Utilización de enmiendas inorgánicas como práctica mejoradora de la estructura del suelo

En los suelos de textura limosa se requiere una buena calidad de la estructura superficial para una adecuada penetración de las raíces, infiltración de agua, intercam-

bio de aire y drenaje del suelo. La utilización de enmiendas inorgánicas para la mejora en las propiedades físicas del suelo estuvo generalmente orientada a la formación y estabilización de agregados que son las características primarias de la estructura del suelo (Norton et al. 1998), como así también mejoras en cuanto a la resistencia a la penetración y macroporosidad (Orellana y Pilatti, 1990).

El calcio (Ca) es el componente de mayor relevancia en este tipo de enmiendas ya que puede ayudar a estabilizar la estructura de los agregados en algunos suelos (Chen y Dick, 2011; Fisher, 2011; Walworth, 2012). Las fuentes de Ca más comúnmente utilizadas incluyen yeso ($CaSO_4.H_2O$), cal agrícola ($CaCO_3$) y algunas otras sales de Ca como la dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$). Muchos trabajos coinciden en los beneficios de la aplicación de yeso en suelos con problemas de estructura debido a la sodicidad. En estos casos, el Ca promueve la floculación de las arcillas y protege al suelo del impacto de la gota de lluvia manteniendo una capa superficial porosa y reduciendo por consiguiente el escurrimiento (Keren y Shainberg, 1981; Agassi et al. 1982; Kazman et al. 1983). También, previene la formación de costras superficiales (Shainberg et al. 1989; Sumner y Miller, 1992).

En SD, la aplicación de productos correctores sólidos de naturaleza carbonatada (como la cal) constituye un problema debido a que no está habilitada su incorporación a través de labranzas (Terminiello et al. 2007). La baja solubilidad natural de estos productos calcáreos, magnificada por la falta de interacción suelo – corrector (ácidos orgánicos, CO_2, agua) reduce notablemente la eficacia de la práctica. En este sentido, Farina et al. (2000); Amaral et al. (2004); Vázquez et al. (2008, 2009 y 2013), entre otros, han propuesto la aplicación de dolomita o caliza en forma conjunta con el yeso. El yeso, es moderadamente soluble en agua (2.5 g l^{-1}), aproximadamente 200 veces mayor que la

cal agrícola. Esta característica de solubilidad del yeso hace que el Ca proveniente de este material sea más móvil en el suelo que el Ca de la cal (Chen y Dick, 2011).

Muchos suelos de regiones semiáridas y húmedas presentan una estructura inestable, lo que los hace susceptibles a sufrir procesos degradatorios, particularmente erosión hídrica, compactación y formación de estructura masiva (Voorhees y Lindstrom, 1984; Alakukku, 1998; Topp et al. 2002) y difíciles de manejar. Estos suelos tienden a dispersarse y forman una suspensión estable de partículas en agua. Como resultado, desarrollan una estructura más compactada, particularmente cerca de la superficie del suelo. La dispersión de arcilla es causada por la repulsión mutua entre las partículas, que resulta de la presencia de campos eléctricos negativos extensos que las rodean (Dontsova et al. 2004). La floculación es el proceso opuesto, donde la doble capa eléctrica está suficientemente comprimida de manera que las fuerzas atractivas permiten la aglomeración de las partículas individuales de arcilla en microagregados. La aplicación de yeso permite reducir la dispersión y promover la floculación de los suelos. La floculación es una condición necesaria para la formación y estabilización de la estructura del suelo y conlleva a un aumento de la infiltración y la percolación de agua (Dontsova et al. 2004; Norton et al. 1995; Norton y Rhoton, 2007; Norton, 2008).

Greene y Wilson, (1984 y 1989), trabajando en suelos con un horizonte Bt arcilloso expuesto, encontraron que la aplicación de enmienda de yeso superficial y luego incorporado con labranzas hasta 10 cm de profundidad, incrementaba la conductividad hidráulica en el perfil, con valores significativos: de 0,15 a 0,85 cm h^{-1}. La principal acción del yeso en estos suelos fue disminuir la dispersión de la arcilla por efecto electrolítico, y evitar así la obturación de los poros pequeños con partículas finas. Por su parte, Radcliffe et al. (1986), trabajando en un suelo con horizonte Bt arcilloso, mediante la aplicación de enmienda de yeso en superficie sin incor-

poración mecánica, observaron una disminución de la resistencia a penetración. Estos investigadores encontraron además, que las raíces de los cultivos proliferaron más en las parcelas cultivadas y con yeso, no así en parcelas con yeso pero en barbecho. Observaron también que entre 30 y 60 cm de profundidad, aumentó significativamente la proporción de agregados de 2 mm o mayores, a expensas de los menores de 0,25 mm, en parcelas de cultivo con yeso.

Algunos autores, señalan que en aplicaciones conjuntas de abonos orgánicos y yeso, se observó que el efecto del Ca en el complejo sorbente, se halla incrementado por la enmienda orgánica (Walker y Bernal, 2008; Jalali y Ranjbar, 2009) y que ambas acciones promueven una mejora estructural (Andreau et al. 2012).

1.5 Métodos para evaluar la condición estructural en suelos

La evaluación de la estructura del suelo puede realizarse a través de un gran número de métodos, a escalas muy diferentes, que pueden clasificarse en tres grupos: (1) caracterización del espacio poroso, (2) descripción de la disposición de la fase sólida del suelo (agregados, terrones, etc.) (3) evaluación de las propiedades del suelo, directa o indirectamente, relacionadas con las características de la fase sólida o del espacio poroso (Roger-Estrade, 2004). Para este último, Kay y Angers (2001) proponen que la estructura del suelo puede ser caracterizada en términos de:

- Forma estructural, que se refiere a la disposición heterogénea de los poros y de los sólidos del suelo en un momento dado. Se puede describir visualmente en términos de tamaño, forma y porosidad de unidades individuales de estructura (agregados).

- Estabilidad estructural, que es la habilidad del suelo para conservar su forma estructural luego de ser expuesto a un estrés.
- Resiliencia estructural, como la habilidad del suelo para recobrar su forma estructural debido a procesos naturales.

Para evaluar la condición estructural de un suelo (especialmente los procesos de degradación y/o regeneración de la estructura edáfica) existen distintos métodos de campo y de laboratorio. Las evaluaciones a campo pueden ser directas como los métodos visuales basándose en la caracterización morfológica de los distintos tipos de estructuras presentes (Manichon, 1987; Ball et al. 2007) o indirectas como la medición de infiltración, con simulaciones de lluvia (Aoki y Sereno, 2006) y la resistencia al corte (RC) o a la penetración. Los estudios de laboratorio en general pueden ser útiles para complementar e interpretar los resultados obtenidos a campo, en este sentido, determinaciones de la porosidad según el origen (estructural y textural) y distribución del tamaño de poros, que junto con la estabilidad estructural, son mediciones que pueden reflejar indirectamente tendencias hacia la regeneración de estructuras o mejoras en el ingreso de agua al perfil del suelo.

1.5.1 Métodos visuales directos

En los últimos años se han desarrollado evaluaciones sobre el terreno de la calidad de la estructura del suelo en varios países, Francia (Roger-Estrade et al. 2004), Dinamarca (Munkholm, 2000), Alemania (Beste, 2003, citado por Ball et al. 2007), Australia (Lawrie et al. 2000; McKenzie, 2001), Escocia (Ball y Douglas, 2003), Suiza (Hasinger et al. 2004) e Inglaterra (NSRI, 2001). El uso de métodos visuales de evaluación de estructura ha sido fomentado por las actividades del Grupo de Trabajo “Examen y evaluación visual del suelo” de la ISTRO (Organización Internacional de Investigación de la Labranza del Suelo). Los métodos directos para la evaluación visual de la estructu-

ra del suelo, utilizados directamente en el campo, son útiles para los agrónomos para la toma de decisiones de manejo del suelo relacionadas con la estructura. Estos métodos se basan en indicadores visuales tales como la porosidad visual, la disposición de los terrones o la facilidad con la que los terrones se rompen (Gautronneau y Manichon, 1987; Richard et al. 1999; Shepherd, 2009; Guimarães et al. 2011; Munkholm et al. 2013).

En este sentido, el método del "Perfil Cultural" (PC), formalizado por Manichon (1982), permite realizar una caracterización morfológica de la estructura del suelo de los horizontes cultivados. La caracterización se realiza en una cara de observación de una trinchera en dos etapas: (1) estratificación y (2) descripción de la estructura del suelo (Gautronneau y Manichon, 1987).

Boizard et al. (2002) utilizaron el enfoque morfológico propuesto por Manichon (1987) del PC para evaluar los efectos acumulativos de los sistemas de cultivo sobre la estructura del horizonte superficial bajo diferentes sistemas de labranza. El cambio de la estructura del suelo a lo largo del tiempo se evaluó mediante un indicador de evaluación visual de campo que se refiere a la proporción de terrones compactados (llamados Δ (Delta)). Este indicador proporcionó una descripción detallada (más allá de solo la medición de la Dap media del suelo) de los cambios en la estructura del suelo a lo largo del tiempo. La principal ventaja de este método es que tiene en cuenta las variaciones espaciales en la estructura del suelo causadas por la labranza, el tránsito y las condiciones climáticas. A diferencia de los resultados que se obtienen en las evaluaciones de laboratorio a partir de muestras obtenidas aleatoriamente a profundidades preestablecidas, esta metodología considera la heterogeneidad del suelo, la cual no siempre es captada en muestreos tradicionales.

Como anteriormente se mencionó, la metodología del PC consiste en la caracterización de la estructura en dos etapas:

1. Estratificación de los horizontes presentes en el PC.

Se distinguen primero los diferentes horizontes genéticos, o los delimitados por la profundidad de trabajo de las sucesivas herramientas de labranza. En segundo lugar, se realiza una estratificación lateral, basada en la localización de las huellas de los rodados. De esta manera se definen compartimentos dados por la intersección de los horizontes y la ubicación de las huellas. Esta estratificación es el marco para un mejor análisis de la variación espacial de la estructura del suelo.

2. Descripción de la estructura del suelo.

La estructura del suelo en el PC se describe en los compartimientos usando dos criterios. Cada uno de ellos aborda un nivel específico de organización del suelo. En primer lugar se considera el grado de compactación y la distribución del tamaño de los terrones. Las situaciones en las que la estructura del suelo es masiva se distinguen de aquellas donde los terrones pueden distinguirse (estructura fragmentaria). El suelo en los compartimientos del tipo “o” es altamente fragmentado, con la presencia de terrones pequeños y el dominio del suelo fino. El suelo en compartimientos tipo “b” se caracteriza por la presencia de terrones decimétricos. En estos compartimientos, los huecos se observan a menudo entre los terrones y se observa generalmente poco suelo fino. Los compartimientos “c” se caracterizan por ser estructuras masivas en las cuales no se pueden distinguir de manera individual a los terrones o agregados.

En un segundo paso, los terrones > 2 cm se clasifican en tres tipos, sobre la base de la importancia y el origen de su porosidad estructural interior visible al ojo:

(I) terrones, sin porosidad estructural visible a los ojos. Los agregados constitutivos se han reunido muy estrechamente bajo el efecto de una compactación severa en

condiciones húmedas que destruyen el espacio intersticial de los poros. Cuando se rompen manualmente, estos terrones presentan una cara de rotura lisa.

(II) terrones cuya porosidad estructural es claramente visible entre los agregados constitutivos.

III) terrones que se originan en terrones, donde aparecen grietas y fisuras.

Cada parte del horizonte cultivado se compone de volúmenes de suelo cuya estructura se describe mediante la combinación de estos dos criterios. La composición de un determinado compartimento cambia con el tiempo en respuesta al clima, la actividad de la fauna y las tensiones mecánicas aplicadas durante el ciclo del cultivo.

En muchas situaciones, este método ha demostrado ser eficiente para la caracterización en el campo de la dinámica de la estructura del suelo y la variación espacial, o la evaluación de los efectos de la estructura del suelo sobre el rendimiento del cultivo. El método del PC provee una interesante herramienta para estudiar la interrelación entre suelo - maquinaria y cultivo permitiendo por un lado caracterizar la variabilidad de la estructura e hipotetizar sobre su origen, por otro lado, permite focalizar los muestreos de otras propiedades físicas. Además, este método no usa equipamiento complejo ni costoso.

1.5.2 Mediciones directas complementarias

Otra metodología para evaluar el nivel de compactación del suelo y estimar su efecto sobre el desarrollo de los cultivos es la resistencia al corte (RC) del suelo, que está relacionada con la Dap del mismo. Algunos autores han informado que los valores de RC están estrechamente relacionados con las condiciones estructurales del suelo, tales como la macroporosidad y la resistencia del suelo (Ball y O'Sullivan, 1982; Carter, 1990). La RC del suelo depende de las fuerzas de cohesión entre las partículas y de la

resistencia friccional producida cuando el suelo es forzado a deslizarse sobre el suelo a lo largo de un plano de cizallamiento (Draghi y Hilbert, 2006). Como consecuencia, las RCs pueden ser bastante variables según la granulometría del suelo, la mineralogía y el contenido de materia orgánica y de agua.

1.5.3 Mediciones complementarias de laboratorio

El abordaje a través de la combinación de distintas metodologías de campo y laboratorio permiten detectar cambios y comprender el efecto que tienen diferentes prácticas de manejo sobre la morfología y funcionamiento del suelo. En este sentido, se han utilizado diversos métodos para evaluar los cambios en la estructura del suelo, tales como Dap, porosidad total (PT) y resistencia a la penetración (Coughlan et al. 1991).

En muchos casos, la combinación del enfoque morfológico y la medición de propiedades físicas en el laboratorio son de fundamental importancia para complementar y analizar de manera integral los cambios que pueden ocurrir en la estructura del suelo. La identificación de zonas que pueden alcanzar valores críticos de Dap resultan importantes para el estudio del comportamiento de los cultivos y el crecimiento de raíces (Tormena et al. 1999; Imhoff et al. 2001; Leão et al. 2006; Reichert et al. 2009; Wilson et al. 2013). Además, estas determinaciones complementarias pueden validar la elección de los criterios de descripción de las estructuras presentes en el PC y justifican su uso en trabajos experimentales diseñados para estudiar los efectos de la estructura del suelo en diferentes procesos: fragmentación (Coulomb et al. 1993), compactación (Richard et al. 1999), crecimiento de raíces y funcionamiento (Tardieu 1988), régimen de agua en el suelo (Sillon et al. 2003). En este sentido, Boizard et al. (2013) determinaron que a los tipos de estructura observados en un PC, correspondían a propiedades específicas del suelo y que la evolución hacia una estructura de suelo más porosa no siempre

resultó en propiedades del suelo mejoradas, particularmente cuando la creación de porosidad horizontal domina.

La caracterización del espacio poroso es otra manera de poder estudiar los cambios de la estructura. Un criterio consiste en la separación de poros por su origen, utilizando la técnica de densidad aparente textural en querosene (Stengel, 1988). Se obtiene la siguiente clasificación: porosidad textural, resultante de la distribución espacial de las partículas elementales, y porosidad estructural (PE), generada entre agregados y resultante de fuerzas externas que actúan sobre el suelo: clima, labranzas, agentes biológicos. Esta técnica evita la alteración de la distribución de la porosidad por contracción al utilizar un líquido no polar. Pero requiere un operador de laboratorio entrenado (Sasal et al. 2006). Además, la porosidad textural está altamente influida por el contenido de agua y de materia orgánica particulada de la muestra. Esta determinación es muy útil para la corroboración de zonas compactadas.

Otro criterio de clasificación de la porosidad del suelo es mediante la cuantificación de la distribución del tamaño de poros, la cual juega un rol fundamental en la caracterización del funcionamiento físico del suelo (Stengel, 1988). Existen varios criterios para clasificar la distribución del tamaño de los poros con diferentes metodologías de análisis (Lawrence, 1977). El más utilizado está basado en la capacidad de retención de agua de una muestra de suelo cuando se la somete a diferentes tensiones. Esta clasificación tiene sus restricciones, ya que asume que los poros del suelo son cilíndricos y no considera el fenómeno de histéresis (Logsdon y Jaynes, 1993). Sin embargo, es una determinación sencilla, no demanda personal calificado, y puede ser realizada como metodología de rutina en los laboratorios de suelos.

Además de las propiedades físicas descriptas en los párrafos anteriores, la EA es una propiedad que permite inferir sobre el estado estructural del suelo, ya que refleja la

capacidad del mismo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando se someten a fuerzas originadas por la acción del agua o de esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1990). Hénin et al. (1958) indican que la estabilidad de los agregados del suelo está condicionada especialmente por la acción del agua como factor de degradación y por la cohesión en estado húmedo como factor de resistencia. Así, la EA del suelo, por ser una característica edáfica dinámica, es considerada un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos (Doran y Parkin, 1994) y se encuentra relacionada con la actividad de los coloides, el contenido orgánico, la actividad microbiana (Pecorari, 1988; Chenu, 1993; Orellana y Pilatti, 1994; Chenu et al. 2000; Cosentino et al. 2006; Sasal et al. 2006), el laboreo del suelo (Gibbs y Reid, 1988), la secuencia y la frecuencia de cultivos en la rotación (Cerana et al. 2006; Novelli et al. 2010).

1.5.4 Métodos indirectos

El estudio del comportamiento del agua en lo referente al ingreso y distribución en el perfil del suelo, puede considerarse un indicador indirecto del estado estructural del suelo. En este sentido, la infiltración del agua de lluvia es la principal propiedad física afectada por el manejo del suelo, ya que de los factores que definen el proceso de infiltración, como la estructura del horizonte superficial y el grado de cobertura están íntimamente relacionados con dicho proceso (Marano et al. 2006). Además, ante la presencia de estructuras subsuperficiales desfavorables para el ingreso de agua como las laminares o las compactadas, la resultante estaría orientada hacia la pérdida de agua por escurrimiento.

Comúnmente la infiltración del agua en el suelo se mide con métodos in situ, ya sea en condiciones saturadas con anillos de infiltración e infiltrómetros de presión, o con infiltrómetros de tensión, lo que implica valores de potencial agua del suelo igual a

cero o levemente negativos (Lozano, 2014). El infiltrómetro de disco a tensión es una herramienta útil para comprender el movimiento de agua a través de macroporos y la matriz del suelo cerca de la saturación (Moret y Arrúe 2007) y para estudiar el efecto de las prácticas de manejo en las propiedades hidráulicas superficiales (Malone et al. 2003; Moret y Arrúe 2007).

Actualmente el uso de simuladores de lluvia cobra importancia debido a que el empleo de estos aparatos permite evaluar el comportamiento del suelo en lo referente a la relación infiltración – escurrimiento, además del efecto del golpeteo o "splash" de la gota de lluvia y de la cobertura superficial de los suelos. Los simuladores de lluvia son usados desde hace tiempo en investigaciones sobre erosión y escurrimiento, a campo y en laboratorio (Bryan y Ploey, 1983). Los datos obtenidos a partir de ensayos con estos aparatos permiten describir, mediante distintos modelos o ecuaciones, el proceso de infiltración de agua en el suelo (Aoki y Sereno, 2006). Dos son de uso más frecuente en Argentina, uno adaptado por Marelli et al. (1986) y otro desarrollado por Irurtia y Mon (1994).

Las medidas de campo, mediante los simuladores de lluvia, proporcionan información sobre la infiltración de un área concreta y se admite que tanto a escala de parcela como de cuenca, la permeabilidad y capacidad de infiltración presentan una gran variabilidad espacial y temporal (Byers y Stephens, 1983; Bosch y West, 1998). Esa variabilidad es particular de cada suelo y depende de diferencias texturales y composicionales, así como de los usos al que sea destinado (Vieira et al. 1983).

1.6 Hipótesis de trabajo

El desarrollo de los siguientes capítulos estará basado en las hipótesis de trabajo que a continuación se mencionan:

1- Diferentes sistemas de cultivo generan en el mediano plazo estados estructurales del suelo que condicionan la dinámica de ingreso del agua. La SD en Argiudoles genera estructura laminar superficial. El monocultivo de soja en SD degrada el estado estructural, genera estructura laminar de mayor espesor y continuidad, restringiendo el ingreso de agua al suelo, en comparación con rotación de cultivos.

2- La adición de enmienda orgánica denominada “cama de pollo” y la inorgánica, yeso, aplicadas en forma individual o conjunta, en Argiudoles bajo SD contribuyen a la regeneración de la estructura y a la mejora en el movimiento del agua edáfica por su efecto sobre la estabilidad de agregados, la distribución de poros y la reducción en el espesor de la estructura laminar.

1.7 Objetivo General:

La presente Tesis pretende contribuir con información novel a la temática de la regeneración de la estructura de suelos Argiudoles bajo SD mediante prácticas de manejo agrícola.

1.8 Objetivos específicos:

En el capítulo II se caracteriza el estado estructural y la infiltración de agua en diferentes sistemas de cultivo y manejo contrastantes y representativos en Argiudoles.

En el capítulo III se evalúa y cuantifica la regeneración estructural debido al aporte de “cama de pollo” como enmienda orgánica y/o por la aplicación de yeso como enmienda inorgánica en un Argiudol bajo SD.

CAPÍTULO II

Caracterización del estado estructural de un Argiudol en manejos agrícolas contrastantes de mediano-largo plazo y relación con la infiltración

2.1 Introducción

La naturaleza dinámica y la variabilidad espacial de la estructura del suelo son factores determinantes en la evaluación de su calidad (Lal y Shukla, 2004). La estructura de los horizontes laboreados en los campos de producción cambia en el tiempo debido a acciones antrópicas (laboreo, compactación por tránsito) y ambientales, humedecimiento y secado, actividad de las raíces y fauna edáfica. La combinación de los efectos de estos procesos altera el arreglo espacial, tamaño y tipo de terrones y agregados y, en consecuencia, el volumen de poros dentro y entre los agregados (Dexter, 1988). Es así que cuando se observa la estructura del suelo en un momento dado, se refleja el efecto neto de numerosos factores que interactúan y que pueden cambiar en cualquier momento.

Las prácticas de labranza, en el corto plazo, pueden crear nuevas condiciones de la estructura del suelo (Roger-Estrade et al. 2009). En este sentido las propiedades de ingreso, transferencia y almacenamiento de agua y mecánicas del suelo se ven afectadas. Sumado a lo anterior, los distintos sistemas de cultivos producen un amplio rango de condiciones estructurales del suelo (Boizard et al. 2002) que resultan en diferencias en las propiedades biológicas, químicas y físicas del suelo y que a su vez, dan lugar a cambios en la calidad funcional del mismo (Islám y Weil, 2000; Derpsch et al. 2010; Celik et al. 2011; Ding et al. 2011; Wolfarth et al. 2011). Estas propiedades se ven afectadas significativamente ante la reducción de la labranza del suelo (Thomas et al. 2007).

Si analizamos en un período de mediano a largo plazo, prácticas agrícolas como la SD favorecen las condiciones de la estructura del suelo, como la formación de agregados y la mayor concentración de materia orgánica del suelo (Abid y Lal, 2008). Los suelos bajo SD tienen mayor acumulación de biomasa vegetal en superficie, lo que resulta en suelo más húmedo con menor temperatura, con mayor actividad microbiana y

mejoras en algunas propiedades del mismo (Madejon et al. 2009; Ben Moussa-Machraoui et al. 2010; Benitio, 2010; Derpsch et al. 2010; Naudin et al. 2010; Celik et al. 2011; Álvaro-Fuentes et al. 2012). La SD aumenta en gran medida la acumulación de carbono orgánico dentro de microagregados que, a su vez, forman macroagregados. Además, tiende a reducir la Dap del suelo en la capa superior del mismo (Jina et al. 2011).

Munkholm et al. (2013) concluyeron que era necesaria una rotación de cultivos diversificada para un rendimiento óptimo del suelo estudiado bajo SD. En este sentido, Aziz et al. (2013) encontraron que bajo SD, la rotación de cultivos maíz-soja-trigo mejoró las propiedades asociadas a la calidad del suelo en el tiempo.

En los últimos tiempos se han reportado efectos negativos en cuanto a la estructura de suelos, que involucran por un lado al tránsito de la maquinaria pesada y, por otro lado, a la simplificación de las rotaciones de cultivos con predominio de monocultivo de soja. En estas condiciones se observan aumento de Dap y disminución del tamaño y la EA, el contenido de agua y la tasa de infiltración (Scholefield et al. 1985; Ferrais, 2004; Cazorla, 2005; Alvarez y Steinbach, 2009). Además, en suelos limosos bajo SD se ha observado un ordenamiento vertical de distintos tipos de estructuras con presencia de estructura de tipo P, en los primeros centímetros de suelo (VandenBygaart et al. 1999; Pagliai et al. 2003; Morras et al. 2004; Sasal et al. 2006; Álvarez et al. 2009; Sasal 2012; Lozano et al. 2013; Álvarez et al. 2014). Dicha estructura P, se caracteriza por la presencia de agregados alargados orientados de manera paralela a la superficie lo cual restringe el ingreso de agua al suelo. Sasal (2012), determinó también que existe una relación inversa entre la intensificación de las secuencias de cultivo y la proporción de P a largo plazo en suelos Argiudoles bajo SD.

En base a lo anteriormente expuesto, el conocimiento del efecto de la actividad radical y de la cobertura del suelo con residuos de cosecha bajo SD resultan clave para seleccionar estrategias productivas que permitan regenerar la estructura de suelos, en particular, de texturas limosas (Tisdall y Oades, 1982; Domzal et al. 1991; Novelli et al. 2011 y 2013). En este contexto, es necesario evaluar y comparar la magnitud en los cambios estructurales que producen por un lado prácticas de laboreo en un corto plazo, y por otro, las secuencias de cultivos contrastantes bajo SD en el mediano-largo plazo, y sus efectos sobre la dinámica del agua.

El objetivo del presente capítulo es caracterizar el estado estructural y la infiltración de agua en sistemas contrastantes de labranza y rotaciones representativos en un Argiudol de Entre Ríos.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Caracterización del sitio de estudio

Los ensayos a campo del presente y del próximo capítulo se realizaron en la EEA Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en un suelo Argiudol ácuico, serie Tezanos Pinto (imagen del perfil en la Figura 2 y descripción en la Tabla 1) (Plan Mapa de Suelos, 1998) perteneciente a la familia fina, mixta, térmica (Soil Survey Staff, 2010). Son suelos profundos, moderadamente bien drenados, con un epipedón oscuro, franco-arcillo-limoso a franco-limoso, y un horizonte argílico oscuro, franco-arcillo-limoso a arcillo-limoso, con moteados de hierro-manganeso. Están desarrollados en loess calcáreo, de textura franco-limosa, con concreciones de calcáreo y calcáreo libre hasta 5 %.

La serie Tezanos Pinto se encuentra en una peniplanicie alta, suavemente ondulada a ondulada, del extremo oeste de la provincia (entre Paraná y Diamante), con pendientes entre 1-3 % y hasta 8 % para las fases erosionadas y con pendiente. En cuanto al drenaje, se lo considera moderadamente bien drenado; escurrimiento superficial moderado. Permeabilidad lenta a muy lenta. Capa freática muy profunda (Plan Mapa de Suelos, 1998).

El perfil del suelo presenta un horizonte Ap entre 0-17 cm (pudiendo llegar hasta los 22 cm si se considera la totalidad del horizonte A); gris muy oscuro en húmedo; gris en seco; franco-arcillo-limoso; estructura granular y en bloques subangulares, medios, moderados; ligeramente duro en seco y friable en húmedo; barnices ("humicskins"); límite claro, suave. Por debajo del horizonte A se encuentra un horizonte textural B21t: (21-33 cm); pardo a pardo oscuro en húmedo; pardo en seco; arcillo-limoso; estructura en prismas compuestos irregulares, medios, débiles, que rompen en bloques angulares irregulares medios y finos, moderados; muy duro en seco y friable en húmedo; barnices ("clay-humicskins") abundantes y medios; moteados de hierro comunes, finos y precisos; presencia de materiales superiores en las grietas; límite gradual, suave.

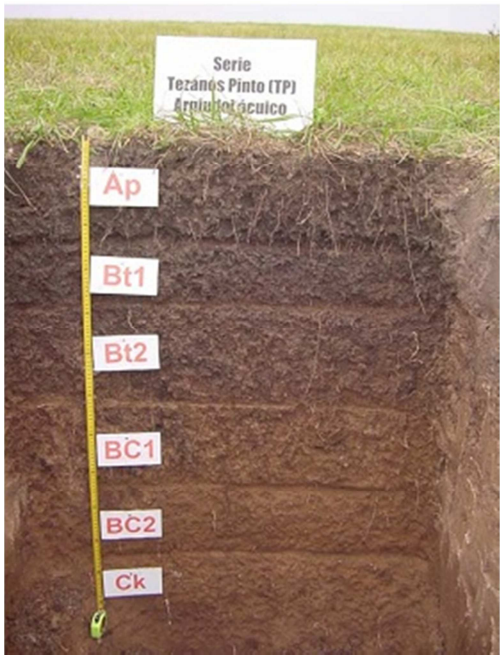

Figura 2: imagen del perfil de suelo serie Tezanos Pinto. Extraído de Tasi (2009)

Tabla 1: Características del suelo del sitio experimental (Plan Mapa de Suelos, 1998). Clasificación USDA (SoilSurvey Staff, 2010).

Características	Molisol	
Subgrupo	Argiudol ácuico	
Horizonte	Ap	B_{21t}
Profundidad (cm)	3-15	21-33
% Arena	4,5	3,9
% Limo	67,9	54,6
% Arcilla	27,6	41,5
Clase textural	Franco arcillo limoso	Arcillo limoso

2.2.2 Condiciones climáticas de la zona de estudio

Los datos del Observatorio Agrometeorológico de la EEA Paraná para la serie de datos correspondiente al período 1967 – 2014 indican que el régimen térmico es templado, la media diaria anual es de 18,3°C y varía entre 24.9°C en enero y 12°C en

julio, con una amplitud térmica de 13°C (Figura 3). En general, las temperaturas invernales son superiores a 0 ºC y los veranos son muy cálidos.

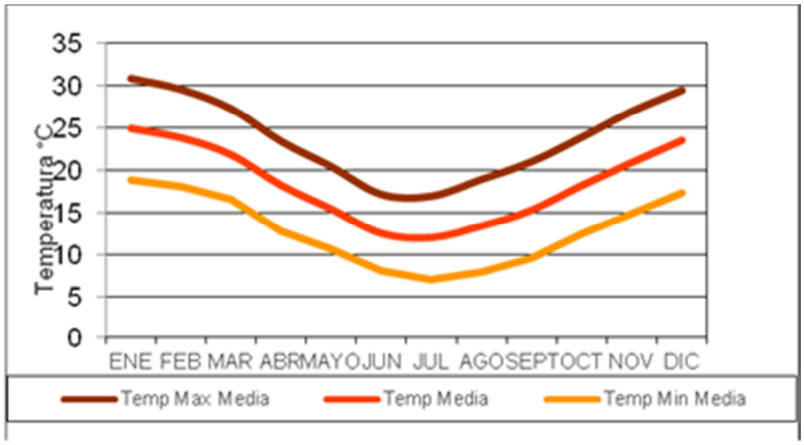

Figura 3: Temperaturas media, media máxima y media mínima mensuales de la EEA Paraná INTA.

La humedad relativa es una variable importante dado que regula parcialmente la desecación de los suelos. Durante todo el año los registros son elevados (Figura 4), siendo el período entre abril y julio el más húmedo del año, con un promedio de 76%.

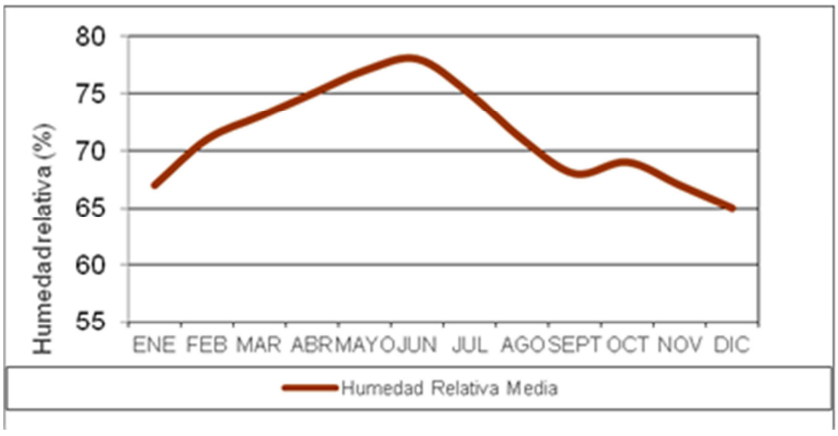

Figura 4: Variación mensual de la humedad relativa media de la EEA Paraná INTA.

La región tiene clima subhúmedo (precipitación anual ≈1000 mm), pero es conocida la variabilidad interanual de las precipitaciones (Figura 5).

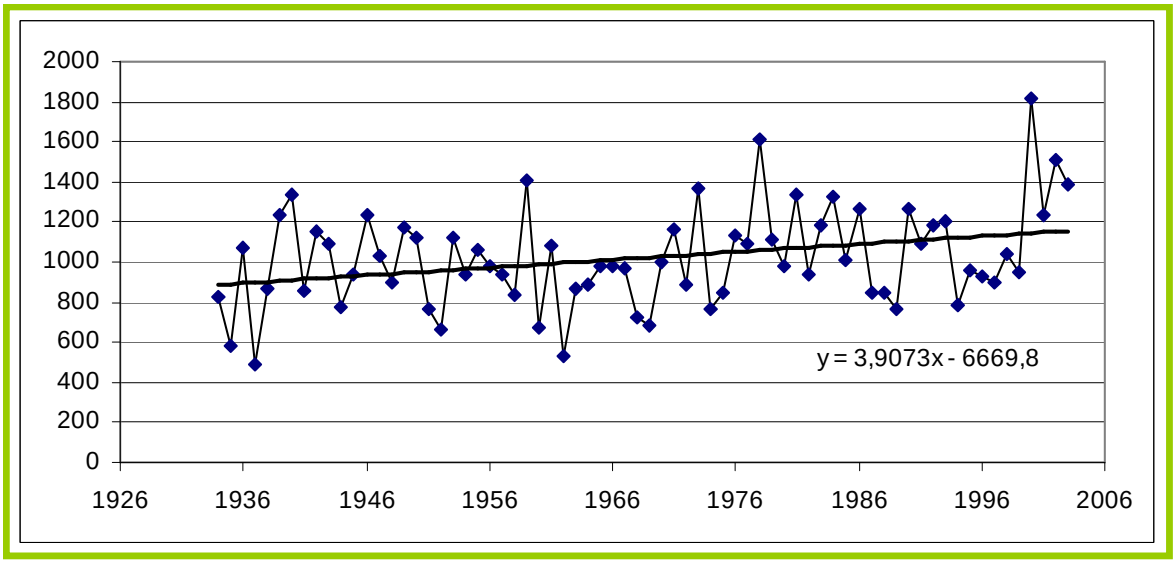

Figura 5: Precipitación anual desde 1935 hasta 2005 de la EEA Paraná INTA.

El 75% de las lluvias anuales ocurren en primavera y verano (Figura 6). En este sentido, la probabilidad de esperar valores altos de lluvia disminuye entre mayo y setiembre.

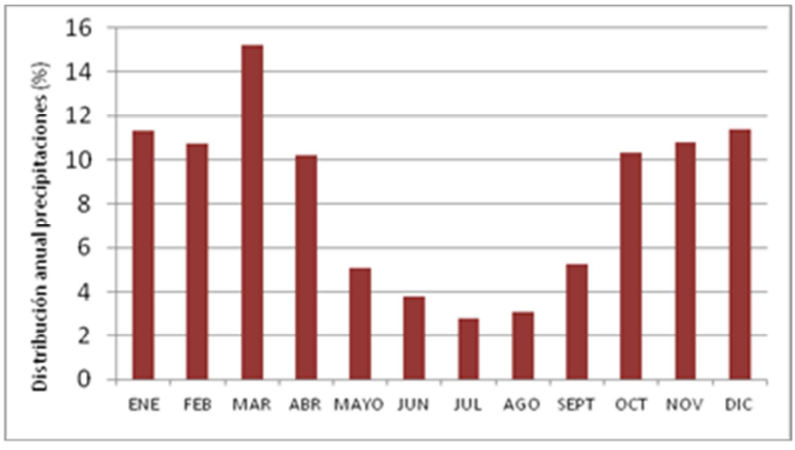

Figura 6: Distribución porcentual de las precipitaciones anuales de la EEA Paraná INTA.

2.2.3 Ensayo de labranzas de larga duración

El ensayo de labranzas (Barbagelata, 2000) fue instalado en el año 1997 (Figura 7). Las parcelas tienen una dimensión de 7 x 30 m. Se seleccionaron para muestreo una parcela de los tratamientos: Siembra Directa (SD) y Labranza Vertical (LV), ambas con rotación trigo/soja-maíz continua (Tr/Sj-Mz). El lote donde se encuentra este ensayo tiene una historia de manejo, previa a la instalación de dicho ensayo, que consistió en la producción de cultivos de granos bajo labranza convencional con arado de reja y vertedera.

El tratamiento LV consistió en dos o tres operaciones anuales con rastra de disco y cultivador de campo a una profundidad de 15 cm aproximadamente. La SD consistió en sembrar directamente en el residuo del cultivo anterior con un mínimo de alteración del suelo. Cabe aclarar que el cultivo de soja, después del trigo, se siembra sin laboreo en ambos tratamientos, LV y SD. Al momento del muestreo, el ensayo se encontraba en barbecho previo a la siembra de maíz (cobertura de rastrojo de Tr/Sj).

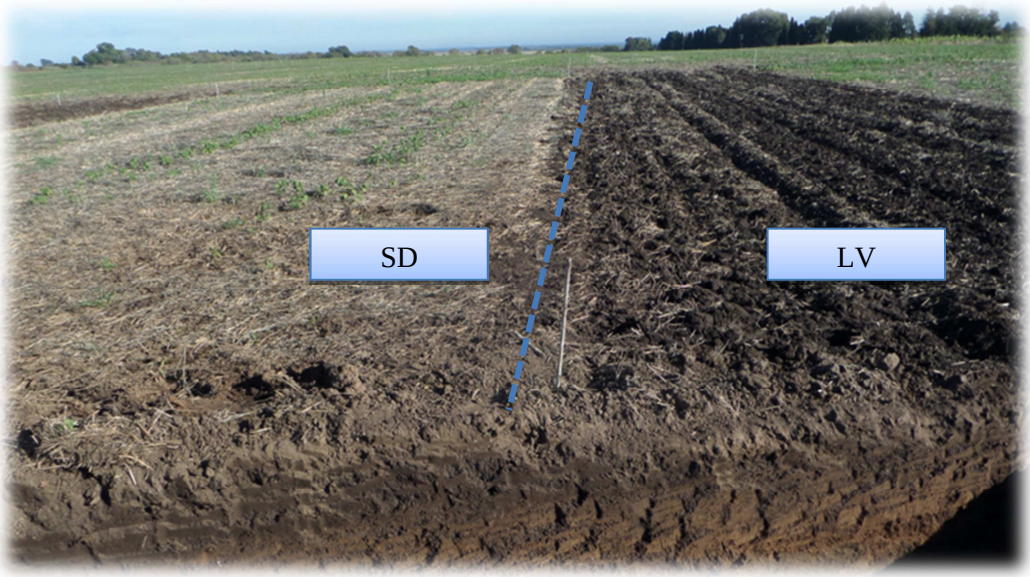

Figura 7: Parcelas ensayo de larga duración de labranzas. INTA EEA Paraná.

2.2.4 Ensayo de rotaciones de cultivos bajo SD

El segundo ensayo consiste en diferentes secuencias de cultivos bajo SD. Se inició en el año 2008 (Novelli et al. 2010) (Figura 8). Se muestreó una parcela en 2 tratamientos: monocultivo de soja (Sj - Sj) y trigo/soja–maíz (Tr/Sj-Mz). El sitio experimental posee una pendiente natural del 3,5% y estuvo bajo SD por al menos 15 años con maíz como principal cultivo antes del inicio del experimento. Las parcelas tenían 5 m de ancho y 30 m de largo. Se hicieron controles de malezas e insectos cuando fue necesario, de acuerdo con las mejores prácticas de manejo con herbicidas e insecticidas específicos comúnmente utilizados en la agricultura comercial. Al momento de muestreo, la parcela Tr/Sj-Mz se encontraba en barbecho previo a la siembra de Mz (rastrojo de Tr/Sj).

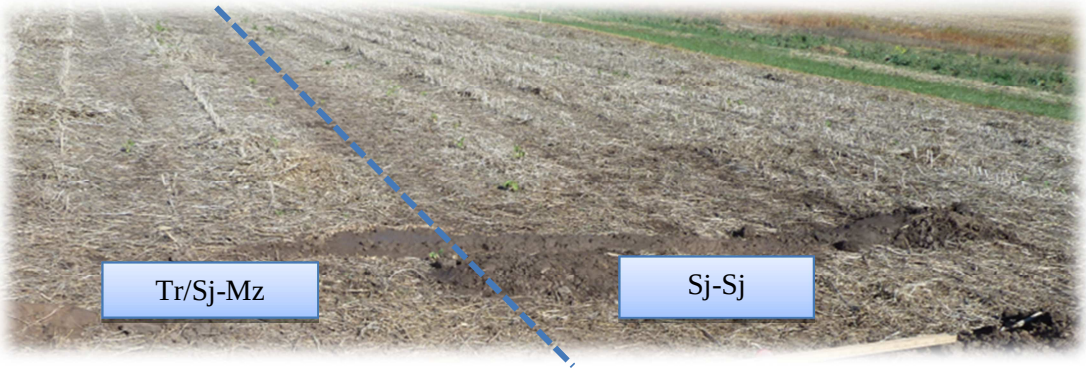

Figura 8: Parcelas ensayo de rotaciones de cultivos. INTA EEA Paraná.

2.2.5 Mediciones a campo

2.2.5.1 Perfil Cultural

Para la evaluación del estado estructural a campo se empleó el método del Perfil Cultural con análisis de imágenes (Manichon, 1987) adaptado a situaciones de no laboreo (Boizard et al. 2017). En cada parcela se confeccionó una trinchera de 2 metros de

frente y un metro de profundidad y se realizó una descripción detallada de las características de la estructura edáfica del horizonte A. En ambos ensayos la determinación se la realizó en un solo momento del año (invierno 2015) correspondiente al período de barbecho antes de la implantación de los cultivos estivales.

Por medio de esta técnica, se determinaron las distintas estructuras presentes en el perfil de suelo en una trinchera de 2 m de ancho por 0,5 m de profundidad, excavada en forma perpendicular a la dirección de siembra (Figura 9).

Figura 9: Imagen de una trinchera donde se describirán y delimitarán los distintos tipos de estructuras.

En la Figura 10 se describen los tipos de estructuras identificadas:

Gamma (Γ): estructura granular resultante de la aglomeración de pequeñas partículas por efecto del clima, actividad biológica y la materia orgánica. Presenta alta porosidad visible y superficie rugosa (Boizard et al. 2017).	***Platy (P):*** estructura con agregados delgados y poros orientados principalmente en forma horizontal (Sasal et al. 2006; Boizard et al. 2013).
Phi (Φ): estructura masiva con porosidad estructural visible entre agregados constitutivos y terrones, resultante de procesos de fragmentación de estructuras compactadas con fisuras orientadas en todas las direcciones (Manichon 1987).	***Delta (Δ):*** zonas compactas con estructura masiva delimitada en base a la ausencia de porosidad visible, con elevada cohesión y con caras de ruptura lisa (Manichon 1987; Guerif 1994).

Figura 10: Descripción de los tipos de estructuras identificadas en los perfiles culturales.

Con la ayuda de hilos y señaladores plásticos de colores se delimitaron las estructuras encontradas y posteriormente se tomaron fotografías a una distancia de 0,6m y cada 0,35m en dirección lateral (se sacaron entre 3 a 4 fotografías por perfil). Las fotografías se ensamblaron mediante el uso del software PanaVue Image Assembler versión

3.6.0.34025 (Copyright © 1996. PanaVue) para obtener la imagen del perfil completo (Figura 11).

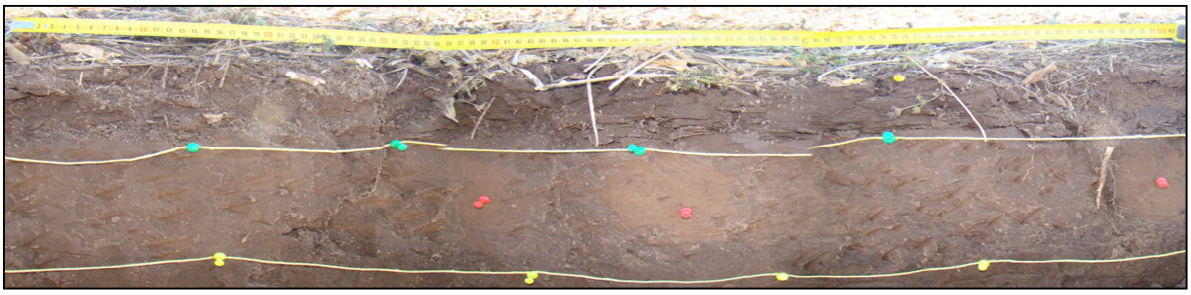

Figura 11: Foto ensamblada de un Perfil Cultural, la imagen corresponde a un lote de producción bajo SD de la EEA Paraná y en ella se pueden observar las delimitaciones realizadas a campo de los tipos de estructuras encontrados.

Una vez que se obtuvo la imagen completa del perfil, se procedió a delimitar y medir el área ocupada por los diferentes tipos de estructura (Figura 12) utilizando el software ImageJ 1.36b (https://imagej.nih.gov/ij/). La proporción de los tipos de estructuras se calculó relacionando el área medida y el área total del horizonte A.

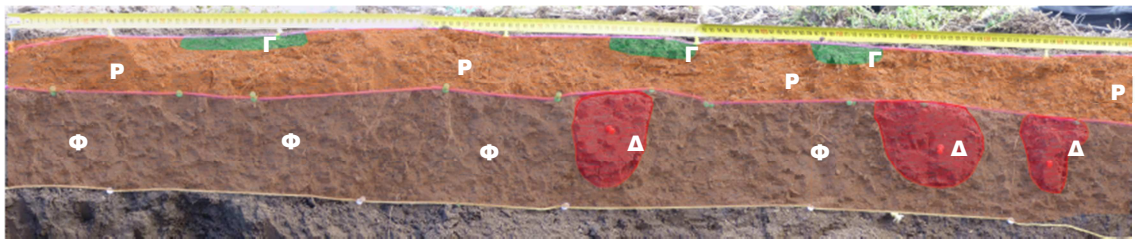

Figura 12: Imagen de un Perfil Cultural de un lote de producción bajo SD de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados. Verde Γ, Naranja P, marrón Φ y rojo Δ.

Además de las proporciones de las distintas estructuras con respecto al total del perfil, se cuantificó el espesor y la continuidad de la estructura P, el cual fue medido utilizando el software ImageJ. Para estimar el espesor (Figura 13 a), se dividió el perfil en tres lugares (medio y respectivos cuartos) y se calculó el espesor mediante una he-

rramienta de medición del software (previo escalado de la imagen tomando como referencia la cinta métrica presente en cada perfil). Para estimar la continuidad (Figura 13 b), se determinó mediante una relación entre el ancho del perfil ocupado por estructura laminar y el ancho total del perfil.

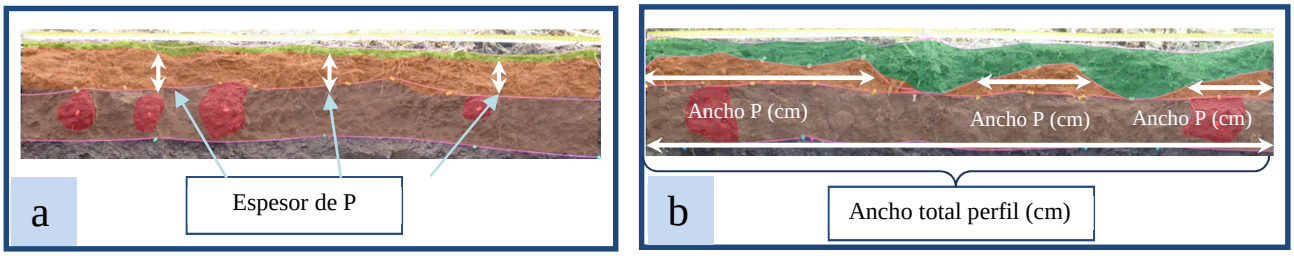

Figura 13: Imágenes de perfiles culturales de lotes de producción bajo SD EEA Paraná. La Fig. a) esquematiza el criterio para evaluar el espesor de P; la b) esquematiza el procedimiento para cuantificar la continuidad de P.

En cada perfil, se extrajeron tres muestras no disturbadas (en cilindros) y una disturbadas de cada tipo de estructura para las siguientes determinaciones en laboratorio, con el fin de complementar y corroborar las descripciones del PC:

- Densidad aparente (Dap), mediante la técnica del cilindro (Burke et al. 1986). Para ello se tomaron muestras (3 repeticiones por cada tipo de estructura del perfil) en cilindros de 70 cm^3 de volumen. Se pesaron con la humedad de campo y se colocaron en estufa a 105°C durante 48 h para obtener el peso seco. Para luego calcular la Dap según la siguiente fórmula:

$$Dap\ (g\ cm^{-3}) = [\ Peso\ seco\ suelo\ (g) / Volumen\ cilindro\ (cm^3)]\ *\ 100$$

- Porosidad Estructural (PE), mediante la técnica de densidad aparente textural en querosene la cual se basa en el principio de Arquímedes para calcular el volumen, en este caso de suelo, midiendo la presión hidrostática de un líquido (querosene) (Monnier et al. 1973; Stengel 1988). Se tomó una muestra disturbada para la determinación de densidad aparente textural en g cm^{-3}

(DAt) a la humedad de muestreo en la zona adyacente a los cilindros para la determinación de Dap. Se desagregaron los terrones húmedos con la mano y se tamizó la muestra para obtener agregados entre 2 y 3 mm, evitando la formación de pseudo-agregados por amasado o adhesión de partículas más finas que 2 mm. Los mismos se cubrieron con querosene durante 24 h. Luego, se secó rápidamente la superficie de los agregados sobre un papel tisú hasta que no se observó brillo sobre ellos, evitando que los poros texturales pudiesen vaciarse e incluirse en el volumen de medida. Inmediatamente, se midió la presión hidrostática en una balanza con la precisión de mg, usando un vaso de precipitado con querosene. Para ello, se colocaron los agregados en una canasta dispuestos en una sola capa y ésta fue sumergida, suspendiéndola en el vaso de precipitado (*P1*) dentro del querosene. Seguidamente, se recuperaron los agregados en cajas de Petri para determinar su masa después de secarlos a 105°C por 24 hs (*ms*). Finalmente, se introdujo en el querosene la canasta vacía (*P2*) para calcular el volumen de los agregados:

$$Volumen\ agregados = (P1 - P2) / \delta\ querosene$$

donde *P2* es la masa del recipiente + masa del querosene + presión hidrostática de la canasta vacía y *P1* es *P2* + presión hidrostática sobre los agregados.

El cálculo de la Densidad aparente textural (DAt) se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$DAt = ms / Volumen\ agregados$$

Finalmente, la PE intra agregados se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$PE = (1 – (Dap/DAt)) * 100$$

2.2.5.2 Escurrimiento

Se efectuaron 3 simulaciones de lluvia en cada situación seleccionada (parcela) de ambos ensayos, con una intensidad de 60 mm h^{-1} hasta alcanzar escurrimiento base, mediante el empleo de un simulador de 25 x 25 centímetros (Figura 14) de base con una altura de 1,5 m (Irurtia y Mon, 1994).

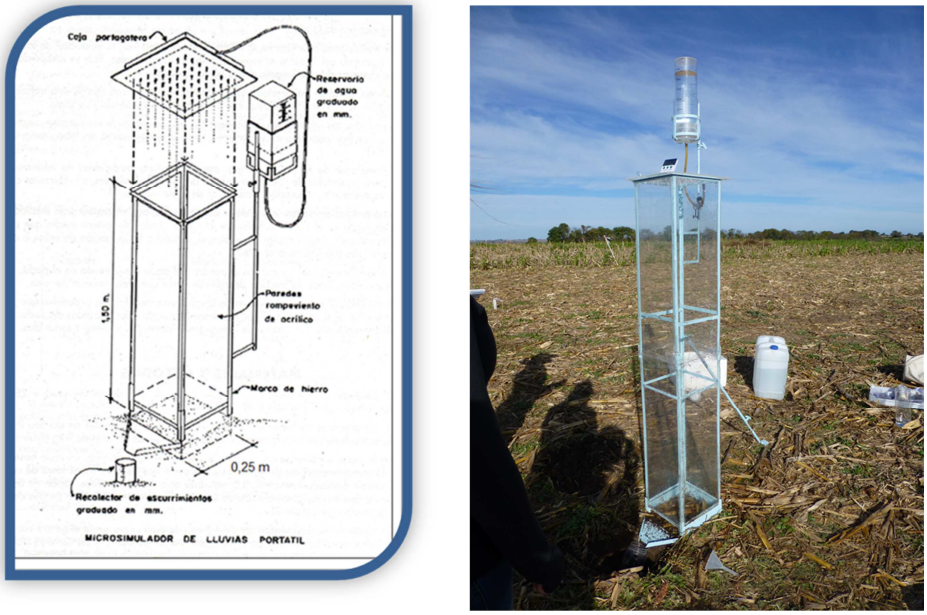

Figura 14: Esquema (Irurtia y Mon 1994) y foto del simulador de lluvia empleado para las mediciones a campo de escurrimiento.

Para el caso del ensayo de labranzas, las simulaciones se llevaron a cabo en dos momentos (en ambos momentos se efectuaron 3 simulaciones por parcela): al momento de barbecho (con el suelo recientemente laboreado para el caso de LV) y post cosecha del cultivo. En el ensayo de rotaciones se realizaron en un solo momento (barbecho).

La variable utilizada para la comparación entre las situaciones de manejo y rotación fue el Escurrimiento base (EB) y el análisis estadístico de los datos se realizó me-

diante la comparación de medias con la prueba T entre sistemas de labranza, momentos de simulación dentro de los sistemas de labranza y entre rotaciones bajo SD mediante el software estadístico Infostat 2017 (Di Rienzo et al. 2017).

2.3 Resultados y Discusión

2.3.1 Efecto de sistemas de labranza sobre el estado estructural

Las evaluaciones comparativas visuales entre los distintos sistemas de labranza (LV y SD) indicaron evidentes diferencias en cuanto a los tipos de estructuras predominantes, su distribución e incluso presencia o ausencia de alguna de ellas. Cabe aclarar que dichas mediciones se realizaron, como se mencionó anteriormente, durante el invierno, luego de haberse laboreado la parcela LV. Para LV (Figura 15), se observó una predominancia de estructura tipo Γ a nivel superficial, que ocupa cerca del 40% del perfil (Tabla 2). Esta estructura Γ se encuentra en una capa continua de entre 6 – 12 cm de espesor de aspecto irregular y rugosa por efecto de las herramientas de laboreo. Además, en dicha capa “arable” hay una predominancia de suelo fino en mezcla con terrones de tamaño medio producto del cultivador de campo.

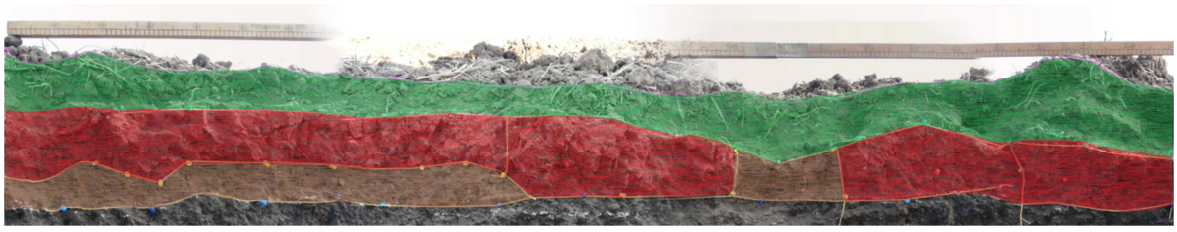

Figura 15: Imagen del Perfil Cultural de la parcela LV del ensayo de labranzas de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados. Verde Γ, marrón Φ y rojo Δ.

Tabla 2: Valores de la proporción de ocupación (%) en los perfiles culturales de las distintas estructuras encontradas en las parcelas de labranza vertical (LV) y siembra directa (SD) del ensayo de labranza.

	Sistema de labranza	
	LV	SD
Estructura	(%)	
Γ	38,8	8,6
P	0,0	19,9
Φ	16,3	53,9
Δ	44,9	17,5

A continuación, por debajo de la zona Γ, y coincidiendo con la profundidad de acción de los implementos de laboreo, se visualizó un desarrollo importante de una estructura tipo Δ discontinua (piso), de entre 8 a 10 cm de espesor, que alcanzó un 45% de ocupación en el perfil (Tabla 2). Esta zona se caracteriza por presentar grietas verticales que delimitan terrones grandes (>10 cm) tipo Δ con escasa presencia de raíces por dentro de los terrones.

Finalmente, también se pudo registrar la presencia de una estructura Φ, de menor proporción en el perfil, que se encontraba por debajo y también interrumpiendo la continuidad de la zona Δ. Esta zona Φ se caracterizaba por la presencia de abundantes fisuras en todas direcciones que originaban terrones de tamaño medio entre 2 a 3 cm.

Al analizar el perfil bajo SD (Figura 16) se observó por un lado una estratificación vertical de estructuras y por otro lado, la presencia de un tipo de estructura que no estaba presente en LV. Esta estructura es de tipo P y se encontró de manera continua en todo el perfil en una capa de entre 5 a 10 cm de espesor, donde los agregados se disponen de manera horizontal con presencia de raíces entre las láminas. Por encima de P se encontró una zona Γ, entre 2 a 3 cm de espesor, discontinua y que ocupaba menos del

10% de la proporción del perfil (Tabla 2), conformada por agregados de tamaño pequeño y con alta porosidad visible.

Por debajo de P se observaron zonas compactas Δ localizadas (entre 8 – 10 cm) que ocupaban menos del 20% del perfil, pero con algunos poros producto de la actividad de fauna y raíces. Rodeando a dichas zonas Δ y por debajo de P se encontró un una capa de estructura continua, con porosidad visible y fisuras en todas las direcciones, tipo Φ, que ocupaban la mayor proporción del perfil (alrededor del 50%).

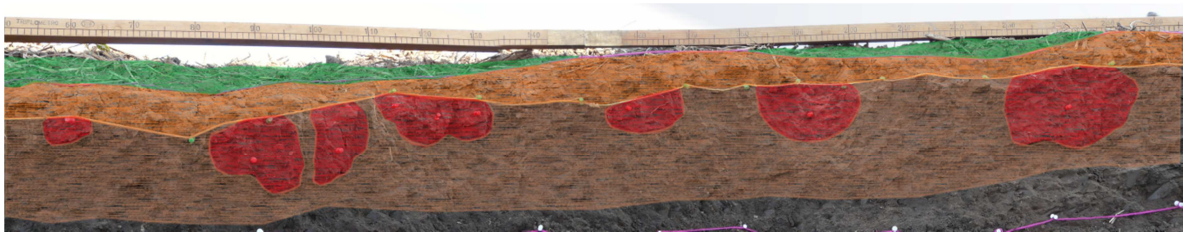

Figura 16: Imagen del Perfil Cultural de la parcela SD del ensayo de labranzas de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados. Verde Γ, naranja P, marrón Φ y rojo Δ.

La ausencia de P en la parcela LV, podría indicar el efecto de ruptura sobre P que ejercen las labranzas en fomento de Γ. Pagliai et al. (2004) reportaron que la preparación del suelo antes de la siembra puede descompactar el suelo, dando como resultado una mejor calidad inicial, pero con el tiempo y el uso intensivo de las máquinas, el deterioro de la estructura del suelo se intensifica. En este sentido, otro aspecto contrastante es la proporción de estructura Δ. En la parcela LV la mayor parte del perfil está ocupada por dicha estructura a nivel subsuperficial. En este tipo de manejo con laboreo de suelo nos encontramos con la situación de que por un lado se genera un tipo de estructura Γ a nivel superficial sin presencia de P (con lo cual se puede inferir de que se generan condiciones más propicias para el ingreso de agua al perfil), pero por otro lado, en las capas más profundas del suelo, estructuras compactas abarcan más del 40% del

perfil y dificultan el crecimiento radical y el pasaje de agua. En SD, la presencia de Δ estaba circunscripta a zonas localizadas puntuales cuya proporción no superó el 20%.

En la Tabla 3 pueden observarse los valores de Dap y PE medidos para distintas estructuras descriptas en los perfiles culturales. A modo general, se puede observar que la Dap varió entre 1,2 a 1,5 Mg m^{-3} y la PE entre 7 y 20 % dicha variación estuvo relacionada a los tipos de estructura. De Battista et al. (1994) y Sasal (2012) encontraron similares valores de Dap para las estructuras descriptas. En el caso de PE, como dicha propiedad correlaciona muy bien con la macroporosidad del suelo (Sasal y Andriulo 2003), en Φ y Δ se podría presentar un problema para el crecimiento de raíces, debido a que los valores de PE se encuentran por debajo o muy cercanos al umbral de 10% (Wesseling y Wijk 1957 en Gregorich y Carter 1997).

Tabla 3: Valores de Dap (Mg m^{-3}) y de PE (%) de las distintas estructuras encontradas en las parcelas de labranza vertical (LV) y siembra directa (SD) del ensayo de labranza.

	Dap		PE	
Estructura	LV	SD	LV	SD
Γ	1,20		20,6	
P		1,20		18,8
Φ	1,44	1,50	6,9	11,0
Δ	1,52		8,2	

2.3.2 Efecto de las rotaciones de cultivo bajo SD sobre el estado estructural

De similar manera a lo ocurrido en la comparación entre sistemas de labranzas, el estudio descriptivo visual de la condición estructural entre rotaciones de cultivos bajo SD, permitió observar estados estructurales diferentes, atribuidos a rotaciones contras-

tantes. Donde se destaca principalmente la estratificación horizontal de las estructuras con presencia de estructura P en ambas rotaciones.

El PC de la parcela Sj-Sj (Figura 17) se caracterizó principalmente por el desarrollo de una estructura P continua en todo el perfil desde superficie hasta los 10 -12 cm de profundidad, ocupando un 40% de la proporción del perfil. En dicha estructura P no se notó la presencia de poros verticales o galerías producto de la fauna del suelo. Por debajo de la estructura P se observaron zonas localizadas Δ, sin porosidad visible, las cuales ocupaban la menor parte del perfil (10% aproximadamente). El resto del perfil se caracterizó por una estructura continua de tipo Φ, agrietada y con presencia de poros de origen biológico.

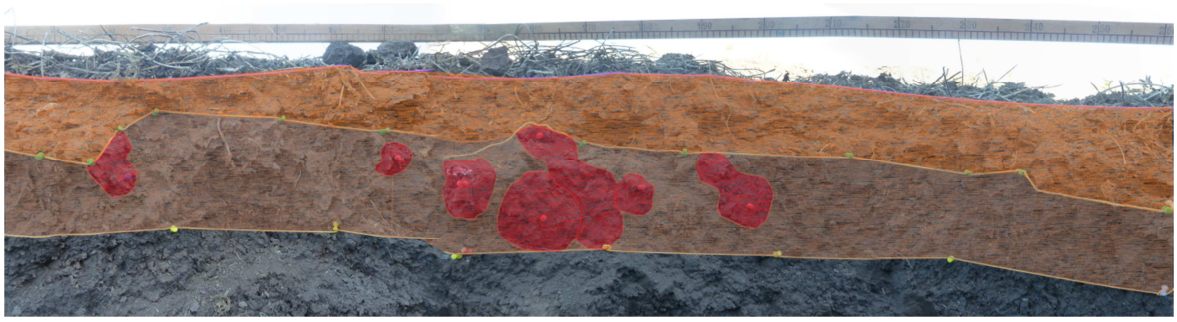

Figura 17: Imagen del Perfil Cultural de la parcela Sj – Sj bajo SD del ensayo de rotaciones de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados. Naranja P, marrón Φ y rojo Δ.

En la parcela Mz – Tr/Sj (Figura 18) se observó a nivel superficial el desarrollo de una estructura Γ de 3 – 4 cm de espesor, la cual se encontraba continua en perfil. Por debajo de la misma, una estructura P de 4 a 12 cm de espesor, continua en el perfil, interrumpida por una zona Δ. Se destaca la presencia de poros verticales por la actividad de la fauna edáfica. El resto del perfil se encontró dominado por una estructura Φ (43%) (Tabla 4) continua y agrietada donde se observan zonas localizadas de estructura Δ posiblemente por efecto de tránsito en condiciones de elevada humedad.

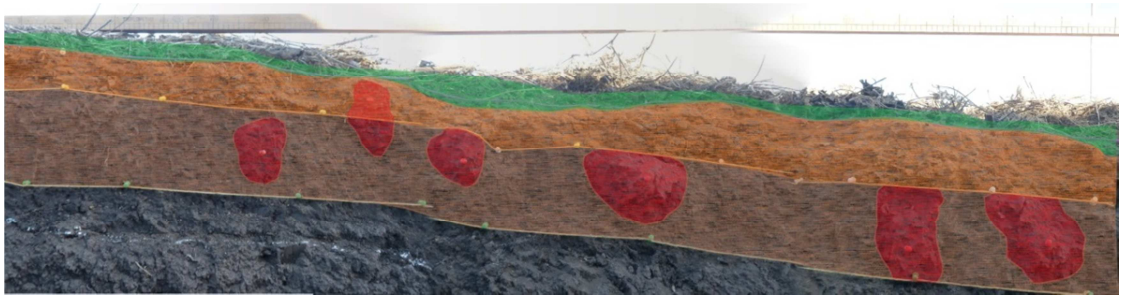

Figura 18: Imagen del Perfil Cultural de la parcela Mz – Tr/Sj bajo SD del ensayo de rotaciones de la EEA Paraná en la que se observan las delimitaciones de los tipos de estructuras encontrados. Verde Γ, Naranja P, marrón Φ y rojo Δ.

Al igual que en el ensayo de labranzas, en las parcelas bajo SD, los % de Γ no superaron el 10%, siendo nula la presencia de esta estructura en el caso Sj-Sj. La proporción de P varió entre 30 a 40% y su espesor de 6 cm a 11 cm promedio, siendo el caso de Sj-Sj bajo SD la parcela con mayor espesor y % de P encontrado. En este sentido, Sasal (2012), señala que tanto el espesor como la proporción de P están asociados con la secuencia de cultivos y que distintas secuencias bajo las mismas condiciones climáticas de una misma región, en función de la capacidad de exploración en el perfil de las raíces y el volumen de residuos de cosecha, entre otros factores, pueden condicionar el desarrollo de P.

En todos los perfiles evaluados bajo SD, la presencia de Δ estaba circunscripta a zonas localizadas puntuales cuya proporción no superó el 20%. De Battista et al. (1994), Gerster y Bacigaluppo (2004), encontraron % similares de ocupación de Δ en perfiles culturales de suelos limosos bajo SD. En el caso de Φ, se destaca su alta proporción bajo SD, llegando a abarcar entre el 40 y 50% del perfil. Este tipo de estructura indica buena actividad biológica y buena exploración de raíces, a pesar de su alta Dap.

Tabla 4: valores de la proporción (%) de ocupación en los perfiles culturales de las distintas estructuras.

	Rotación	
	Sj-Sj	Mz – Tr/Sj
Estructura	(%)	
Γ	0,0	10,6
P	40,5	31,2
Φ	48,8	43,4
Δ	10,7	14,9

En la Tabla 5 pueden observarse los valores de Dap y PE medidos para distintas estructuras descriptas en los Perfiles Culturales. A modo general, se puede observar que la Dap varió desde valores de 1,25 a 1,48 Mg m^{-3}, y dicha variación estuvo relacionada a los tipos de estructura.

En las parcelas Tr/Sj – Mz bajo SD, de ambos ensayos, la estructura P tuvo similar Dap que Γ, sin embargo la estructura P del monocultivo fue más elevada y similar a Φ. Dichos valores de Dap podrían indicar que para el caso del monocultivo, la condición estructural se encuentra en un estado donde el desarrollo de P se ve favorecido por la condición más densificada del suelo y particularmente de Φ (Sasal et al. 2017b). En el caso de la rotación, la menor Dap de P puede ser producto de un proceso de reestructuración con formación de Γ en detrimento de P.

Tabla 5: Valores de Dap (Mg m^{-3}) y de PE (%) de las distintas estructuras encontradas en las parcelas Sj – Sj y Mz – Tr/Sj bajo SD del ensayo de rotaciones.

	Dap		PE	
Estructura	Sj-Sj	Mz – Tr/Sj	Sj-Sj	Mz – Tr/Sj
Γ				
P	1,42	1,25	6,9	7,8
Φ	1,48	1,42	8,4	4,4
Δ	1,46	1,45	9,3	2,4

2.3.3 Caracterización estructural mediante el ingreso del agua al suelo

El empleo de simuladores de lluvia permite evaluar de manera indirecta el estado estructural del suelo, debido a que los valores de infiltración y/o escurrimiento que se obtengan son indicativos de posibles limitantes estructurales que dificultan o impiden el pasaje de agua a través del perfil. En este sentido, la variable EB (mm h^{-1}) es un parámetro que refleja el estado final de equilibrio en el proceso de ingreso de agua al perfil (Moore y Singer, 1990; Chagas et al. 1997).

En el estudio de comparación entre sistemas de labranzas, el EB permitió diferenciar significativamente ($p<0.05$) las situaciones evaluadas. En la Figura 19 se observa que los mayores valores de escurrimiento se produjeron en SD (52,5 mm h^{-1}) en comparación a LV (34,6 mm h^{-1}). Si tomamos en cuenta que la lluvia simulada fue de 60 mm h^{-1}, los coeficientes de escurrimiento para cada situación evaluada fueron de 0,87 y 0,57 para SD y LV, respectivamente. Estos resultados se podrían explicar basándonos en la información antes descripta de los Perfiles Culturales, donde la parcela SD presentaba una estructura P continua, que restringe el ingreso de agua; para el caso de LV, si bien presentaba a nivel subsuperficial un capa densificada agrietada, la estructura Γ superficial por acción del laboreo mejoró el ingreso de agua al suelo en comparación con

SD. En lo referente a los momentos de simulación, se observa que para SD no hay diferencias significativas, siendo 52,4 y 52,7 mm h^{-1} para barbecho y post cosecha, respectivamente. En LV tampoco hubo diferencia estadística aunque se observó una tendencia al aumento del escurrimiento debido al efecto de consolidación y sellado del suelo algunos meses después del laboreo (29,2 y 40 mm h^{-1} para barbecho y post cosecha, respectivamente).

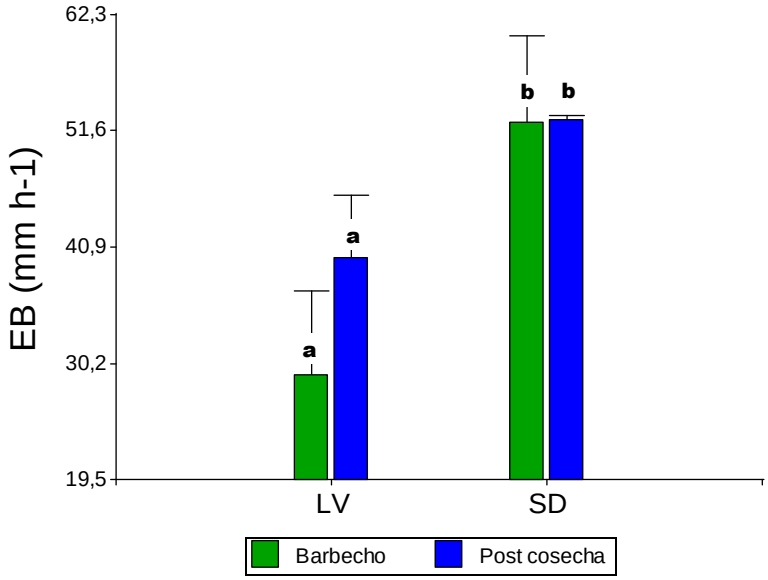

Figura 19: EB (mm h^{-1}) para labranza vertical (LV) y siembra directa (SD) en dos momentos de simulación: barbecho (columna verde) y post cosecha (columna azul). Letras distintas indican diferencias significativas entre momentos para el mismo sistema de labranza LSD Fisher ($p<0,05$).

En el caso de la comparación entre secuencias de cultivos bajo SD (Figura 20), se observa que el EB de la secuencia Mz – Tr/Sj fue significativamente menor con respecto al monocultivo Sj –Sj. Mientras que el monocultivo presentó un valor de 20 mm

h^{-1}, la rotación fue 25 veces inferior (0,8 mm h^{-1}). Si nos remitimos a lo descripto en el PC, podemos ver que el tratamiento Sj – Sj presentaba desarrollo de estructura P continua desde la superficie abarcando el 40 % del perfil. Sin embargo, la parcela Mz – Tr/Sj también presentaba una estructura P continua a nivel subsuperficial y superficialmente presentaba Γ, con lo cual podríamos inferir que en ambos casos, existía una posible limitante al ingreso de agua. La diferencia encontrada se podría atribuir a que para el caso de P en Sj – Sj, no se observó actividad de fauna edáfica, mientras que el otro caso sí se pudo observar dicha actividad dada por la presencia de canales verticales a través de la estructura P. Estos canales podrían ejercer un efecto de flujos preferenciales mediante los cuales el agua podría ingresar con mayor facilidad a las capas profundas del perfil. En este sentido, Boizard et al. (2017), destacan la importancia de la actividad biológica del suelo en lo referente a su influencia sobre la estructura de suelos bajo SD.

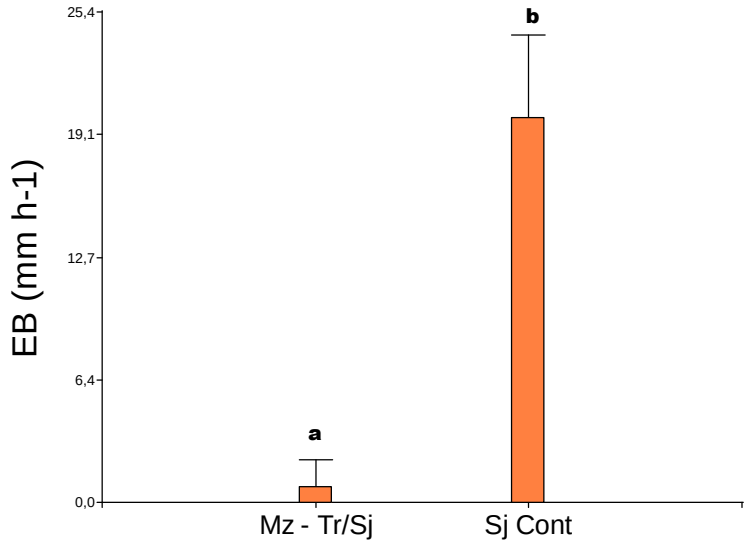

Figura 20: EB (mm h^{-1}) para rotación maíz – trigo/soja (Mz-Tr/Sj) y para monocultivo de soja (Sj-Sj) bajo SD. Letras distintas indican diferencias significativas LSD Fisher ($p<0,05$).

2.4 Conclusión

A través de la metodología del PC se pudieron visualizar y cuantificar los distintos estados estructurales afectados por situaciones de manejo contrastantes en un Argiudol representativo del área agrícola centro oeste de Entre Ríos. Por medio de la medición de parámetros físicos como la Dap y la PE se corroboraron los distintos tipos de estructuras presentes y se analizó como es la variación de la proporción de estructuras en el perfil del suelo, identificando zonas compactadas o zonas, que por la disposición de los agregados, limitan el ingreso de agua al perfil en diferentes sistemas de manejo agrícola.

Así, las situaciones de mediano-largo plazo muestreados, de 17 y 10 años de duración, evidenciaron estados estructurales bien contrastantes. En consecuencia, tanto los sistemas de laboreo como las secuencia de cultivos evaluadas, representativos de la región, mostraron patrones estructurales en el horizonte superficial del Argiudol ácuico que constituyen limitaciones al ingreso de agua al suelo. En este contexto, la metodología de la simulación de lluvias fue efectiva para poner en evidencia diferencias en la dinámica hídrica del horizonte superficial de suelo atribuibles estados estructurales bien diferenciados.

CAPÍTULO III

Evaluación de la aplicación de enmiendas orgánicas o inorgánicas como prácticas de corto plazo para la regeneración de la estructura

3.1 Introducción

Como se pudo observar en el capítulo anterior, las prácticas de manejo del suelo pueden modificar el estado estructural edáfico. En ocasiones estos efectos pueden evidenciarse a corto plazo, tal como ocurre luego de la realización de operaciones de labranza. Por el contrario, las modificaciones en el suelo inducidas por la implementación de una determinada rotación de cultivos bajo SD, se pueden visualizar en un mediano a largo plazo. Por otro lado, determinaciones como el PC, Dap, PE y EB permitieron caracterizar el estado estructural en un momento determinado pero no permiten dimensionar la tendencia de evolución de las parcelas bajo diferentes sistemas de cultivo. Para establecer si cada sistema tiene tendencia a la degradación o a la regeneración se debería contar con una cronosecuencia de perfiles o al menos con una descripción de la situación de partida.

Ante la proyección de continuar con los sistemas de producción agrícola bajo SD en la región, es necesario explorar alternativas de manejo que permitan mitigar cambios desfavorables en la estructura, como la formación de la estructura laminar, que se acentúa en planteos bajo SD con tendencia al monocultivo de soja. Ante este desafío, la disponibilidad de enmiendas orgánicas e inorgánicas de generación regional se presenta como alternativas viables para mejorar las condiciones físicas de los suelos en el corto plazo.

3.1.1 Oportunidades de disponibilidad de enmiendas orgánicas e inorgánicas en la Provincia de Entre Ríos

3.1.1.1 “Cama de pollo”

En Entre Ríos, el estudio de los efectos del agregado de enmiendas orgánicas cobra importancia debido a la necesidad de disposición de los residuos provenientes de las producciones animales intensivas (avicultura, por ejemplo). Durante el año 2014, el 46,7 % del total de cabezas faenadas de pollos parrilleros del país se realizó en esta provincia (Minagri, 2015). Un informe del Ministerio de Producción de Entre Ríos, consigna que para 2011 del total de las granjas avícolas habilitadas por SENASA en el país, el 47,81 % se encontraban en Entre Ríos, a su vez el 80 % de estas granjas eran de parrilleros (Figura 21).

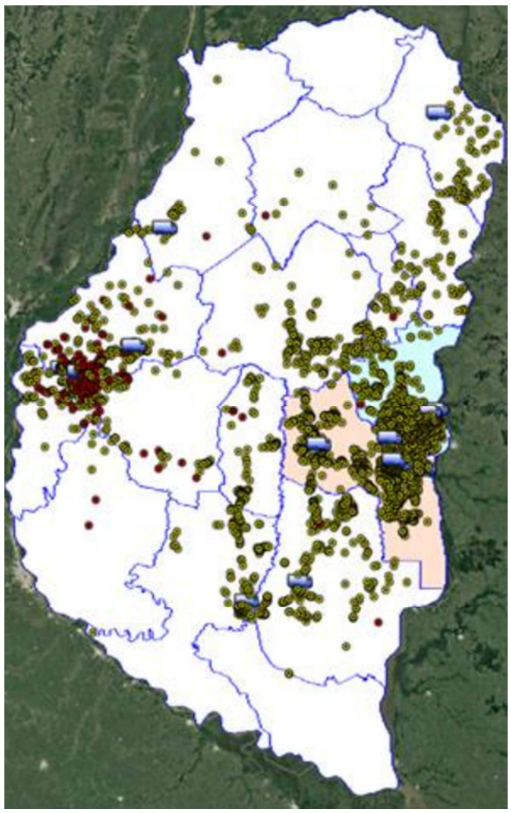

Figura 21: Distribución en la provincia de Entre Ríos de las granjas de pollos parrilleros (puntos verdes); granjas de gallinas ponedoras (puntos rojos) y frigoríficos avícolas (puntos celestes). Extraído de Gange, 2016.

En dichos sistemas de producción avícola, el principal residuo lo constituye la denominada “cama de pollo”, que es el sustrato sobre el que se desarrolla la crianza del pollo parrillero. Está compuesto por materiales como cáscara de arroz, aserrín o virutas de pino o eucaliptus, que a lo largo de la crianza van recibiendo restos de alimento, plumas y deyecciones de las aves (Gange, 2016). La cama de pollo contiene una carga importante de microorganismos, algunos de los cuales son patógenos para las aves y para el hombre (parásitos, virus y bacterias como *Salmonella sp*). Esto, sumado a la reutilización cada vez más frecuente de la cama durante más de una crianza, plantea la necesidad de aplicarle algún tratamiento (térmico o de compostaje) a la misma a fin de reducir el contenido de dichos microorganismos y el riesgo potencial de transmisión de enfermedades (Bernigau et al. 2016).

La composición química de la cama de pollo es variable, sobre todo en cuanto al contenido de nitrógeno y fósforo, dependiendo de la cantidad de crianzas que se hayan realizado y de las condiciones de manipuleo y almacenaje posteriores. La composición media, según distintos trabajos realizados en la provincia de Entre Ríos (Arias, 2002; Gange, 2014; Ré et. al. 2016) varía entre 60-70 % de materia seca, 1,75-2,8 % de nitrógeno y 1,2-1,7 % de fósforo total. Por su alto contenido de nutrientes, ha sido utilizada históricamente por los productores agropecuarios locales como una enmienda orgánica tendiente a suplir los requerimientos nutricionales de diversos cultivos y pasturas. En la provincia de Entre Ríos existen diferentes trabajos donde se ha evaluado el efecto de la fertilización con cama de pollo sobre el rendimiento de pasturas, verdeos y cultivos anuales en Vertisoles (Ré et al. 2016; De Battista y Arias, 2016)

Andreau et al. (2012) describen efectos positivos de la aplicación de cama pollo sobre la Dap, porosidad y EA en suelos de producción hortícola bajo cubierta del cinturón hortícolas de La Plata. En este sentido, Rauber et al. (2012), en suelos de Brasil,

Mandal et al. (2013), en EEUU y Khalid et al. (2014) en suelos de Ghana, encontraron condiciones físicas favorables en la estructura del suelo, medidas a través de la Dap, la resistencia a la penetración, infiltración y la EA, en lotes donde se realizaron aplicaciones de cama de pollo. Sin embargo son escasos los trabajos locales que analicen el efecto de esta enmienda sobre la regeneración de estructuras de suelo en lotes destinados a la producción agropecuaria.

3.1.1.2 Yeso agrícola

El yeso ($CaSO_4.2H_2O$) es una alternativa también de disponibilidad regional, debido a que en la provincia hay tres industrias, que además de comercializar yeso natural o "crudo" destinado a la construcción, elaboran yeso agrícola, que se usa como enmienda o corrector de suelos (Dirección de Minería 2010). Las canteras de este mineral se encuentran cercanas a la costa del río Paraná, al sur del departamento La Paz (ciudades de Piedras Blancas, Hernandarias). La producción total provincial de yeso (tanto de uso agrícola como de construcción) durante el año 2009 fue de 142000 t.

El yeso agrícola actualmente es ofrecido en las siguientes formas: sólido-granulado, pelleteado o granulado y polvo. La presentación de "sólido-granulado" es la denominación que el SENASA aplica a los yesos que luego de la extracción del yacimiento son triturados, zarandeados y clasificados en diferentes tamaños de partículas. Esta es la forma de comercialización más generalizada, existiendo una elevada heterogeneidad en la calidad de productos (granulometría, contenido de humedad, pureza, etc.) (Torres Duggan, 2007).

Si bien se conocen los efectos benéficos del agregado de enmiendas inorgánicas, atribuidos a su capacidad para liberar los electrolitos que mejoran la agregación de par-

tículas de arcilla de suelos sódicos y no sódicos (Miller, 1987; Shainberg et al. 1989; Flanagan et al. 1997 a y b; Dontsova, 1998; Norton, 1998; Tirado- Corbalá et al. 2013), hay interrogantes respecto al valor de la aplicación de yeso para la mejora en el ingreso de agua y en la estabilidad de agregados en suelos no sódicos bajo SD.

De acuerdo a la reseña anteriormente expuesta, se han podido documentar claramente los efectos benéficos sobre la estructura edáfica que puede promover la aplicación tanto de cama de pollo como de yeso y su combinación. Sin embargo, el estudio de la formación de estructura laminar bajo SD es reciente y por lo tanto, surgen numerosos interrogantes acerca de su implicancia sobre las propiedades edáficas, particularmente el movimiento de agua, en relación al uso y manejo de los suelos (Sasal et al. 2006; Sasal, 2012; Boizard et al. 2013; Alvarez et al. 2014). En tal sentido, son escasos los estudios que analicen el efecto del agregado de yeso y de residuos de la actividad avícola sobre la estructura laminar, en Argiudoles.

Ante ello se platea el interrogante sobre si es posible modificar en el corto plazo la estructura laminar y generar un tipo de estructura que permita mejorar el ingreso de agua al perfil del suelo mediante la utilización de dichas prácticas de manejo.

El objetivo de este capítulo es evaluar y cuantificar la regeneración estructural debido al aporte de "cama de pollo" como enmienda orgánica y/o por la aplicación de yeso como enmienda inorgánica en un Argiudol ácuico bajo SD.

3.2 Materiales y Métodos

En junio de 2014 se implantó un ensayo con el fin de analizar el efecto a corto plazo del agregado de enmiendas orgánica e inorgánica sobre la estructura del suelo y la infiltración. Dicho ensayo se llevó a cabo en la EEA de Paraná del INTA en un lote de

producción que presenta una rotación Sj–Mz, en SD por al menos 15 años. El tipo de suelo es un Argiudol ácuico, serie Tezanos Pinto, cuya descripción se realizó en el capítulo anterior.

El diseño empleado fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones (Figura 22). Los tratamientos consistieron en aplicaciones superficiales realizadas en agosto de 2014 de cama de pollo (C) como enmienda orgánica, yeso agrícola (Y) como enmienda inorgánica, combinación de ambas (C+Y) y testigo fertilizado (T).

Figura 22: Ubicación y distribución de los tratamientos de enmiendas. EEA Paraná INTA.

Las dosis de enmiendas consistieron en:

- 7,5 Mg ha^{-1} de C seca, correspondiente a un valor de aproximadamente 3.500 kg ha^{-1} de carbono. Dicha cama estuvo estabilizada en pila durante 5 meses y corresponde a 5 ciclos sucesivos de crianza de pollo parrillero.
- 3 Mg ha^{-1} de Y. El producto empleado fue yeso agrícola YESOER85 granulado de 1 – 5 mm, de la empresa Piedras Blacas S.A (http://www.yesoer.com.ar/caracteristicas-del-producto/). La dosis empleada se basó en el trabajo realizado por Wilson et al. (2004) quienes observaron cambios significativos en las condiciones físicas de suelos arroceros con do-

sis entre 1,5 a 3 Mg ha^{-1} de Y, sin causar efectos de fitotoxicidad en los cultivos.

El tratamiento T se fertilizó mediante el empleo de fertilizantes de uso tradicional (superfosfato triple de calcio, urea granulada), ajustando la dosis en base al contenido de N y P presentes en la cama de pollo.

A continuación (Tabla 6) se presenta los datos de la caracterización físico – química de las enmiendas empleadas:

Tabla 6: Caracterización físico – química de las enmiendas C y Y utilizadas.

Cama Pollo	
pH	7,9 ± 0,02
Conductividad Eléctrica (mS cm-1)	7,7 ± 0,1
Humedad (%)	47,5 ± 0,8
Materia Orgánica (%)	59,8 ± 1,9
Materia Seca (%)	52,5 ± 0,8
Carbono Orgánico Total (% base seca)	47,2 ± 0,3
Nitrógeno Kjeldahl (%)	2,5 ± 0,2
Fósforo Total (mg g^{-1})	16,9 ± 0,9
Relación C/N	18,9
Densidad (g l^{-1})	309,8 ± 34,2
Magnesio (mg / 100gr)	1080
Calcio (%)	2,87
Potasio (%)	1,5
Sodio (%)	0,138
Sulfato (ppm)	936,3
Yeso Agrícola	
Calcio (%)	20,7
Azufre de sulfatos (%)	16,6
Humdedad (%)	0,3

Se realizaron 4 muestreos de la condición estructural en un período de dos años: 1° antes de la aplicación de las enmiendas, 2° luego de la aplicación de las enmiendas y

antes de la implantación de soja; 3° luego de la cosecha de soja y antes de la implantación del maíz y 4° luego de la cosecha del maíz (Figura 23).

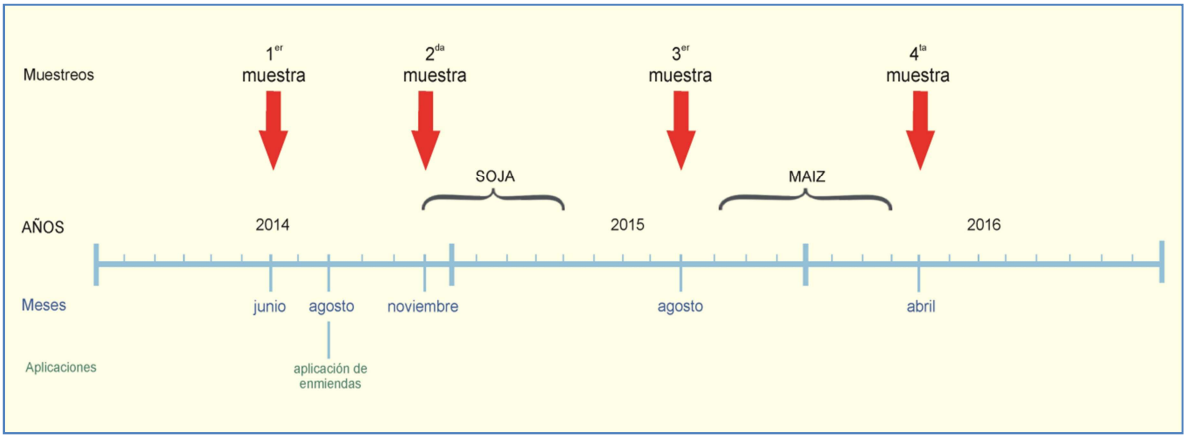

Figura 23: Momentos de muestreo de la condición estructural y de aplicación de las enmiendas en el ensayo en la EEA Paraná.

En el primer muestreo la determinación de campo consistió por un lado en la descripción visual del estado estructural, usando el método del PC (Gautronneau y Manichon, 1987) modificado por Boizard et al. (2017) para suelos en SD (cuya descripción fue realizada en el capítulo anterior). Los PCs se realizaron en tres trincheras perpendiculares a la línea de siembra distribuidas al azar en la zona donde se iba a implantar el ensayo. El objetivo de esta primera descripción fue analizar el estado estructural del lote antes de la aplicación de los tratamientos. Además se realizó un muestreo con barreno de media caña a dos profundidades (0-5 y 5-15 cm) para determinar COS.

Para los demás muestreos las determinaciones a campo consistieron, al igual que en el muestreo preliminar, del estado estructural usando el método del PC (una trinchera por repetición o parcela de cada tratamiento) sumado a que en el muestreo final se cuantificó el espesor y continuidad de la estructura laminar (metodología en el capítulo anterior).

Se midió la resistencia al corte (RC) *in situ* para cada tipo de estructura presente en el perfil utilizando un equipo manual (Eijkelkamp) con una paleta de 35 mm de altura y 19 mm de diámetro compuesta de 8 palas. Las paletas fueron enterradas en la pared vertical del perfil de cada tipo de estructura (3 repeticiones) y se efectuó una torsión suave para medir el valor de torque (Newton-metro) (Figura 24). Dicho valor aumenta a medida que se ejerce la torsión hasta alcanzar su valor máximo justo antes de la ruptura del suelo y luego desciende. El valor de torque máximo fue registrado y posteriormente convertido a valor de presión (kPa) utilizando el factor de conversión brindado por el fabricante.

Figura 24: Instrumental utilizado y forma de medición de RC a campo. Extraído de Sasal (2012).

Se extrajeron 3 muestras no disturbadas y 2 muestras disturbadas de cada tipo de estructura de cada trinchera y en ellas se analizó:

- Dap, mediante la técnica del cilindro (Burke et al. 1986), (ver capítulo anterior).
- Distribución del tamaño de poros, mediante el empleo de la mesa de tensión con placa de yeso (Klute 1986). Para ello se utilizó la relación entre el contenido de agua en el suelo y el potencial matricial (Hillel 1980) (1, 6 y 23 kPa de tensión, que corresponden a tamaños de poros de 300, 50 y 12,5 µm, respectivamente). Los mismos se clasificaron como: microporos (<12,5 µm de diámetro), mesoporos (12,5-50 µm) y macroporos (> 50 µm). En este último

intervalo, se separaron los poros mayores de 300 μm. Las muestras no disturbadas en cilindros de muestreo se saturaron al vacío durante 24 h, utilizando una mesa de tensión con una columna de agua colgante (Bezerra de Oliveira, 1968) (Figura 25). La retención de agua en el suelo se expresó en términos de contenido volumétrico utilizando las densidades aparentes para la conversión. El valor de la Porosidad Total (PT) se la calculó mediante el valor de humedad volumétrica saturada (Figura 26).

Figura 25: Mesa de tensión con placas de yeso para la determinación de la distribución de tamaño de poros.

Figura 26: Cilindros de muestra no disturbada en proceso de humectación.

- PE, mediante la técnica de DAt en querosene (Stengel, 1988), (ver capítulo anterior).

- Estabilidad de agregados (EA), mediante la metodología de Le Bissonnais (1996) con sus tres pretratamientos (Figura 27):
    - Humectación rápida por inmersión en agua: consiste en verter 10 g de agregados (entre 3 – 5 mm) en un recipiente que contenga agua destilada; dejar reposar durante 10 minutos (observación visual del estallido) y finalmente sacar el exceso de agua con una pipeta.
    - Disgregación mecánica luego de la rehumectación con etanol: este pretratamiento consta de dos partes, primeramente se colocan 10 g de agregados (entre 3 – 5 mm) en un recipiente con etanol durante 30 min, luego se saca el exceso de etanol; acto seguido, se transfieren los agregados a un Erlenmeyer con agua destilada y se agita manualmente efectuando 10 golpes y se deja reposar durante 30 min más para finalizar retirándole el exceso de agua.
    - Humectación lenta por capilaridad: consiste en poner 10 g de agregados de 3 – 5 mm sobre un papel filtro sobre una tabla de succión, con una depresión de 3 cm y esperar durante 60 min aproximadamente la humectación por capilaridad de dichos agregados.

Los agregados sometidos a los tres pretratamientos finalmente pasan a un tamizado en alcohol en un tamiz de 50 µm, utilizando el agitador de movimiento helicoidal Feodoroff. La fracción > a 50 µm resultante se seca en estufa y, posteriormente, se tamiza en seco y pesa con el fin de obtener la distribución de agregados para los tamaños: >2000 µm , 2000-1000 µm, 1000-500 µm, 500-200 µm, 200-100 µm, 100-50 µm. La fracción <50 µm se obtiene por diferencia en relación al peso inicial.

Se calcula el diámetro medio ponderado (DMP), expresado en mm (milímetros) como la suma de las masas de las fracciones remanentes de cada tamiz, multiplicado por

la abertura media de los tamices adyacentes. De esta manera se calculan los DMP para cada uno de los pretratamientos (estallido (DMPe); disgregación mecánica (DMPd) y capilaridad (DMPc)) y con el promedio de los tres pretratamientos se puede obtener un índice que sintetice la información de cada situación evaluada (DMPm).

Figura 27: Imágenes de los pre tratamientos de laboratorio de la metodología de Le Bissonnais (1996), extraído de Gabioud (2009).

Con el fin de obtener una información integrada del PC de suelo, con los datos del porcentaje de ocupación de cada tipo de estructura y las propiedades en cada una de ellas, se generó un promedio ponderado para el perfil estudiado. Es así que se analizaron el promedio ponderado para Dap, PT, distribución de tamaño de poros, RC y EA (DMPm, DMPe, DMPd y DMPc). La ponderación se la realizó con todas las estructuras y también tomando solo las estructuras a nivel superficial como lo son Γ y P.

Para la medición del escurrimiento, al igual que en caso del capítulo anterior, se realizaron ensayos de simulación de lluvia con una intensidad 60 mm h^{-1}, uno por parcela (repetición) a campo retirando previamente el rastrojo superficial para evitar su inci-

dencia en el comportamiento del ingreso de agua al perfil (Chagas et al. 2004). Cada 5 minutos se registró la lluvia caída y el escurrimiento y esos datos se graficaron ajustando un modelo bilineal plateau, relacionando la lluvia acumulada desde el inicio de la simulación con la tasa de escurrimiento (mm h^{-1}). De dicho modelo se calculan los valores de la lluvia acumulada hasta inicio de escurrimiento y hasta inicio del escurrimiento base, pendiente de incremento del escurrimiento y escurrimiento base (EB) (Figura 28).

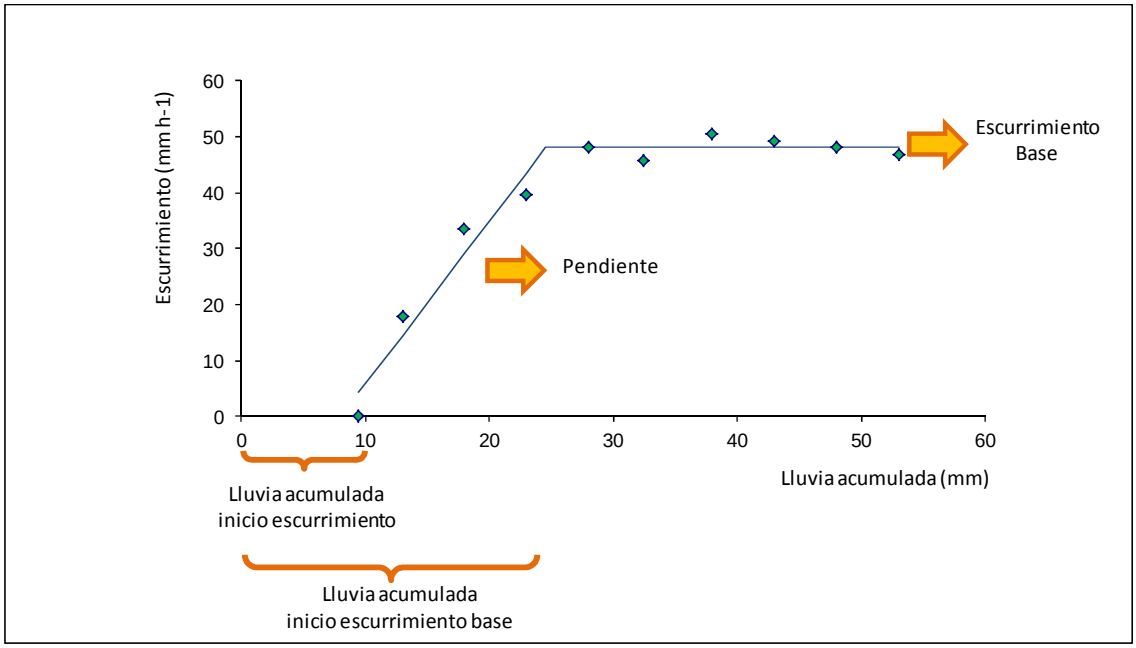

Figura 28: Ejemplo de modelo bilineal plateau donde se señalan los parámetros de la curva de escurrimiento estudiados.

En la última fecha de muestreo se realizó también (al igual que en la primera) un muestreo con barreno de media caña a los fines de determinar el contenido de COS a las profundidades de 0 – 5 cm y de 5 – 15. El COS se determinó por oxidación con dicromato de potasio en medio ácido según el método de Walkley y Black (IRAM -SAGyP 29571-2 2011).

Los análisis estadísticos constaron de análisis de varianza mediante el uso de modelos lineales generales mixtos, test de LDS Fisher para comparación de medias y

regresiones lineales, utilizando el software Infostat 2017 (Di Rienzo et al. 2017). Para el caso de los modelos lineales generales mixtos para las distintas variables estudiadas, se procedió a comparar el modelo con corrección por heterocedasticidad de tratamiento y el modelo original sin corrección para finalmente optar por aquel modelo que mejor ajuste posea (en base a los valores de AIC y BIC) (Di Rienzo et al. 2011).

3.3 Resultados y Discusión

3.3.1 Análisis de la evolución estructural usando el Perfil Cultural

En la Figura 29 se presenta un PC representativo (de 3 perfiles realizados) de la situación inicial o de partida, cuya finalidad fue identificar la distribución de los tipos de estructura encontrados, antes de la aplicación de los tratamientos. Puede observarse que el lote seleccionado no presentaba estructura Γ y que P se presentaba continua, con un espesor de 10 cm desde la superficie. Por debajo de la estructura P, se presentaba una estructura Φ, con alta presencia de grietas, fisuras y canales de raíces. La estructura Δ se encontraba localizada y solo ocupando un 10 a 15 % del perfil, De Battista et al. (1994) y Sasal (2012) observaron presencia de estructuras Δ en similares % en planteos de SD.

Figura 29: distribución de estructuras presentes en el Perfil Cultural representativo de la situación inicial, antes de la aplicación de las enmiendas. Los distintos colores indican distintas estructuras: Naranja P, marrón Φ y rojo Δ.

Utilizando dicha metodología del PC se describieron en 3 momentos las distintas condiciones estructurales en los 4 tratamientos implementados. En general, se identifi-

caron 4 tipos de estructura con una distribución preferentemente vertical. En superficie se observaron estructuras de tipo Γ o P y en profundidad estructuras tipo Φ y en zonas localizadas, estructuras de tipo Δ. Estas estructuras son características de Argiudoles bajo SD (De Battista et al. 1994, Sasal, 2012, Sasal et al. 2017 a y b).

La evolución en el perfil de los distintos tipos de estructura en función de los tratamientos aplicados puede observarse en la Figura 30. Se pueden apreciar de manera visual los cambios que se registraron a lo largo del tiempo, la generación de estructura Γ en superficie y el efecto diferencial de los tratamientos a través de la proporción, en el espesor y continuidad de las distintas estructuras.

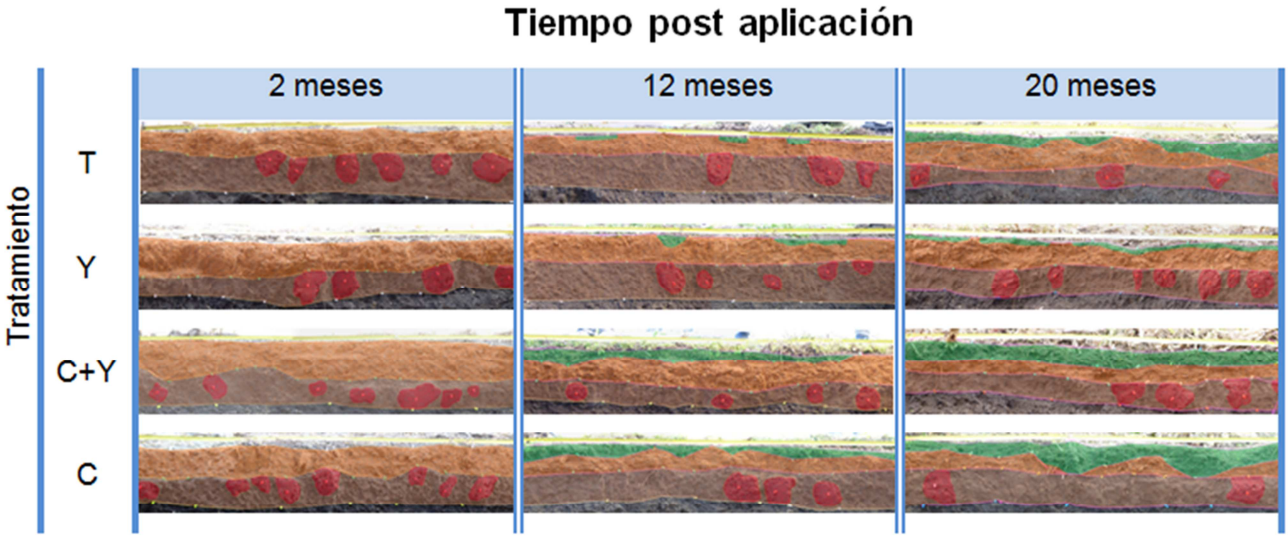

Figura 30: Descripción visual del cambio en la distribución en el Perfil Cultural de las estructuras. Columnas representan el tiempo post aplicación, y las filas representan los tratamientos de las enmiendas (T: testigo; Y: yeso; C+Y: cama pollo y yeso; C: cama pollo. Los distintos colores representan las estructuras halladas: verde Γ, naranja P, marrón Φ y rojo Δ. Cada imagen corresponde a un perfil representativo del promedio de las 3 parcelas (repeticiones).

Para Γ, resultó significativa la interacción entre los tratamientos y el tiempo post aplicación ($\alpha<0,05$). El la Figura 31 se aprecia que 2 meses después de la aplicación de las enmiendas no se registraba presencia de Γ y luego hubo un notable incremento a partir de los 12 meses post aplicación, destacándose el tratamiento C. Al cabo de 20 meses post aplicación se registró el efecto del agregado de C sola o combinada con Y que presentaron la mayor proporción de Γ (26,1 y 25,4 %, respectivamente), difiriendo significativamente del resto de los tratamientos. En esa fecha, las aplicaciones de C produjeron un aumento de Γ de aproximadamente 2,2 veces respecto a T y Y. No se observó un efecto de la aplicación de Y en el aumento de la estructura Γ, pero sí en combinación con C (C + Y). Como pudo observarse en el capítulo anterior, valores de % Γ del orden del 10 % pudieron encontrarse en las situaciones bajo SD con rotación Mz – Tr/Sj, mientras que valores superiores fueron encontrados en la situación con labranza de suelo. Boizard et al. (2017) menciona valores de Γ del orden de 8% para un Argiudol de Paraná en rotación bajo SD.

En los tratamientos sin aplicación de enmienda orgánica también se observó un incremento del porcentaje de Γ en el muestreo de 20 meses post aplicación respecto a la situación a 2 meses post aplicación. Dicho aumento puede atribuirse al efecto de las raices de los cultivos en la rotación bajo SD.

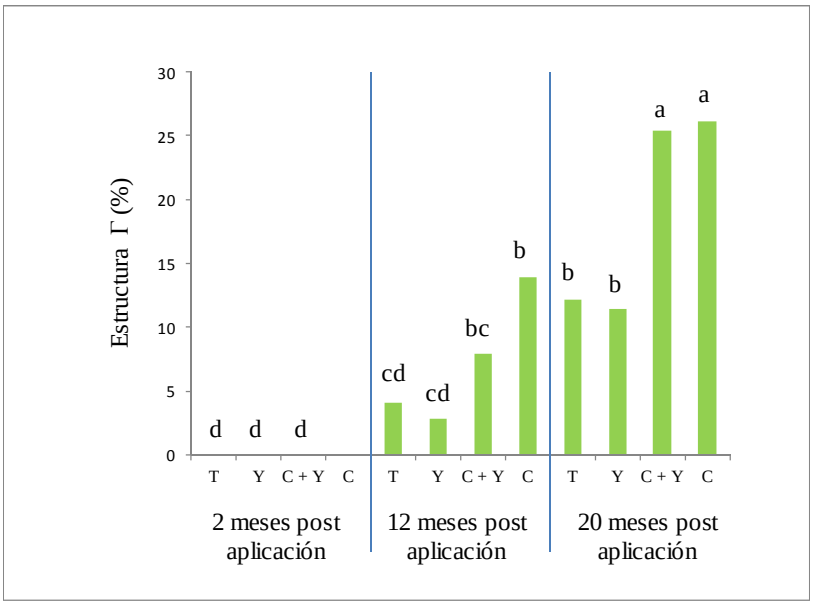

Figura 31: Proporción de estructura Γ (%) a los 2, 12 y 20 meses post aplicación para los tratamientos de enmiedas (T: testigo; Y: yeso; C+Y: cama pollo y yeso; C: cama pollo). Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0.05).

Para el caso de P, no resultó significativa la interacción entre tratamiento y tiempo post aplicación, por lo que se realizó el análisis de cada factor principal por separado (tratamiento y tiempo post aplicación).

En este tipo de estructura se observa una disminución significativa de su proporción en el perfil a medida que transcurre el tiempo (p<0,05), registrándose una disminución promedio de alrededor del 36% al cabo de 20 meses post aplicación (Figura 32a). También se observan disminuciones significativas por efecto de los tratamientos (Figura 32b), en este sentido, el tratamiento C generó una reducción de alrededor del 27% en relación a los tratamientos T y Y quienes presentaron los mayores porcentajes de P (44,5 y 46,3% respectivamente). Boizard et al. (2017), mencionan valores inferiores de P encontrados en Argiudoles de Paraná (37%), mientras que en el capítulo II de esta tesis, el mayor valor de P se encontró en el monocultivo de soja (40%).

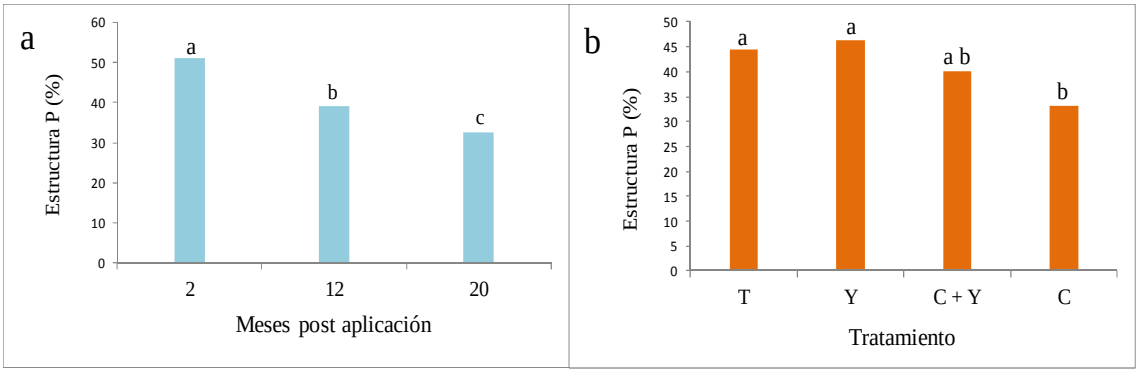

Figura 32: a) proporción media de estructura P (%) a los 2, 12 y 20 meses post aplicación. b) proporción media de estructura P (%) para los tratamientos de enmiendas. (T: testigo; Y: yeso; C+Y: cama pollo y yeso; C: cama pollo). Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0,05)

Transcurridos 20 meses de aplicadas las enmiendas se pudo observar reducciones significativas de P (Tabla 7) entre el tratamiento C en comparación con Y y T. En cuanto a la aplicación de yeso solo, este tratamiento no produjo disminuciones significativas de P respecto a T mientras que la combinación C + Y no se diferenció con el resto de los tratamientos aunque el valor de % de estructura P fue menor que para los tratamientos sin cama de pollo.

Tabla 7: Proporción de estructura P (%) a los 20 meses post aplicación para los tratamientos de enmiendas (T: testigo; Y: yeso; C+Y: cama pollo y yeso; C: cama pollo). Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0,05)

Tratamiento	% estructura P	
T	44,22	a
Y	36,16	a
C + Y	29,34	ab
C	20,69	b

Continuando con el análisis de la estructura P al cabo de 20 meses post aplicación, cobra importancia el estudio del espesor y continuidad de dicha estructura debido al efecto negativo que podría tener sobre el ingreso de agua al suelo.

Para el caso del espesor, los mayores valores hallados fueron de alrededor de 9 cm, que en algunos casos correspondían con desarrollo de estructura P desde la superficie, estos valores concuerdan con espesores señalados por Alvarez et al. (2014), Sasal et al. (2017 a) en Molisoles de la provincia de Buenos Aires y con los medidos en el anterior capítulo. En lo referente al efecto de la aplicación de las enmiendas, la cuantificación del espesor de P arrojó diferencias significativas, destacándose la reducción del orden de 5 cm entre el tratamiento C y los tratamientos T y Y donde se observaba la presencia de la estructura P desde la superficie en algunos sectores del perfil (Figura 33a).

En lo referente a la continuidad de la estructura P (Figura 33b), no se registraron efectos significativos que demuestren algún proceso de discontinuidad generado por los tratamientos aplicados.

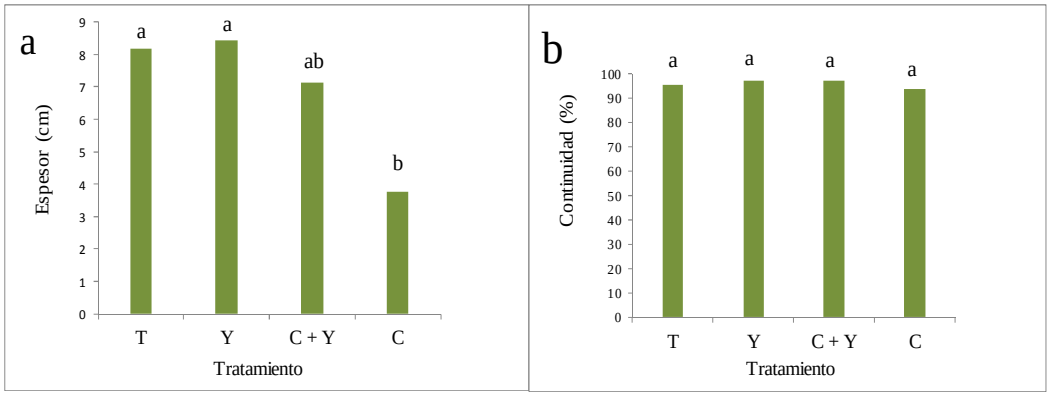

Figura 33: a) espesor de estructura P (cm) a los 20 meses post aplicación y b) continuidad de estructura P (%) a los 20 meses post aplicación, para los tratamientos de enmiendas (T: testigo; Y: yeso; C+Y: cama pollo y yeso; C: cama pollo). Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher $p<0.05$)

A su vez se observó correlación significativa negativa entre los porcentajes de estructura Γ y P. Su signo negativo indica que una importante parte de la generación de la estructura Γ proviene por regeneración de la estructura P. En la Figura 34a se observa una correlación significativa ($p<0,05$) para los porcentajes de ambas estructuras en la totalidad de los perfiles culturales realizados considerando todas las fechas de muestreo. Cabe destacar que a medida que transcurre el tiempo desde la primera medición, los datos se disponen más cercanos a la línea de ajuste del modelo de regresión lineal, comenzando a los 2 meses con presencia únicamente de estructura P con un rango de variación entre 37 y 60 % en el perfil (dicha variación se la puede atribuir a la variación espacial natural). Este mejor ajuste se observa en la Figura 34b en el cual solo se presentan los datos de los perfiles correspondientes al último muestreo. En dicho análisis se destaca que todos los puntos que están por debajo de un valor de 30% de estructura P y superiores a 20% de estructura Γ, corresponden a los tratamientos con aplicación de enmienda orgánica (cama pollo).

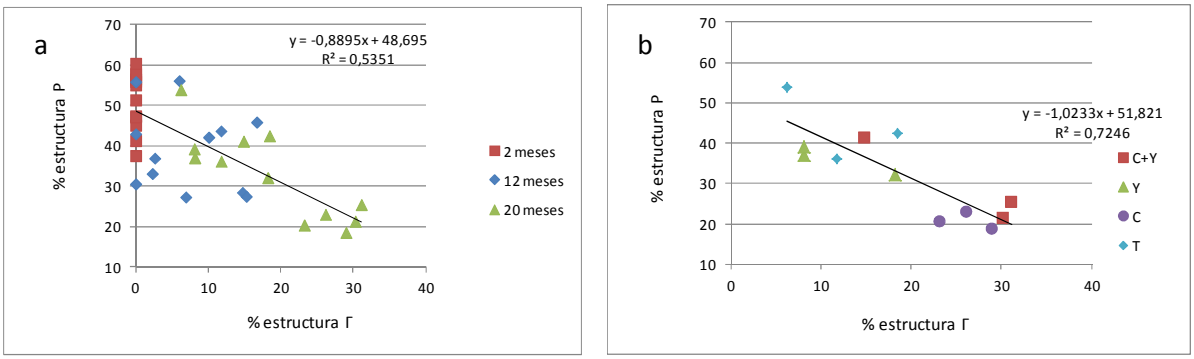

Figura 34: a) correlación entre el % de Γ y P b) continuidad de estructura P (%) a los 20 meses post aplicación, para los tratamientos de enmiendas (T: testigo; Y: yeso; C+Y: cama pollo y yeso; C: cama pollo).

Finalmente, para el caso de las estructuras Φ y Δ, el análisis estadístico temporal no arrojó interacción significativa entre tratamientos y tiempo post aplicación ni tampo-

co resultó significativo el modelo para tratamientos y tiempo por separado. Sasal (2012) trabajando en Argiudoles de la zona núcleo pampeana reportó que la estructura Φ fue la que menos variaciones sufrió en cuanto a proporción de área ocupada en el perfil al cabo de 5 años en un ensayo de secuencias de cultivos. Esto último concuerda con la escasa variación que evidenció esta estructura en el lapso de 18 meses. El promedio de Φ a los 2 meses post aplicación fue de 41,7 % y al cabo de los 20 meses fue de 39,3%. Para el caso de Δ, 7,1 y 9,3% a los 2 y 20 meses respectivamente, valores similares para esta estructura en SD fueron reportados por De Battista et al. (1994) quienes trabajaron en un Argiudol de la zona de Pergamino y al reportado por Boizard et al. (2017) en un Argiudol de Paraná.

Además, el estudio de estas estructuras en el último muestreo tampoco arrojó diferencias significativas en cuanto a su variación porcentual en el perfil por efecto de los tratamientos. Siendo para el caso de la estructura Φ entre 34,9% y 45,9% para los tratamientos T y C respectivamente y para el caso de la estructura Δ un valor mínimo de 7,35% para el tratamiento C y un valor máximo de 11,75% para el tratamiento de Y. Cabe aclarar que este valor máximo encontrado para la estructura Δ es considerablemente menor a los valores máximos reportados por De Battista et al. (1994), quienes hallaron casi 30% de ocupación de dicha estructura en perfiles de Argiudoles que presentaban degradación física por uso agrícola convencional de larga data y que en los últimos años había cambiado a un sistema bajo SD.

Según lo anteriormente expuesto se evidencia que en las estructuras tipo Φ y Δ, ubicadas a nivel subsuperficial, no se observaron variaciones de su porcentaje en el PC por efecto del tiempo y de los tratamientos aplicados sin incorporación a nivel superficial. No ocurre lo mismo con las estructuras ubicadas más superficialmente (Ρ y Γ), ya

que en dichas estructuras se apreciaron cambios por el sistema de producción bajo SD, y una regeneración incrementada por el agregado de enmienda orgánica.

3.3.2 Propiedades físicas de las estructuras del Perfil Cultural a los 20 meses post aplicación

Las determinaciones de distintas propiedades físicas en laboratorio son herramientas complementarias que permiten, por un lado, corroborar si las distintas estructuras identificadas en el PC poseen características distintivas entre ellas y, por otro, si estas propiedades son modificadas por la aplicación de las enmiendas evaluadas.

La Dap, la RC, PT y PE son propiedades físicas que pueden reflejar algún grado de compactación en el suelo y, por ende, la cuantificación de estas propiedades en el perfil permitirían inferir la ubicación de posibles limitantes. A su vez, el registro de aumentos en el tamaño y la cantidad de poros, junto con la EA, indicaría mejoras en cuanto a la funcionalidad de transferencia y/o almacenamiento de agua en el perfil.

3.3.2.1 Densidad aparente, Resistencia al Corte y Porosidad total

En la Tabla 8 se presentan los valores de Dap, RC y PT medidos en las estructuras halladas en los perfiles culturales a los 20 meses post aplicación de las enmiendas.

En el estudio de Dap no se observó una interacción significativa entre tipo de estructura y tratamientos aplicados, pero si resultó significativa ($\alpha>0,05$) para la comparación entre estructuras. De Battista et al. (1994), Sasal (2012) en Molisoles de la zona núcleo agrícola de Argentina y Neves et al. (2003) en perfiles culturales realizados en suelos de Brasil también encontraron diferencias significativas para esta propiedad entre estructuras. Se destaca que la estructura Γ presenta la menor densidad, diferenciándose del resto de las estructuras. La Δ es la estructura con mayor Dap, con valores cercanos a

la Dap crítica obtenida por Wilson et al. (2013) de 1,44 Mg m^{-3} para Molisoles, mientras que la P y Φ presentaron valores intermedios, siendo el valor de Φ muy cercano al crítico. Los valores de Dap para Γ y Δ concuerdan con los hallados por De Battista et al. (1994) en estructuras de similares características halladas en perfiles de la localidad de Pergamino. Además, Sasal (2012); Wilson y Cerana (2004) hallaron valores similares de Dap en estructuras por debajo de los 10 cm (que involucra las estructuras Φ y Δ) y que pueden resultar limitantes para el desarrollo radicular. Mientras que Alvarez et al. (2014), hallaron valores entre 0,95 a 1,45 Mg m^{-3} en los primeros 10 cm de un Argiudol típico de la Pampa ondulada de la provincia de Buenos Aires.

Tabla 8: Valores de Dap (Mg m^{-3}), RC (kPa) y PT (%) de las distintas estructuras halladas en los perfiles culturales a los 20 meses post aplicación de las enmiendas. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0,05)

Estructura	Dap		RC		PT	
Γ	1,08	a	32,25	a	56,55	a
P	1,37	b	45,78	b	46,06	bc
Φ	1,43	c	56,38	c	46,26	b
Δ	1,47	d	70,16	d	44,43	c

En lo referente a RC se observa que existen diferencias significativas entre todas las estructuras analizadas aunque no se observa efecto de los tratamientos para un mismo tipo de estructura. La estructura tipo Δ presentó el mayor valor de RC, siendo este valor 2 veces superior al de la estructura Γ. El valor de RC para Γ, concuerda con lo hallado por Wilson et al. (2013), quienes reportaron valores de RC cercanos a 30 kPa en la parte superficial un Molisol con Dap de 1,1 Mg m^{-3}.

El valor de RC para P fue significativamente menor a los encontrados en las estructuras Φ y Δ. En este sentido, Boizard et al. (2013) determinaron que la RC se reduce con el desarrollo de la estructura laminar del suelo, ya que el agrietamiento horizontal introduce planos de debilidad.

La diferenciación de RC entre los tipos de estructuras concuerda con lo encontrado por Sasal (2012) en un Argiudol de la localidad de Pergamino, aunque sus valores fueron sustancialmente menores a los obtenidos en el presente ensayo, esto puede deberse al contenido de humedad en el cual se efectuó la medición o a diferencias texturales entre los Argiudoles evaluados, debido a que el suelo de Paraná presenta una textura más fina que el de Pergamino.

Al igual que el caso anterior de Dap y RC, la evaluación de la PT corroboró que es una propiedad que depende del tipo de estructura y no es afectada por los tratamientos. El análisis estadístico indicó solo diferencias significativas entre estructuras, donde se aprecia que la estructura Γ es la que presenta el mayor valor PT (56,5 %), diferenciándose del resto de las estructuras. La estructura Δ es la que menor PT posee, siendo 21 % menor a la Γ. Las estructuras P y Φ no se diferencian estadísticamente entre sí y presentan valores intermedios del orden del 46% de PT.

Los valores encontrados para PT permiten distinguir entre tipos de estructura y salvo para el caso de Γ, el resto de las estructuras sugieren una limitante al desarrollo de los cultivos, por ello un análisis más detallado de la distribución y tamaño de poros resulta de mayor utilidad para poder inferir sobre estas limitaciones.

3.3.2.2 Distribución tamaño de poros

La aplicación de enmiendas no modificó la distribución de tamaños de poros para un mismo tipo de estructura, siendo la cantidad y tamaño de poros una característica propia de cada estructura. Neves et al. (2003) también encontraron diferencias entre estructuras para distintos tamaños de poros en suelos de Brasil.

La Figura 35 esquematiza la distribución de los diferentes tamaños de poros para las distintas estructuras presentes en el PC, en ella se destaca por un lado la mayor cantidad de macro y mesoporos de la estructura Γ, con valores de 5,28%, 11,71% y 18,21%, correspondientes a los tamaños de poros de >300, 300-50 y 50-12,5 µm, respectivamente; por otro lado se destaca también la menor cantidad de los microporos (<12,5 µm) diferenciándose significativamente de las demás estructuras. Valores similares de macro y microporos fueron encontrados para esta estructura por Sasal (2012) en Pergamino; para el caso de mesoporos los valores de Pergamino fueron inferiores a los obtenidos en Paraná.

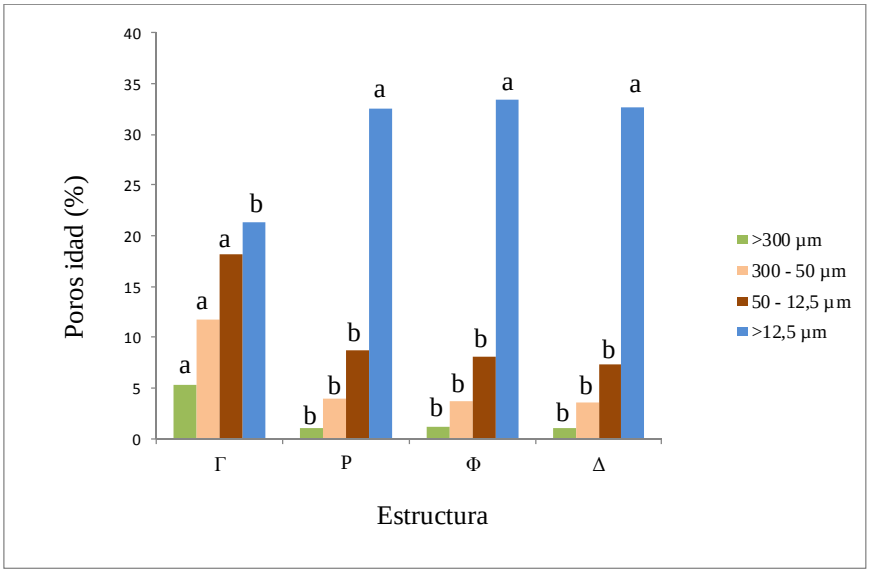

Figura 35: Distribución de tamaños de poros de las estructuras halladas en los Perfiles Culturales a los 20 meses post aplicación de las enmiendas. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0.05) para un mismo tamaño de poro entre las distintas estructuras.

Para el resto de las estructuras, que no difirieron entre sí, los valores promedios para los distintos tamaños de poros fueron de 1,08, 3,73, 8,06 y 32,79 % para los poros

de >300, 300-50, 50-12,5 y <12,5 µm, respectivamente. Valores mayores de macroporosidad han sido reportados para la estructura P en el mismo ensayo de Pergamino.

3.3.2.3 Porosidad estructural

El análisis estadístico de esta variable presentó una marcada diferencia a favor de la estructura Γ, la cual se diferenció significativamente del resto de las estructuras. Presentó 2,5 veces más poros del tipo estructural que la P (Tabla 9) quien no se diferenció de las estructuras Φ y Δ. La estructura Δ fue la de menor porcentaje de poros estructurales (3,2 veces menos que la Γ). Tampoco se observó efecto de los tratamientos en cuanto a PE de un tipo específico de estructura.

Tabla 9: Valores de PE (%), de las distintas estructuras halladas en los perfiles culturales a los 20 meses post aplicación de las enmiendas. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0,05).

Estructura	PE
Γ	8,51 a
P	4,27 b
Φ	3,46 b
Δ	2,65 b

Los valores de PE obtenidos para P, Φ y Δ fueron acordes a los hallados por Sasal (2012) y De Battista et al. (1994) en perfiles culturales realizados en Argiudoles de la zona de Pergamino. En cuanto a la PE de la estructura Γ, se observa que el valor encontrado en el ensayo de enmiendas es inferior al encontrado para esta estructura en el capítulo II y los encontrados en la zona de Pergamino, lo que podría atribuirse para el primer caso a diferencias en el estado de humedad del suelo al momento del muestreo y para el segundo caso, a la granulometría limosa fina del Argiudol de la zona de Paraná (De Battista et al. 1994; Taboada et al. 2008).

3.3.2.4 Estabilidad de agregados

En este estudio se observó efecto significativo del agregado de enmiendas orgánica e inorgánica evidenciado en una interacción significativa entre los tipos de estructuras del perfil y los tratamientos aplicados (α=0,05), interacción que no se había dado para las anteriores propiedades físicas.

El análisis preliminar de la EA, dado por el DMPm, se muestra en la Figura 36. En la misma se observa que la estructura Γ presenta mayor estabilidad en los tratamientos Y y C+Y, lo cual estaría indicando un efecto de estabilidad aportado por esta enmienda inorgánica, ya que si se la compara con la misma estructura en los tratamientos sin Y, la diferencia resulta significativa ($p<0,05$) (DMPm 1,49 *vs* 1,14 para los tratamientos con y sin Y respectivamente). Gabioud et al. (2011) hallaron valores de DMPm superiores a 2mm para los primeros 10 cm en situaciones inalteradas en un Argiudol de Paraná y valores entre 1 – 1,5 mm para situaciones de cultivos bajo SD. Para el caso de la estructura P, solo se observó que el T fue significativamente menor a Y y C, no difiriendo de C+Y.

Para los casos de las estructuras Φ y Δ, no se registraron diferencias significativas atribuidas a efecto de tratamientos, lo cual era esperable debido a que estas estructuras fueron descriptas por debajo de los 10 cm de profundidad y las aplicaciones de las enmiendas se realizaron a nivel superficial.

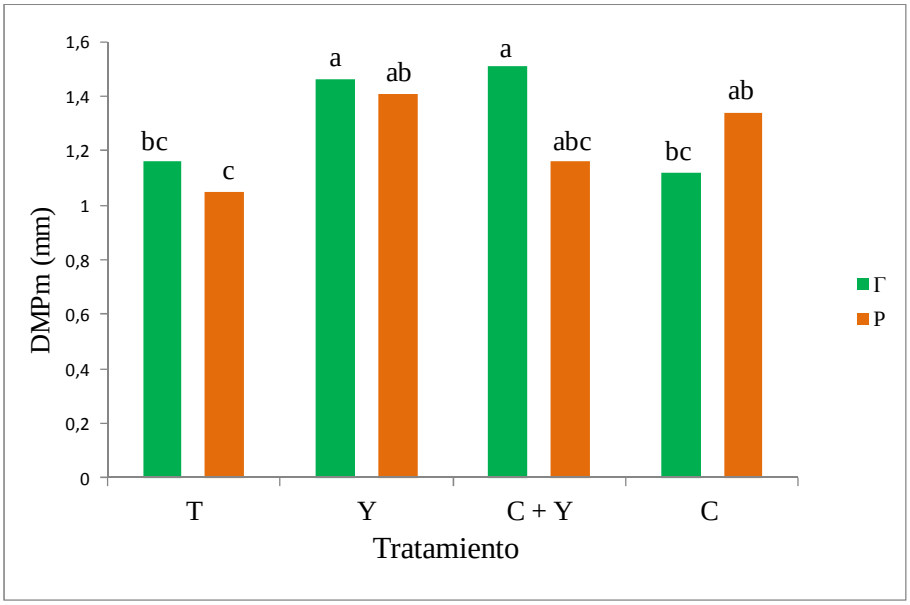

Figura 36: Estabilidad de agregados medido mediante el DMPm (mm) para las estructuras Gamma (Γ) y Platy (P) de los distintos tratamientos de enmiendas (T: testigo, Y: yeso, C+Y: cama de pollo y yeso y C: cama pollo, a los 20 meses post aplicación. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0,05) para la interacción estructura - tratamientos.

Con el fin de ahondar en los mecanismos de desagragación subyacentes, se analizaron los resultados de aplicar los diferentes pretratamientos de estallido (DMPe), disgregación mecánica (DMPd) y capilaridad (DMPc).

En el caso del DMPe, cuyo valor es indicativo del estado de cohesión interna y la velocidad de humectación del agregado (hidrofobicidad), se puede observar una interacción significativa (α=0,05) entre las estructuras y los tratamientos. En este sentido, cabe destacar el caso particular de la estructura Γ (Figura 37), la cual presentó valores superiores de estabilidad en los casos donde se aplicó enmiendas (C, Y y C+Y) difiriendo significativamente de T. El promedio de los tratamientos con enmiendas fue de 0,45 mm, mientras que el T fue de 0,3 mm. Valores similares fueron descriptos por Gabioud et al. (2011) para este pretratamiento en los primeros cm de suelo en Paraná.

Para el caso de las demás estructuras (P, Φ y Δ), no se observaron diferencias que indiquen efecto de los tratamientos.

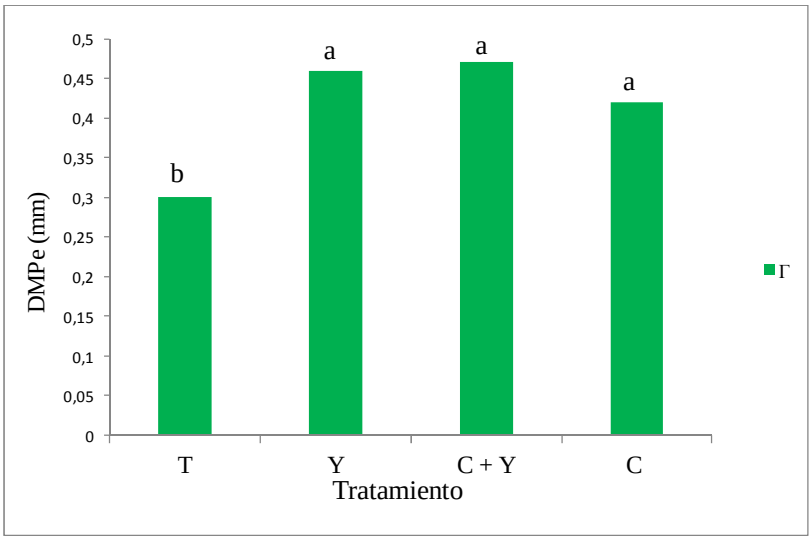

Figura 37: Estabilidad de agregados medido mediante el DMPe (mm) para la estructura Gamma (Γ) en los distintos tratamientos de enmiendas (T: testigo, Y: yeso, C+Y: cama de pollo y yeso y C: cama pollo, a los 20 meses post aplicación. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0,05).

El DMPd pone de manifiesto la cohesión de los agregados en estado húmedo cuando son sometidos a la acción de fuerzas externas, en este caso, el impacto de las gotas de lluvia que puede originar la fragmentación de los agregados. Por tal motivo cobra importancia este mecanismo de desagregación en aquellas estructuras que se encuentran en contacto con la superficie del suelo (Γ y P).

En este caso, el análisis estadístico indicó interacción entre el tipo de estructura y los tratamientos aplicados donde cabe destacar que para el caso de la estructura Γ (Tabla 10) no se observaron diferencias adjudicadas a efectos de tratamientos. En el caso de la estructura P, se puede apreciar que la estabilidad de dicha estructura es significativamente menor para el caso de T en comparación con Y y C. Esto último cobra relevancia debido a que, como se pudo apreciar en la sección donde se estudiaron los perfiles culturales, por un lado el tratamiento T presentaba desarrollo de estructura P desde la superficie y por otro lado, si dicha estructura presenta una estabilidad menor frente a la

acción mecánica de la gota de lluvia, todo ello podría ocasionar restricciones al ingreso de agua.

Tabla 10: Valores de DMPd (mm), de Gamma (Γ) y Platy (P) a los 20 meses post aplicación para cada tratamiento de enmiendas (T: testigo, Y: yeso, C+Y: cama pollo y yeso y C: cama pollo). Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher $p<0.05$) en la interacción estructura - tratamiento.

	Tratamiento			
Estructura	T	Y	C + Y	C
Γ	1,84 a	2,13 a	2,25 a	1,8 ab
P	1,58 b	2,08 a	1,72 ab	2,19 a

El DMPc permite por un lado estudiar el comportamiento de los agregados sometidos a los fenómenos de contracción – expansión que se producen durante la humectación (hinchamiento diferencial de las arcillas) y, por otro, los efectos físicos químicos de dispersión, proceso gobernado por ciertos cationes presentes en la interfase del suelo.

El análisis estadístico de esta variable, al igual que los anteriores casos, arrojó interacción significativa entre tipos de estructuras y tratamientos. No se apreciaron diferencias claras que denotaran algún efecto de los tratamientos sobre alguna estructura en particular, salvo el hecho que los mayores valores de estabilidad correspondieron a la estructura Γ de los tratamientos C+Y e Y (1,81 mm y 1,79 mm respectivamente) (Tabla 11).

Tabla 11: Valores de DMPc (mm), de Gamma (Γ), Platy (P), Phi (Φ) y Delta (Δ) a los 20 meses post aplicación para cada tratamiento de enmiendas (T: testigo, Y: yeso, C+Y: cama pollo y yeso y C: cama pollo). Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher $p<0.05$) en la interacción estructura - tratamiento.

	Tratamiento			
Estructura	T	Y	C + Y	C
Γ	1,32 abc	1,79 a	1,81 a	1,18 abc
P	1,17 abc	1,67 ab	1,36 abc	1,43 abc

Φ	1,24 abc	1,13 c	1,61 ab	1,16 bc
Δ	1,34 abc	1,38 abc	1,17 abc	1,72 ab

3.3.3 Estado estructural del suelo determinado mediante las propiedades físicas ponderadas

Los estudios sobre propiedades físicas edáficas teniendo como base el PC (De Battista et al. 1994; Neves et al. 2003; Sasal 2012; Boizard et al. 2017) permiten destacar de manera particular cada tipo de estructura y al mismo tiempo brindar información integrada y completa del perfil analizado. Por este motivo, en el presente estudio, se efectuaron ponderaciones de las propiedades edáficas estudiadas en el perfil teniendo en cuenta dos criterios de análisis: a) contemplando la totalidad de las estructuras del horizonte superficial analizado, y b) considerando solo las estructuras que se encontraban a nivel superficial y que abarcaban aproximadamente los primeros 10 a 11 cm del suelo. Este último criterio se adoptó teniendo en cuenta la aplicación en superficie de los tratamientos y que la actividad biológica edáfica en sistemas sin remoción como la siembra directa, se concentra principalmente en los primeros centímetros del suelo.

a) En el estudio del horizonte superficial completo no se observaron cambios significativos atribuibles a los tratamientos analizados. Siendo PE y estabilidad de agregados para sus pretratamientos de estallido y disgregación mecánica aquellas propiedades físicas que arrojaron un análisis de varianza significativo (α=0,05, Tabla 12).

Para el caso de la PE se observa una disminución significativa en el tratamiento Y en relación al resto de los tratamientos. Esta tendencia a la reducción de poros se ve reflejada (no significativamente) en las variables PT y en los porcentajes de macro y micro poros ponderados, donde el tratamiento Y tiene valores inferiores al resto de los

tratamientos. Para el caso de la estabilidad de agregados se observa en el tratamiento Y un aumento de la estabilidad reflejada en los pretratamientos de estallido y disgregación mecánica; en el primer caso se observaron diferencias significativas en comparación a los tratamientos que no tuvieron aplicación de esta enmienda inorgánica; en el segundo caso (DMPd) solo se observaron diferencias significativas con el T. La tendencia al aumento de la estabilidad de agregados por efecto del yeso se ve también reflejada en el DMPc.

Tabla 12: Valores ponderados del perfil completo para Dap (Mg m^{-3}), PT (%), P>300µm (%), P 300-50µm (%), P 50-12,5 (%), P< 12,5µm (%), PE (%), RC (kPa), DMPm (mm), DMPe (mm), DMPd (mm) y DMPc (mm), a los 20 meses post aplicación para cada tratamiento de enmiendas (T: testigo, Y: yeso, C+Y: cama pollo y yeso y C: cama pollo). Columnas sombreadas corresponden a las variables que mostraron diferencias significativas. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher $p<0.05$).

Propiedades ponderadas perfil completo

Tratamiento	Dap	PT	P >300 µm	P 300–50 µm	P 50-12,5 µm	P <12,5 µm	**PE**	RC	DMPm	**DMPe**	**DMPd**	DMPc
T	1,37	48,62	1,81	5,41	10,32	31,09	**5,94 a**	51,65	1,13	**0,37 bc**	**1,77 b**	1,26
Y	1,36	46,92	1,45	4,61	9,43	31,44	**2,16 b**	50,65	1,27	**0,39 a**	**1,98 a**	1,43
C + Y	1,33	48	1,82	5,07	9,97	31,14	**4,6 a**	47,16	1,29	**0,38 ab**	**1,95 ab**	1,53
C	1,34	47,94	2,22	5,52	10,27	29,92	**4,87 a**	49,56	1,22	**0,36 c**	**2,09 a**	1,22

b) En la Tabla 13 se visualiza el análisis de las propiedades físicas ponderadas para cada perfil teniendo en cuenta las estructuras superficiales del mismo. A diferencia de lo hallado empleando el criterio anterior, se observa que un mayor número de variables analizadas mostraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Tabla 13: valores ponderados de las estructuras superficiales del perfil para Dap (Mg m^{-3}), PT (%), P>300µm (%), P 300-50µm (%), P 50-12,5 (%), P< 12,5µm (%), PE (%), RC (kPa), DMPm (mm), DMPe (mm), DMPd (mm) y DMPc (mm), a los 20 meses post aplicación para cada tratamiento de enmiendas (T: testigo, Y: yeso, C+Y: cama pollo y yeso y C: cama pollo). Columnas sombreadas corresponden a las variables que

mostraron diferencias significativas. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher p<0.05).

Propiedades ponderadas estructuras superficiales del perfil

Tratamiento	**Dap**	PT	P >300 µm	**P 300–50 µm**	**P 50-12,5 µm**	**P <12,5 µm**	**PE**	**RC**	**DMPm**	**DMPe**	**DMPd**	**DMPc**
T	**1,31 a**	49,16	2,03	**6,06 b**	**11,21 b**	**29,82 a**	**6,69 ab**	**44,27 a**	**1,07 b**	**0,37 b**	**1,63 b**	**1,22 b**
Y	**1,28 ab**	49,12	1,93	**6,08 ab**	**11,59 ab**	**29,52 ab**	**2,82 b**	**40,75 ab**	**1,41 a**	**0,47 a**	**2,06 a**	**1,69 a**
C + Y	**1,24 ab**	50	2,63	**6,32 ab**	**11,82 ab**	**29,31 ab**	**5,09 b**	**39,04 b**	**1,31 ab**	**0,41 ab**	**1,96 ab**	**1,56 ab**
C	**1,23 b**	51,2	3,43	**8,44 a**	**13,94 a**	**25,33 b**	**7,39 a**	**38,65 b**	**1,22 b**	**0,42 a**	**1,96 ab**	**1,28 b**

Se destaca el efecto de la cama de pollo en los parámetros asociados a la porosidad de perfil. Esto se visualiza para el caso de Dap, macro (300–50 µm), meso y microporos donde se registraron diferencias significativas entre el tratamiento C (el cual presentó el menor valor de Dap y microporos y los mayores valores de macro y mesoporos) en comparación a T, no registrando diferencias significativas respecto de los tratamientos Y y C+Y. La PE también se vio afectada, en este caso, fue significativamente mayor para el tratamiento C en comparación a los tratamientos con Y (con y sin agregado de cama de pollo), no difiriendo del T.

En el caso de la RC se aprecia un efecto de la aplicación superficial de cama de pollo ya que los menores valores se registraron para los tratamientos con enmienda orgánica (con y sin Y), los cuales difirieron significativamente del T.

La estabilidad de agregados, determinada mediante los valores de DMPm, DMPe, DMPd y DMPc, mostró un efecto positivo significativo de la aplicación de yeso agrícola para todos los DMP, destacándose que el tratamiento Y se diferenció significativamente del T (el cual presentó los menores valores de estabilidad). La combinación de enmiendas presentó valores intermedios de estabilidad que no llegaron a diferenciarse de las aplicaciones de enmiendas por separado C y Y respectivamente.

3.3.4 Modificaciones en el carbono orgánico del suelo por el agregado de enmiendas

Numerosos trabajos locales han reportado incrementos en el COS debido al agregado de enmiendas orgánicas al suelo. Sasal et al. (2000) reportaron incrementos del orden de 0,24% en el COS por el agregado de residuos de origen bovino al cabo de 1 año en un ensayo de producción hortícola. Además, Andreau et al. (2012) también reportaron incrementos en el carbono total del suelo en producciones hortícolas ante el agregado de cama de pollo. De Battista y Arías (2016) encontraron aumentos del orden del 0,9 % en la MO de suelos Vertisoles al cabo de un del agregado de cama de pollo.

En el presente trabajo se observó, al cabo de 20 meses post aplicación de las enmiendas, un incremento significativo (0,42%) del COS (Tabla 14) para los tratamientos con agregado de C, los que difirieron significativamente del T, que a su vez no presentó diferencias significativas con la situación inicial. Dicho incremento significativo tuvo lugar en los primeros 5 cm de suelo, ya que en la capa subsuperficial entre 5-15 cm, no se observaron variaciones significativas.

Tabla 14: COS (%) para dos profundidades (0-5 y 5-15cm) de la condición inicial (antes de la aplicación de los tratamientos de enmiendas) y a los 20 meses post aplicación de los tratamientos (T: testigo, Y: yeso, C+Y: cama pollo y yeso y C: cama pollo). Letras distintas indican diferencias significativas para una misma profundidad (LSD Fisher $p<0.05$).

Tratamiento	Profundidad (cm)			
	0-5		5-15	
Cond Inicial	2,05	c	1,47	a
T	2,08	bc	1,38	a
Y	2,33	ab	1,47	a
C+Y	2,48	a	1,37	a
C	2,47	a	1,47	a

3.3.4 Estudio del escurrimiento de agua

El estudio de la dinámica de ingreso del agua mediante el modelo bilineal plateau resultó adecuado, debido a que permite subdividir dicho proceso en diferentes etapas hasta alcanzar el escurrimiento de equilibrio o base (EB). En el presente estudio, que se pretende evaluar cambios en el perfil superficial del suelo ocasionados por el agregado de enmiendas sin incorporación, cobra relevancia este estudio detallado y existen evidencias de trabajos en los que se describe y comparan las distintas etapas de la infiltración de agua en situaciones de manejo bajo SD (De la Vega et al. 2004; Potter et al. 1995).

Los resultados de los distintos parámetros de la curva de escurrimiento, obtenidos mediante simulaciones de lluvia, pueden observarse en la Tabla 15. En primer lugar cabe destacar que los CV obtenidos para la mayoría de los parámetros fueron muy elevados, solo para el EB del tratamiento C se logró obtener CV inferiores al 10%. Debido a esta alta variabilidad, propia de esta metodología de medición, el modelo estadístico (el cual se corrigió por heterocedasticidad de tratamiento) no arrojó diferencias significativas entre tratamientos para la mayoría de los parámetros.

Tabla 15: Parámetros de la curva de escurrimiento (valor medio y coeficiente de variación) a los 20 meses post aplicación de los tratamientos de enmiendas (T: testigo, Y: yeso, C + Y: cama pollo y yeso y C: cama pollo. La columna sombreada corresponde al único parámetro que mostró diferencias significativas (letras diferentes) LSD Fisher ($p<0.05$).

Tratamiento	Lluvia acum inic esc		Pendiente		Lluvia acum inic EB		EB	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
T	14,3	62,9	3,05 b	117,8	39,78	57,3	38,26	18,6
Y	17,64	49,4	1,22 a	39,5	50,39	26,1	38,45	29,4
C + Y	33,84	86,9	2,25 b	22,5	49,52	51,3	36,49	43,7
C	22,75	25,9	2,66 b	22,7	39,09	11,8	42,02	9,6

El único parámetro que se destaca es la pendiente de aumento en la tasa de escurrimiento. En este caso particular el tratamiento Y fue significativamente menor al resto (Figura 38). Este resultado es indicativo que el Y ejerce un efecto gradual en la entrada de agua a través del perfil debido a un aumento en la estabilidad estructural. Moore y Singer (1990), quienes estudiaron el ingreso de agua al suelo durante el proceso de formación de costras, establecieron un cierto grado de relación entre la etapa de incremento del escurrimiento (pendiente de la curva) y la estabilidad del suelo. A su vez Chagas et al. (1997), aplicando lluvia simulada sobre un Argiudol típico refinado bajo labranza convencional, encontraron que a mayor estabilidad estructural, mayor tiempo transcurría hasta alcanzarse el equilibrio, y por ende, se producía menor escurrimiento total. Lo anteriormente expresado se corrobora en el presente estudio, mediante una correlación significativa negativa ($p<0,06$) entre el parámetro pendiente y el ponderado superficial de DMPe y DMPc ($r=0,946$ y $r= 0,942$ respectivamente).

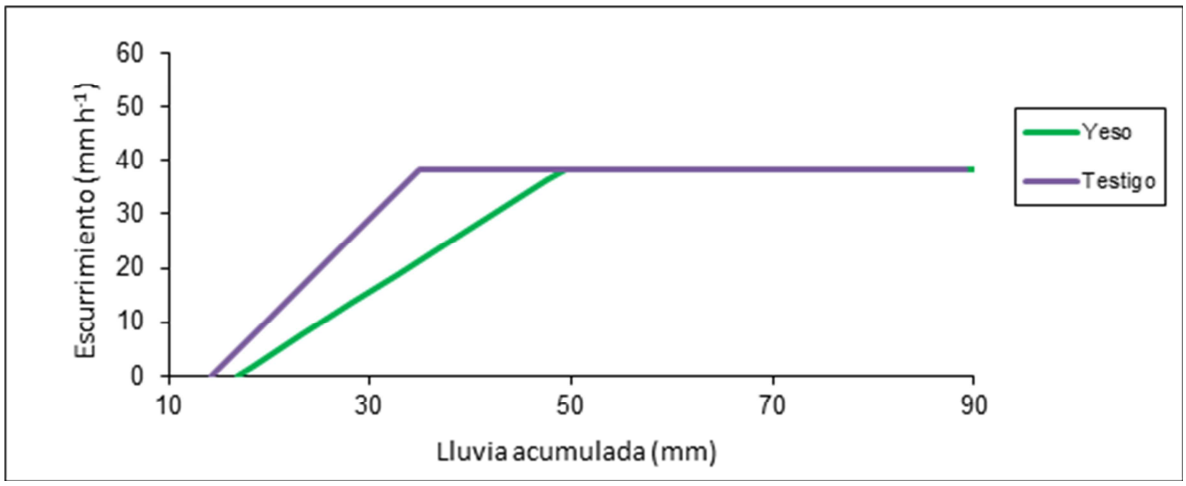

Figura 38: Representación gráfica del modelo bilineal plateau para los tratamientos Testigo (curva lila) y Yeso (curva verde).

La aplicación de los tratamiento de enmiendas no reflejó cambios significativos en la etapa final de la curva de escurrimiento (EB). Cabe mencionar que el promedio general para todos los tratamientos fue de 39 mm h^{-1}. En el capítulo II, para el ensayo de rotaciones de cultivos se obtuvieron valores inferiores de escurrimiento base (20 y 0,8 mm h^{-1} para Sj-Sj vs Mz- Tr/Sj, respectivamente), esto puede deberse a la historia agrícola previa a la instalación de los ensayos, ya que para la parcela SD del ensayo de labranza, el valor de escurrimiento base obtenido fue de 52 mm h^{-1}. Cislagui (2013) obtuvo valores de EB cercanos a 33 mm h^{-1} en un ensayo en el mismo tipo de suelo donde se estudiaban pérdidas de nutrientes por escurrimiento mediante simulaciones de lluvias; Castiglioni et al. (2006), en un Argiudol vértico bajo SD, obtuvieron valores cercanos a 50 mm h^{-1} para situaciones sin cobertura de rastrojos; en todos los casos se trabajó con intensidades de 60 mm h^{-1} de lluvia.

Si se considera la variable, tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación de lluvia hasta el comienzo de escurrimiento (Tabla 15), puede apreciarse un retraso no significativo en dicha variable en los tratamientos con cama de pollo. Esto podría deber-

se a una protección de la superficie por los restos de cama de pollo sumado al y el efecto de mullido superficial de este material. En tal sentido, Castiglioni et al. (2006), encontraron retardos en el inicio del escurrimiento dados por la cobertura del rastrojo en contraposición al suelo desnudo bajo SD.

Asimismo, el parámetro lluvia acumulada hasta el inicio del EB (Tabla 15) muestra una tendencia similar a la mencionada para el inicio del escurrimiento en los tratamientos con yeso (Y y C+Y), lo que estaría indicando posibles efectos del Y en las etapas más avanzadas del ingreso de agua al perfil, específicamente etapas cercanas a alcanzar el equilibrio de infiltración.

3.4 Conclusión

La evaluación de enmiendas de disponibilidad regional, como alternativas de manejo para la mejora de las condiciones estructurales del suelo, evidenciaron una interesante potencialidad en cuanto a su utilización como estrategia a corto plazo para remediar las condiciones estructurales desfavorables del Argiudol representativo de la zona agrícola de Entre Ríos afectado por el uso agrícola continuado.

Por un lado, la C evidenció un efecto a nivel superficial dado por el incremento en el COS en los primeros 5 cm de profundidad, además se produjo un aumento de la proporción de estructura Γ, en detrimento de la estructura P, debido principalmente al fomento de la actividad biológica del suelo. Dicha estructura Γ presentó mejoras en las condiciones físicas, medidas a través de la Dap, PT, PE y distribución de tamaños de poros (con un incremento de poros >300µm), que el resto de las estructuras, lo cual permite inferir sobre beneficios en lo referente al ingreso de agua al perfil. En relación a este último punto, mediante las simulaciones de lluvia, no se logró constatar efectos

significativos en los parámetros de la curva de escurrimiento, pero sí se observaron tendencias en cuanto al retraso del inicio del escurrimiento y al aumento del EB.

Por otro lado, los beneficios de la aplicación de yeso se vio reflejado en aumento de la EA (principalmente de la estructura Γ de los tratamientos con Y). En lo relacionado al ingreso de agua al perfil, se observó un efecto significativo en el parámetro de la pendiente del incremento del escurrimiento de la curva de escurrimiento (disminución de la pendiente). Además se registró una tendencia de reducción en los tratamientos con Y para el EB y retraso del tiempo hasta llegar al EB.

.

CAPÍTULO IV

Consideraciones finales

La presente tesis contribuyó a la evaluación de tecnologías mitigadoras de la degradación de los suelos agrícolas bajo SD y al estudio de la regeneración de la estructura de Argiudoles. Particularmente, se identificaron prácticas de manejo que permitieron regenerar la estructura, mejorar la infiltración y la estabilidad de agregados bajo SD favoreciendo un mayor ingreso de agua al perfil y disminuyendo las pérdidas por escurrimiento.

Por un lado, el Capítulo II permitió caracterizar la condición estructural que se produce como consecuencia de manejos contrastantes de mediano-largo plazo. En este sentido, las mediciones de escurrimientos efectuadas en el ensayo de labranzas proporcionaron evidencia sobre mayores tasas de escurrimiento en el planteo bajo SD con respecto a LV. El estado estructural de SD se caracterizó por la presencia de estructura P superficial entre 5 a 10 cm de espesor, mientras que en LV no se registró presencia de esta estructura, sino una importante capa superficial de Γ del orden de los 6 a 12 cm producto de las labores.

En el caso de la comparación entre las rotaciones de cultivos bajo SD, se evidenció mayores pérdidas de agua por escurrimiento en el planteo de monocultivo de soja, el cual se caracterizó por la presencia desde superficie de una estructura P continua de 10 a 12 cm de profundidad. Este tipo de estructura P estuvo presente también de manera continua en la rotación Mz – Tr/Sj, circunscripta por debajo de una estructura Γ superficial pero con menor espesor que en Sj - Sj e interrumpida por agentes de la fauna edáfica, lo que permitió una significativa mejora en la tasa de infiltración de agua.

Si bien el enfoque de este capítulo fue de caracterización, no se encontraron evidencias para rechazar la primera hipótesis de trabajo, la cual planteaba que “Diferentes sistemas de cultivo generan en el mediano plazo estados estructurales del suelo que condicionan la dinámica de ingreso del agua. La siembra directa en Argiudoles genera

estructura laminar superficial. El monocultivo de soja en SD degrada el estado estructural restringiendo el ingreso de agua al suelo, en comparación con rotación de cultivos". Los perfiles descriptos muestran una organización vertical de las estructuras en los planteos bajo SD, las tendencias observadas mostraron un importante desarrollo de P en el planteo del monocultivo bajo SD.

Por otro lado, en el Capítulo III se determinó el efecto a corto plazo del agregado de enmiendas de disponibilidad regional sobre la estructura del suelo y la infiltración, como una alternativa para la solución de otro problema de disposición final de residuos de producción avícola de Entre Ríos.

En este aspecto, se logró establecer una relación entre la aplicación de cama de pollo y la regeneración de la estructura dado por un aumento de la proporción de estructura Γ en detrimento de P junto con una reducción significativa del espesor de P, no encontrándose evidencias significativas que demuestren una reducción en la continuidad de P. El efecto del yeso se evidenció en la estabilidad de agregados, mostrando mejoras significativas de esta propiedad en los tratamientos con dicha enmienda inorgánica; en este sentido, la aplicación conjunta de las enmiendas tuvo un efecto complementario, ya que por un lado la C aumentó el porcentaje de Γ, y por otro lado, el Y generó una estructura más estable al accionar del agua, dado por su efecto sobre la estabilidad de agregados.

Aunque las mediciones de escurrimiento no determinaron evidencias significativas en la tasa de escurrimiento final, las determinaciones físicas complementarias de laboratorio evidenciaron cambios favorables en cuanto a mayor porosidad total, estructural y proporción de macroporos en la estructura Γ regenerada. De perdurar en el tiempo dichas mejoras, cabría esperar que en un futuro se vean reflejadas estas propiedades en la infiltración final de agua en el perfil.

Con lo anteriormente expuesto se puede concluir que existe evidencia para no rechazar la hipótesis de trabajo que enunciaba que “la enmienda orgánica denominada “cama de pollo” y la inorgánica yeso aplicadas en forma individual o conjunta al suelo en SD, contribuyen a la regeneración de la estructura y a la mejora en el movimiento del agua edáfica por su efecto sobre la estabilidad de agregados, la distribución de poros y la reducción en el espesor de la estructura laminar”.

Con la información generada se está en condiciones de proponer prácticas agrícolas sustentables bajo SD que optimicen la producción y minimicen los riesgos de impacto ambiental. Además, en esta tesis se ha logrado avanzar en el conocimiento de la evolución temporal de la estructura P, su dinámica y su regeneración en un tipo de estructura con propiedades que condicen un mejor estado estructural para el ingreso de agua.

Finalmente, con los avances que se han logrado en esta tesis, se abren nuevos temas a estudiar en profundidad, por un lado aspectos relacionados al estudio sobre la perdurabilidad de estos efectos físicos en el tiempo, además de la potencialidad de evaluar otros tipos de enmiendas orgánicas provenientes de producciones animales intensivas, en lo referente a sus efectos sobre la estructura de suelos limosos y arcillosos de la provincia de Entre Ríos.

Por otro lado, en lo relacionado a la protección ambiental, es necesario continuar con líneas de trabajo que aborden el tema de la pérdida de nutrientes, fármacos veterinarios y demás productos presentes en este tipo de enmiendas orgánicas de origen animal sin tratamiento, lo que condiciona sus potenciales aplicaciones como mejoradoras de la estructura del suelo ante el riesgo de posibles contaminaciones a los cursos de agua tanto superficial como subterránea.

BIBLIOGRAFÍA

AAPRESID, 2012. Evolución de la superficie en Siembra Directa en Argentina. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. [en línea] www.aapresid.org.ar

Abid, M. y Lal, R. 2008: Tillage and drainage impact on soil quality - I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. Soil Till. Res.,100: 89 – 98.

Abiven, S., Menasseri, S., Angers, D.A. y Leterme, P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. European Journal of Soil Science, 58: 239-247.

Agassi, M., Morin, J. y Shainberg, I. 1982. Laboratory studies of infiltration and runoff control in semiarid soils in Israel. Geoderma, 28: 345 - 356.

Aizen, M.A., Garibaldi, L.A. y Dondo, M. 2009 Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. Ecologia Austral, 19: 45 - 54.

Álvaro-Fuentes, J., Joaquín Morell, F., Plaza-Bonilla, D., Arrue, J. y Cantero-Martinez, C. 2012. Modelling tillage and nitrogen fertilization effects on soil organic carbon dynamics. Soil and Tillage Research, 120: 32–39.

Alakukku, L. 1998. Properties of compacted fine-textured soils as affected by crop rotation and reduced tillage. Soil Tillage Res., 47: 83 - 89.

Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Perelman, S. y Morras, H. J. M. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. Soil Research, 52(6): 533 - 542.

Álvarez, C. R., Taboada, M.A., Gutiérrez Boem, F.H., Bono, A., Fernández, P. L. y Prystupa, P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J., 73: 1242 - 1250.

Álvarez, R. y Steinbach, H.S. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crop yield in the Argentine Pampas. Soil Till. Res., 104: 1 - 15.

Álvarez, R., Lemcoff, J. H. y Merzari, A. H. 1995. Balance de nitrógeno en un suelo cultivado con soja. Ciencia del Suelo, 13: 38 - 40.

Amaral, A.S., Anghinoni, I., Hinrichs, R. y Bertol, I. 2004. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. Rev. Bras. Ciênc. Solo, 28(2): 359 – 367.

Andreau, R., Gelati, P., Provaza, M., Bennardi, D., Fernández, D. y Vázquez, M. 2012. Degradación física y química de dos suelos del cordón hortícola platense. Alternativas de tratamiento. Ciencia del Suelo, 30(2): 107 – 117.

Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M. y Le Bissonnais, Y. 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. Soil Science Society of America Journal, 71: 413 - 423.

Aoki, A. M. y R. Sereno. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. AGRISCIENTIA. Vol. XXIII (1): 23 - 31.

Arias, N. M. 2002. Fertilización orgánica de pasturas. En: Evaluación de Pasturas. Producción Animal. Información Técnica Nº 5. INTA Ediciones Regionales. EEA Concepción del Uruguay. pp. 81-86.

Aziz, I., Mahmood, T. y Islam, K. R. 2013. Effect of long-term no-till and conventional tillage practices on soil quality. Soil Till Res. 13: 28 - 35.

Ball, B. C., Munkholm, L. J. (Eds.). 2015. Visual Soil Evaluation: Realising Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact. CABI, Wallingford.

Ball, B. C., Batey, T. y Munkholm, L. J. 2007. Field assessment of soil structural quality: a development of Peerlkamp test. Soil Use and Management, 23: 329 - 337.

Ball, B. C. y Douglas, J. T. 2003. A simple procedure for assessing soil structural, rooting and surface conditions. Soil Use and Management, 19: 50 – 56.

Ball, B. C., Scott, A. y Parker, J. P. 1999. Field N_2O, CO_2 and CH_4 fluxes in relation to tillage compaction and soil quality in Scotland. In: Soil Tillage Research, 53: 29 - 39.

Ball, B. C., O'Sullivan, M. F. 1982. Soil strength and crop emergence in direct drilled and ploughed cereal seedbeds in seven field experiments. J. Soil Sci., 33: 609 - 622.

Barbagelata, P., Caviglia, O. y Paparotti, O. 2000. Evaluación de dos sistemas de labranzas con riego suplementario. I. Efectos sobre el crecimiento, rendimiento y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de trigo y la resistencia mecánica del suelo. XVIIº Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires.

Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T. y García, C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. Review. Geoderma, 147: 159 – 171.

Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management - a review. Soil Use and Management, 25: 335 – 345.

Becerra de Oliveira, L. 1968. Determinaçao da macroporosidade pela "mesa de tensao" en mostras do solo com estrutura indeformada. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 3: 197 -200.

Ben Moussa-Machraoui, S., Erroussi, F., Ben-Hammouda, M. y Nouira, S. 2010. Comparative effects of conventional and no tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. Soil Till. Res., 106: 247 – 253.

Bernigau I. C., Gange, J. M. y Gallinger, C. I. 2016. Eficiencia del tratamiento de cama de pollo mediante apilado en granjas comerciales. En Almada, N. S., Araujo, S. R., Arias, N. M., Bernigaud, I. C., Bueno, D. J., De Battista, J. J., Duarte, S. L, Federico, F. J., Ferrer, J. L., Gallinger, C. I., Gange, J. M., García, A. L., Genta, G., Procura, F., Pulido, D. G., Ré, A. E., Rodriguez, F. I., Soria, M. A. 2016. Cama de pollo en Entre Ríos: aportes para un mejor uso y manejo. 1ª Edición. Ediciones INTA. Pp 8 – 18.

Benitio, A. 2010. Carbon accumulation in soil. Ten year study of conservation tillage and crop rotation in a semi-arid areas of Castile-Leon, Spain Aurora Sombrero. Soil and Tillage Research, 107: 64 – 70.

Bessou C., Mary B., Léonard J., Roussel M., Gréhan E. y Gabrielle B. 2010. Modelling soil compaction impacts on nitrous oxide emissions in arable fields. Eur J Soil Sci, 61: 348 - 363.

Beste, A. 2003. Erweiterte Spatendiagnose: Weiterentwicklung einer. Feltmetode zur Bodenbeurteilung, PhD Thesis. Justus-Liebig-Uni-versita¨t, Giessen, Germany.

Boizard, H., Peigné, J. , Sasal, M. C., Guimaraes, F., Piron, D., Tomis, V., Vian, J. F., Cadoux, S., Ralisch R., Tavares Filho, J., Heddadj, D., De Battista J., Duparque, A. y Roger-Estrade J. 2017. Improvements of the “Profil Cultural” method to better assess soil structure under no till. Soil and Tillage Research, 173: 92 – 103.

Boizard, H., Yoon, S.W., Leonard, J., Lheureux, S., Cousin, I., Roger-Estrade, J. y Richard, G. 2013. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. Soil Till. Res., 127: 34 – 44.

Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Durr, C. y Boiffin, J. 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. Soil & Tillage Research, 64: 149 – 164.

Bolsa de Comercio de Rosario, 2014. Anuario estadístico 2014. [en línea]. http://www.bcr.com.ar/Publicaciones/Anuario.

Bosch, D. D. y West, L.T. 1998. Hydraulic conductivity variability for two sandy soils. Soil Science Society of America Journal, 62: 90 - 98.

Briggs, D. y Courtney, F. 1985. Agriculture and Environment - the Physical Geography of Temperate Agricultural Systems. Longman Scientific and Technical, Harlow.

Bryan, R. B. y De Ploey, J. 1983. Comparability of soil erosion measurements with different laboratory rainfall simulators. Catena Supplement, 4: 33 - 56.

Burke, W., Gabriels, D. y Bouma, J., eds. Soil Structure Assessment. Rotterdam, A.A Balkema, 1986. 92p.

Byers, E. y Stephens, B. D. 1983. Statistical and stochastic analysis of hydraulic conductivity and particle size in a fluvial sand. Soil Science Society of America Journal, 47: 1072 - 1080.

Carter, M. R. 1990. Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity in cultivated loamy sand to loam soils. Soil Tillage Res., 15: 257 - 268.

Castiglioni, M. G., Chagas, C. I., Massobrio, M. J., Santanatoglia, O. J. y Buján, A. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. Ciencia del Suelo, 24: 169 - 176.

Cazorla, C. 2005. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en suelos bajo siembra directa en ensayos de labranza de larga duración en Marcos Juárez. Seminario internacional Indicadores de Calidad de suelo. Marcos Juárez.

Celik, I., Barut, Z. B., Ortas, I., Gok, M., Demirbas, A., Tulun, Y. y Akpinar, C. 2011. Impacts of different tillage practices on some soil microbiological properties and crop yield under semi-arid Mediterranean conditions. International Journal of Plant Production. 5: 237 - 254.

Cerana, J., Wilson, M.G., De Battista, J. J., Noir, J. y Quintero, C. 2006. Estabilidad estructural de los Vertisoles en un sistema arrocero regado con agua subterránea. Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA 35(1): 87 - 106.

Chagas, C. I., Irurtia, C., Thisted, J., Santanatoglia, O. J., Masssobrio, M. J., Castiglioni, M. G. y Buján, A. 2004. Movimiento horizontal y vertical de agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa. Ciencia del Suelo 22(2): 117 - 122.

Chagas, C. I., Marelli, H. J., Gróttola, M. C. y Rienzi, E. A. 1997. Influencia del uso de la tierra sobre la erosión entre surcos en un Argiudol típico de Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía UBA 17(3): 333 - 340.

Chen, L. y Dick, W. A. 2011. Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines. Ohio State University Extension. En: http://ohioline.osu.edu/b945/b945.pdf

Chenu, C., Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 1479 - 1486.

Chenu, C. 1993. Clay or sand polysaccharide associations as models for the interface between microorganisms and soil: water related properties and microstructure. Geoderma 56: 143 - 156.

Cislaghi, A. 2013. Pérdida de Glifosato en aguas de escurrimiento y su relación con la fertilización fosforada. Trabajo Final de Graduación. Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Entre Ríos.

Clapp, C. E., Stark, S. A., Clay, D. E. y Larson, W. E. 1986. Sewage sludge organic matter and soil properties. In: Chen, Y., Avnimelech, Y. (Eds.). The Role of Organic Matter in Modern Agriculture, MartinusNijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 88–97.

Cosentino, D., Chenu, C. y Le Bissonnais, Y. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. Soil Biology and Biochemistry 38: 2053 - 2062.

Coughlan, K. J., McGarry, D., Loch, R. J., Bridge, B. J. y Smith, G. D., 1991. The measurement of soil structure-some practical initiatives. Aust. J. Soil Res., 29: 869 -889.

Coulomb, I., Caneill, J. y Manichon, H. 1993. Comportement du sol au labour: méthoded'analyseetévaluation des consequences de l'état structural initial du sol surl'étattransformé par le labour. Agronomie 13: 45 – 56.

De Battista, J. J. y Arias, N. M. 2016. Utilización de la cama de pollo como fertilizante en cultivos anuales, en suelos Vertisoles de Entre Ríos. 2016. En Almada, N. S., Araujo, S. R., Arias, N. M., Bernigaud, I. C., Bueno, D. J., De Battista, J. J., Duarte, S. L, Federico, F. J., Ferrer, J. L., Gallinger, C. I., Gange, J. M., García, A. L., Genta, G., Procura, F., Pulido, D. G., Ré, A. E., Rodriguez, F. I. y Soria, M. A. 2016. Cama de pollo en Entre Ríos: aportes para un mejor uso y manejo. 1ª Edición. Ediciones INTA. 85 pp.

De Battista, J. J., Andriulo, A., Ferrari, M. y Pecorari, C. 1994. Evaluation of the soils structural condition under various tillage systems in the Pampa Humeda (Argentina). In: Proceedings of the 13th ISTRO Conference, Alborg, Denmark, pp. 99 – 103.

De la Vega, G., Castiglioni, M. G., Massobrio, M. J., Chagas, C. I., Santanatoglia, O. J. y Irurtia, C. 2004. Efectos de la cobertura y la humedad inicial en la infiltración de un Argiudol Vértico bajo siembra directa. Ciencia del Suelo 22: 25 - 27.

Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A. y Li, H. W. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. Int. J. Agric. and Biol. Eng. Vol. 3. Nº 1.

Dexter, A. R. 1988. Advances in characterization of soil structure. Soil Till. Res. 11: 199 - 238.

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. 2017. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL http://www.infostat.com.ar

Di Rienzo, J. 2011. Modelos lineales mixtos: aplicaciones en InfoStat / Julio Alejandro Di Rienzo Raúl Edgardo Macchiavelli., Fernando Casanoves - 1a. ed. - Córdoba : Grupo Infostat, 2011. 193 p.

Ding, X., Zhang, B., Zhang, X., Yang, X. y Zhang, X. 2011. Effects of tillage and crop rotation on soil microbial residues in a rainfed agroecosystem of northeast China. Soil & Tillage Research 114: 43 – 49.

Dirección de Minería 2010. Ministerio de la Producción Gobierno de Entre Ríos. Informe Minería 2010. [en línea]. http://www.entrerios.gov.ar/minpro/index.php

Domzal, H., Glinski, J. y Lipiec, J. 1991. Soil compaction research in Poland. Soil Till. Res. 19:99 - 109.

Dontsova, K. M., Darrell Norton, L., Johnston, C. T. y Bigham, J. M. 2004. Influence of exchnageable cations on water adsorption by soil clays. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 1218 -1227.

Dontsova, K. M. 1998. Soil structure and infiltration as affected by exchangeable Ca and Mg, and soil amendment. MS thesis. West Lafayette, Ind.: Purdue University, Department of Agronomy.

Doran, J. W. y Parkin, T. B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: JW Doran, DC Coleman, DF Bezdicek, and BA Stewart (eds.), Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Spec. Pub. No. 35, Soil Sci. Soc. Am., Am. Soc. Argon., Madison, WI. p. 3 - 21.

Draghi, L. y Hilbert, J. 2006. El tráfico agrícola y la respuesta del suelo. In: De Simona, M., Draghi, L., Hilbert, J., Jorajuria Collazo, D. (Eds.), El tractor agrícola. Ediciones INTA, Argentina. 256 pp.

Drees, L. R., Karathanasis, A. D., Wilding, L. P. y Blevins, R. L. 1994. Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 508 - 517.

Drewry, J. J. 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral. Agriculture Ecosystem and Environment. 114: 159 - 169.

European Conservation Agriculture Federation. 1999. Agricultura de conservación en Europa: aspectos medioambientales, económicos y administrativos de la UE. Bruselas, Bélgica.

Farina, M. P. W., Channon, P. y Thibaud, G.R. 2000. A comparation of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Long-term growth effects. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 646 - 651.

Fernández, P. L., Alvarez, C. R. y Taboada, M. A. 2015. Topsoil compaction and recovery in integrated no-tilled crop-livestock systems of Argentina. Soil Tillage Res. 153: 86 – 94.

Ferraris, G. N. 2004. Descompactación de suelos bajo siembra directa. Revista de tecnología agropecuaria-INTA PERGAMINO, Enero-abril: pp 46 - 48.

Fisher, M. 2011. Amending soils with gypsum. Crops & Soils Magazine, November - December 2011. https://www.agronomy.org/files/publications/crops-and-soils/amending-soil-with-gypsum.pdf

Flanagan, D. C., Norton, L. D. y Shainberg, I. 1997a. Effect of water chemistry and soil amendments on a silt loam soil: part 1: infiltration and runoff. Trans. ASAE 40: 1549 – 1554.

Flanagan, D. C., Norton, L. D. y Shainberg, I., 1997b. Effect of water chemistry and soil amendments on a silt loam soil: part 2: infiltration and runoff. Trans. ASAE 40: 555 – 1561.

Fowler, R. 2006. Future of soil science. In The Future of soil Science. IUSS International Union of Soil Sciences. ISBN 90-71556-16-6. Pp 43 - 44.

Gabioud, E. A., Wilson, M. G. y Sasal, M. C. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. Ciencia del Suelo 29(2) 129 - 139.

Gabioud, E. A. 2009. Evaluación de una nueva metodología de estabilidad de agregados para diferenciar usos de suelos. Trabajo Final de Graduación. Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Entre Ríos.

Gange, J. M. 2016. Aproximación al valor potencial de la cama de pollo como fertilizante en el centro este de Entre Ríos. En Almada, N. S., Araujo, S. R., Arias, N. M., Bernigaud, I. C., Bueno, D. J., De Battista, J. J., Duarte, S. L, Federico, F. J., Ferrer, J. L., Gallinger, C. I., Gange, J. M., García, A. L., Genta, G., Procura, F., Pulido, D. G., Ré, A. E., Rodriguez, F. I. y Soria, M. A. 2016. Cama de pollo en Entre Ríos: aportes para un mejor uso y manejo. 1ª Edición. Ediciones INTA. 85 pp.

Gange, J. 2014. Resultados analíticos de cama de pollo con diferentes condiciones y manejos del Departamento Uruguay y Colón. 2014. Profam Uruguay. INTA AER Uruguay.

Gautronneau, Y. y Manichon, H., 1987. Guide méthodique du profil cultural. CEREF/ISARA, Lyon, France.

Gerster, G. y Bacigaluppo, S. 2004. Consecuencias de la densificación por tránsito en Argiudoles del Sur de Santa Fe. En: Actas del XIX Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo. Paraná. Ed. digital. 9 p.

Gibbs, R. J. y Reid, J. B. 1988. A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. Adv. Soil Sci., 8: 123 - 149.

Gliriski, J. y Lipiec, J. 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press, Boca Raton, FL, 250 pp.

Greene R. S. B. y Wilson, I. B. 1989. Amelioration on some physical properties and nutrient availability of an exposed B horizon of red-brown earth. Soil Use and Management. **5** (2). p.66.

Greene, R. S. B. y Wilson, I. B. 1984. Some physical-chemical properties of an exposed B horizon of a red-brown earth treated with gypsum. Aust. J. S. Res. 22:357 - 63 .

Gregorich, E. G. y Carter, M. R. (Eds.), 1997. Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science 25, Elsevier, Amsterdam.

Guerif, J. 1994. Effects of compaction on soil strength parameters. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), Soil Compaction in Crop Production. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 19 – 214.

Guimaraes, R. M .L., Ball, B. C. y Tormena, C. A. 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure. Soil Use and Management 27: 395 – 403.

Hakansson, I. 1994. Subsoil compaction caused by heavy vehicles – a long term threat to soil productivity. Soil and Tillage Research, 29: 105–110.

Hasinger, G., Nievergelt, J., Petrasek, M. y Weisskopf, P. 2004. Observer et evaluer la structure du sol. Cahiers de la FAL 50, FAL, Switzerland.

Hénin, S., Monnier, G. y Combeau, A. 1958. Méthode pour l´étude de la stabilité structurale des sols. Ann. Agron. 9: 73-92.

Hill, R. L., Horton, R., y Cruse, R. M. 1985. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two mollisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1264 - 1270.

Hillel, D. 1980. Applications of soil Physics. Academic Press. US.p.425

Hussein, J. y Adey, M. A. 1998. Changes in microstructure, voids and b-fabric of surface samples of a Vertisol caused by wet/dry cycles. Geoderma 85: 63 – 82.

Imbellone, P., Giménez, J. y Panigatti, J. L. 2010. Suelos de la Región Pampeana. Procesos de formación . Buenos Aires: Ediciones INTA, 320 p.

Imhoff, S., Silva, A. P., Dias Junior, M. S. y Tormena, C. A. 2001. Quantificação das pressões crítica para o crescimento das plantas. R. Bras. Ci. Solo, 25:11 - 18.

IRAM-SAGyP 29571-2. 2011. Determinación de materia orgánica en suelos- Parte 1 – Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla oxidante fuerte, escala semimicro. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

Irurtia, C. B. y Mon, R. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Instituto de Suelos, CIRN INTA Castelar. Publicación Técnica 176.18 pp.

Islam, K. R. y Weil, R. R. 2000. Land use effects on soil quality in a tropic forest ecosystem of Bangladesh. Agric. Ecosyst. Environ., 79: 9 - 16.

Jalali, M. y Ranjbar, F. 2009. Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils. Geoderma, 153: 194 - 204.

Jina, H., Hongwena, L., Rasaily, R. G., Qingjiea, W., Guohuaa, C., Yanboa, S., Xiaodonga, Q. y Lijinc, L. 2011. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat–maize cropping system in North China Plain. Soil and Tillage Research, 113: 48 – 54.

Kahnt, G., Hijazi, L. A., y Rao, M. 1986. Effect of homogeneous soil compaction on shoot and root growth of field bean soybean. Zeitschriff fur acker und Pflanzenbau 157:105 -113.

Kay, B. D. y Angers, D. A. 2001. Soil Structure. In: Sumner, M.E., ed. Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, Florida, FL, USA. p. 229 - 276.

Kay, B. D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. In: B. A. Stewart (de.), Advances in Soil Science, Vol 12. Springer Verlag Inc., New York, USA. pp. 1 - 52.

Kazman, Z., Shainberg, I. y Gal, M. 1983. Effect of low level of exchangeable Na (and phosphogypsum) on the infiltration rate of various soils. Soil Sci. 135:184 – 192.

Keren, R., y Shainberg, I. 1981. Effect of dissolution rate on the efficiency of industrial and mined gypsum in improving infiltration of a sodic soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 103 –107.

Khaleel, R., Reddy, K. R. y Overcash, M. R. 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. J. Environ. Qual. 10: 133 - 141.

Khalid, A. A., Tuffour, H. O. y Bonsu, M. 2014. Influence of poultry manure and NPK fertilizer on hydraulic properties of a sandy soil in Ghana. International Journal of Scientific Research in Agricultural Sciences, 1(2), pp. 16 - 22.

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. pp 635- 660. En Klute, A. (ed). Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy 9, ASA, ASA, Inc., Publisher, 1188p., Madison, Wisconsin, USA.

Krebs, R., Gupta, S. K., Furrer, G. y Schulin, R. 1998. Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludge-amended soils. J. Environ. Qual., 27: 18 - 23.

Lal, R. y Shukla, M. K. 2004. Principles of Soil Physics. New York, NY: Marcel Dekker. 716 pp.

Langmaack, M., Schrader, S., Rapp-Bernhardt, U. y Kotzke, K. 1999. Quantitative analysis of earthworm burrow systems with respect to biological soil structure regeneration after soil compaction. Biology and Fertility of Soils 28 (3): 219–229.

Lawrence, G.R. 1977. Measurements of pore sizes in fine-textures soils: A review of existing techniques. J Soil Esc 28: 527 - 540.

Lawrie, J., Murphy, B., Packer, I. J. y Harte, A. J. 2000. Soils and sustainable farming systems. In: Soils – their properties and management (eds P.E.V. Charman y B.W. Murphy), pp. 133–149. Oxford University Press, Melbourne.

Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. European J. Soil Sci. 47: 425 - 437.

Leão, T. P., Silva, A. P., Macedo, M. C. M., Imhoff, S. y Euclides, V. P. B. 2006. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. Soil and Tillage Research 88: 279 -285.

Lemmermann, O. y Behrens, W. U. 1935. On the influence of manuring on the permeability of soils. Z. Pflanzenernahr. Dung. Bodenkd. 37: 174 – 192.

Lipiec, J. y Simota, C. 1994. Role of soil and climate factors influencing crop responses to compaction in Central and Eastern Europe. In: B.D. Soane and C. van Ouwerkerk (Editors), Soil Compaction in Crop Production. Elsevier, Amsterdam, pp. 365-390.

Logan, T. J., Lal, R. y Dick, W. A. 1991. Tillage systems and soil properties in North America. Soil Till. Res. 20, 241–270.

Logsdon, S. D. y Jaynes, D. B. 1993. Methodology for determing hydraulic conductivity with tension infiltrometers. Soil Science Society of America Journal, 57: 1426 - 1431.

Low A. J. 1954. The study of soil structure in the field and in the laboratory. J soil Sci 5: 57 – 74.

Lozano, L. 2014. Desarrollo de estructura laminar del suelo en siembra directa. Factores predisponentes y efectos sobre las propiedades hidráulicas. Tesis Doctoral en Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP.

Lozano, L. A., Soracco, C. G., Cornelis, W. M., Gabriels, D., Sarli, G. O. y Villarreal, R. 2013. Anisotropy of Pore Size Classes' Connectivity Related to Soil Structure Under No Tillage. Soil Science. 178(11): 612 - 617.

Madejón, E., Murillo, J. M., Moreno, F., López, M. V., Arrue, J. L., Álvaro-Fuentes, J. y Cantero, C. 2009. Effect of long-term conservation tillage on soil biochemical properties in Mediterranean Spanish areas. Soil and Tillage Research, 105: 55 – 62.

Malone, R. W., Logsdon, S., Shipitalo, M.J., Weatherington-Rice, J., Ahuja, L. y Ma, L. 2003. Tillage Effect On Macroporosity And Herbicide Transport In Percolate. Geoderma 116: 191 - 215.

Mandal, M., Chandran, R. S., y Sencindiver, J. C. 2013. Amending Subsoil with Composted Poultry Litter-I: Effects on Soil Physical and Chemical Properties. Agronomy, 3: 657 - 669.

Manichon, H. 1987. Observation morphologique de l'état structural etmise en evidence d'effets de compactage des horizons travaillés. In G. Monnier and M.J. Goss (Editors). Soil Compaction and Regeneration, Balkena, Rotterdam, pp. 39 - 52.

Manichon, H. 1982. Influence of cropping systems on the cultivation profile: development of a diagnostic method based on morphological observation . PhD thesis, INRA, Paris.

Marano, R., Imhoff, S. y Micheloud, H. 2006. Relación lluvia-infiltración en Argiudoles del centro-este santafesino. XX Congreso Argentino Ciencia del Suelo. Salta, 19 al 22 setiembre.

Marelli, H. J., Arce, J. M. y Masiero, B. 1986. “Simulador de lluvias para investigación básica en conservación de suelos”. Publicación Técnica Nº 8 Serie Suelos y Climatología. EEA INTA Marcos Juárez. 15 pp.

Martens, D. A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. Soil Biol. Biochem. 32 : 361 – 369.

Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G. y Swift, M. J. 1997. Agriculture intensification and ecosystem properties. Science 277: 504 - 509.

McKenzie, D. C. 2001. Rapid assessment of soil compaction dam-age. I. The SOILpak score, a semi-quantitative measure of soil structural form. Australian Journal of Soil Research, 39: 117 – 125.

Miller, W. P. 1987. Infiltration and soil loss of three gypsum amended Ultisols under simulated rainfall. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 783 – 787.

MINAGRI. 2015. Boletin avícola. Anuario 2014. Disponible en: http://www.minagri.gob.ar/site/ganaderia/aves/02-informes/_archivos/000002-Anuarios/150400_Anuario%202014%20(Abril%202015).pdf. Consulta: febrero 2016

Monnier, G., Stengel, P. y Fies, J. C. 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux: application a l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron., 24: 533 - 545.

Moore, D. C. y Singer, M. J. 1990. Crust formation effects on soil erosion processes. Soil Sci. Soc. Am. J. 54: 1117 - 1123.

Moreno, J. L., Jindo, K., Hernández, T. y García, C. 2007. Total and immobilized enzymatic activity of organic materials before and after composting. Compost Sci. Util. 15: 93 - 100.

Moret, D. y Arrúe, J. L. 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. Soil Till. Res. 96: 103 - 113.

Morrás, H. J. M., Tonel, B. y Michelena, R. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. En Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.

Munkholm, L. J., Heck, R .J. y Deen, B. 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. Soil & Tillage Research, 127: 85 – 91.

Munkholm, L. J. 2000.The spade analysis – a modification of the qualitative spade diagnosis for scientific use. DIAS Report no. 28. Plant production, Danish Institute of Agricultural Sciences, Tjele, Denmark.

Naudin, K., Goze, E., Balarabe, O., Giller, K. E. y Scope, E. 2010. Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: a multilocational on-farm assessment. Soil and Tillage Research 108: 68 – 76.

Neves, C. S. V. J., Feller, C., Guimarães, M. F., Medina, C. C., Tavares Filho, J. y Fortier, M. 2003. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey Oxisols in Brazil. Soil Tillage Res., 71: 109 - 119.

Norton, L. D. 2008. Gypsum soil amendment as a management practice in conservation tillage to improve water quality. Journal of Soil and Water Conservation, 63 (2), 46 - 48.

Norton, L. D. y Rhoton, F. 2007. FGD gypsum influences on soil surface sealing, crusting, infiltration and runoff. Presented at the workshop on Agricultural and Industrial

Uses of FGD Gypsum. October 2007, Atlanta, Ga. htt p://library.acaa-usa.org/5-FGD_Gypsum_Influences_on_Soil_Surface_Sealing_Crusting_Infiltration_and_Runoff.pdf.

Norton, L. D. y Dontsova, K .M. 1998. Use of soil amendments to prevent soil surface sealing and control erosion. Adv. Geoecol. 31: 581 – 587.

Norton, L. D. 1995. Mineralogy of high calcium/sulfur-containing coal combustion by-products and their effects on soil surface sealing. In: Karlen, D.L. (Ed.), Agriculture Utilization of Urban and Industrial By-Products. ASA Spec. Publ. 58. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 87 – 106.

Novelli, L. E., Caviglia, O. P., Wilson, M. G. y Sasal, M. C. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. Geoderma 195-196: 260 - 267.

Novelli, L. E., Caviglia, O. P. y Melchiori, R. J. M. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. Geoderma 167-168, 254-260.

Novelli, L., Caviglia, O., Wilson, M.G. y Sasal, M. C. 2010. Impacto de la frecuencia de soja sobre la agregación y el almacenaje de C en Molisoles y Vertisoles de Entre Ríos. En: Anales del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Argentina. Trabajo en CD.

NSRI. 2001.A guide to better soil structure. National Soil Resources Institute, Cranfield University, Silsoe, UK.

Oades, J. M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. Geoderma, 56: 377 400.

Orellana, de J. y Pilatti M. 1990. Aplicación de enmiendas cálcicas en un horizonte B2t. C. del Suelo 8 (2):127-139

Orellana, de J. y Pilatti, M. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. Ciencia del Suelo 12: 75 - 80.

Pagliai, M., Vignozzi, N. y Pellegrini, S. 2004. Soil structure and the effect of management practices. Soil Tillage Res. 79: 131 - 143.

Pagliai, M., Marsili, A., Pieranna, S., Vignozzi, N. y Pellegrini, S. 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. Soil Till Res, 73: 119 – 129.

Pagliai, M., La Marca, M. y Lucamante, G. 1983. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage. J. Soil Sci. 34: 391 - 403.

Pecorari, C. 1988. Inestabilidad estructural de los suelos de la pampa ondulada. EEA-INTA Pergamino. Informe Técnico Nº 216. 16 p.

Piccolo, A. y Mbagwu, J. S. C. 1990. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances. Plant and Soil 123: 27 - 37.

Pierce F. J., Fortin M. C. y Staton M. J. 1994. Periodic Plowing Effects on Soil Properties in a No-Till Farming System. Soil Sci. Soc.Am. J. 58: 1782 - 1787.

Plan Mapa de Suelos, 1998. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos, Serie Relevamiento de Recursos Naturales Nº 17, 114 pp.

Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Entre Ríos. 1984. Suelos y erosión de la Provincia de Entre Ríos. Tomos I y II. INTA-Estación Experimental Agropecuaria Paraná. Convenio INTA-Gobierno de Entre Ríos. Serie Relevamiento de Recursos Naturales Nº 1 (3 edición). 192 p.

Potter, K. N., Torbert, H. A. y Morrison, J. E. 1995. Tillage and residue effects on infiltration and sediment losses on vertisols. Trans. ASAE 38: 1413 - 1419.

Radcliffe, D. E., Clark, R. L. y Sumner, M. E. 1986. Effect of gypsum and deep-rooting perennials on subsoil mechanical impedance. Soil Science Society America Journal, 50: 1566 - 1570.

Rajarama, G. y Erbachb, D. C. 1999. Effect of wetting and drying on soil physical properties. Journal of Terramechanics. 36: 39 - 49.

Rauber, L.P., Piccolla, C., Andrade, A. P., Friederichs, A., Mafra, Á. L., Corulli Corrêa J. y Albuquerque J. A. 2012. Physical properties and organic carbon content of a RhodicKandiudox fertilized with pig slurry and poultry litter. Rev. Bras. Ciênc. Solo. 36: 1323 - 1332.

Ré, A. E. Y Ferrer, J. L. 2016. Utilización de cama de pollo como fertilizante de pasturas y verdeos en Vertisoles de Entre Ríos. En Almada, N. S., Araujo, S. R., Arias, N. M., Bernigaud, I. C., Bueno, D. J., De Battista, J. J., Duarte, S. L, Federico, F. J., Ferrer, J. L., Gallinger, C. I., Gange, J. M., García, A. L., Genta, G., Procura, F., Pulido, D. G., Ré, A. E., Rodriguez, F. I. y Soria, M. A. 2016. Cama de pollo en Entre Ríos: aportes para un mejor uso y manejo. 1ª Edición. Ediciones INTA. 85 pp.

Reichert J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn R., y Håkansson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in sub-tropical highly weathered soils. Soil Till. Res., 102: 242 - 254.

Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J. y Guérif, J. 1999. Field study of soil compaction due to traffic: porespace and morphological analysis. Soil Till. Res. 51: 151 -160.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M. y Folke, C. 2009. A safe operating space for humanity. Nature 461 (7263): 472 – 475.

Roger-Estrade, J., Richard, G., Dexter, A. R., Boizard, H. y De Tourdonnet, S. 2009. Integration of soil structure variations with time and space into models for crop management. A review. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA29 (1):135 - 142.

Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., Boizard, H., Coquet, Y., Defossez, P. y Manichon, H. 2004. Morphological characterisation of soil structure in tillefields: from a diagnosis method to the modeling of structural changes over time. Soil & Tillage Research 79 : 33 -49.

Röhrig, R., Langmaack, M., Schrader, S. y Larink, O. 1998. Tillage systems and soil compaction their impact on abundance and vertical distribution of Enchytraeidae. Soil & Tillage Research 46 : 117 - 127.

Roldán, A., Caravaca, F., Hernández, M. T., García, C., Sánchez-Brito, Velásquez, C. y Tiscareño, M. 2003. No-Tillage, Crop Residue Additions, and Legume Cover Cropping Effects on Soil Quality Characteristics Under Maize in Patzcuaro Watershed (Mexico). Soil and Tillage Research. 1786: 1 - 9.

Sasal, M. C., Boizard, H., Andriulo, A., Wilson, M. y Léonard, J. 2017 a. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. Soil & Tillage Research: 173: 33 - 41.

Sasal, M. C., Léonard J., Andriulo, A. y Boizard, H. 2017 b. A contribution to understanding the origin of platy structure in silty soils under no tillage. Soil and Tillage Research: 173: 42 - 48.

Sasal M. C. 2012. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Tesis Doctoral. Escuela para Graduados Alberto soriano, Facultad Agronomía UBA. 126p.

Sasal, M. C., Andriulo, A. E., Taboada, M. A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. Soil Till. Res. 87: 9-18.

Sasal, M. C., Andriulo, A. E., 2003. Comparación de dos métodos para determinar la distribución de la porosidad edáfica en dos sistemas de labranza. Ciencia del Suelo 21 (2): 74 - 77.

Sasal, M. C., Andriulo, A. E., Ullé, J., Abrego, F. y Bueno, M. 2000. Efecto de diferentes enmiendas sobre algunas propiedades edáficas, en sistemas de producción hortícola del centro norte de la región pampeana. Ciencia del Suelo 18: 95 - 104.

Scholefield, D., Patto, P. M. y Hall, D. M. 1985. Laboratory research on the compressibility of four topsoils from grassland. Soil and Tillage Research 6: 1 – 16.

Senigagliesi, C. y Ferrari, M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. International Crop Science I. pp. 27 - 35. In: DR Buxton, R Shibles, RA Forsberg, BL Blad, KH Asay, GM Paulsen & RF Wilson (eds). Crop Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.

Shainberg, I., Sumner, M. E., Miller, W. P., Farina, M. P. W., Pavan, M. A. y Fey M. V. 1989. Use of gypsum on soils: A review. Adv. Soil Sci. 9: 1 - 111.

Shepherd, T. G. 2009. Visual soil assessment, 2nd ed. Field Guide for Pastoral Grazing and Cropping on Flat to Rolling Country, Volume 1. Horizons Regional Council, Palmerston North, pp. 119.

Sillon, J. F., Richard, G. y Cousin, I. 2003. Tillage and traffic effects on soil hydraulic properties and evaporation. Geoderma. 116: 29 - 46.

Singh, R. P. y Agrawal, M. M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge.Waste Management, Amsterdam, v.28, n.2, p.347 - 358

Soane, B. y van Ouwerkerk, C. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. In: Soil Tillage Research 35: 5 - 22.

Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. United States Departament of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 346 pp.

Stengel, P. 1988. Análisis de la Porosidad en horizontes de un suelo Brunizem en distintas condiciones de manejo y su relación con el crecimiento de las raíces del Maíz. Informe Técnico Nº 211. INTA Pergamino.

Stevenson, F. J. 1982. Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions. John Wiley and Sons. New York. 443 p.

Sumner, M. E. y Miller, W. P. 1992. Soil crusting in relation to global soil degradation. American Journal of Alternative Agriculture 7(1 and 2): 56 - 62.

Taboada, M. A., Barbosa, O. A. y Cosentino, D. J. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loamy soils. Soil Sci. 173: 130 - 142.

Taboada, M. A., Barbosa, O. A., Rodríguez, M. B. y Cosentino, D. J. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. Geoderma 123: 233 - 244.

Taboada, M. A., Micucci, F. G., Consentino D. J. y Lavado, R. S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. Soil Till. Res. 49: 57 - 63.

Tardieu, F. 1988. Analysis of the spatial variability of maize root density. I. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. Plant Soil 107: 259 - 266.

Tasi, H. A. A. 2009. Aplicación de las Cartas de Suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar Índices de Productividad Específicos para los principales Cultivos Agrícolas. Tesis Doctoral. Universidad de Coruña. España.

Tejada, M., Gómez, I., Hernández, T. y García, C. 2010. Utilization of Vermicomposts in Soil Restoration: Effects on Soil Biological Properties All rights reserved. Soil Sci. Soc. Am. J. 74: 525 - 532.

Terminiello, A., Balbuena, R., Ariata, M., Hilbert, J., Claverie, J. y Jorajuría, D. 2007. Descompactación del suelo y tráfico de siembra. Efectos sobre el rendimiento de soja (Glycine max L merr). In: congreso argentino de ingeniería rural. 9. Congreso del Mercosur. 1. 2007 09 19-22, 19 al 22 de septiembre de 2007. Córdoba. Argentina.

Tester, C. G. 1990. Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. Soil Sci. Soc. Amer. J. 54: 827 - 831.

Thomas, G. A., Titmarsh, G. W., Freebairn, D. M. y Radford, B. J. 2007. No-tillage and conservation farming practices in grain growing areas of Queensland - a review of 40 years of development. Australian Journal of Experimental Agriculture 47: 887 - 898.

Thomas, G. W., Haszler, G. R. y Blevins, R. L. 1996. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the Proctor test. Soil Science, Baltimore, v. 161: 502 - 508.

Tirado-Corbalá, R., Slater, B. K., Dick, W. A., Bigham, J., y McCoy, E. 2013. Hydrologic properties and leachate nutrient responses of soil columns collected from gypsum-treated fields. Soil Till. Res. 134: 232 - 240.

Tisdall J. M. y Oades J. M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. Soil Sci. 33: 141 - 163.

Topp, G. C., Wires, K. C., Angers, D. A., Carter, M. R., Culley, J. L. B., Holmstrom, D. A., Kay, B. D., Lafond, G. P., Langille, D. R., Mcbride, R. A., Patterson, G. T., Perfect, E., Rasiah, V., Rodd, A. V. y Webb K. T. 2002. Changes in Soil Structure. 19 de Noviembre. http://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/health/chapter06.html

Tormena, C. A., Silva, A. P., Gonçalves, A. C. A. y Folegatti, M. V. 1999. Intervalo ótimo de potencial de água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 3: 286 -292.

Torres Duggan, M. 2007. Calidad de fertilizantes: ¿Cuáles son las principales propiedades y atributos que determinan su valor agronómico?. Presentado en el Simposio de "Fertilidad 2007". IPNI Cono Sur /Fertilizar AC. Rosario, 10 y 11 de mayo de 2007.

Unc, A. y Goss, M. J. 2006. Impact of organic waste amendments on soil hydraulic properties and on water partitioning. Journal of Environmental Engineering and Science, 5(3): 243 - 251.

VandenBygaart, A. J., Protz, R., Tomlin, A. D. y Miller, J. J. 1999. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observation from the landscape to micro-scale in silt loams soils of southern Ontario. Soil Till. Res., 51: 139 - 149.

Vázquez, M., Terminiello, A., Millán, G., Daverede, I. y Baridón, E. 2013. Dinámica de la difusión de materiales de encalado en un suelo Hapludol Thaptoárgico en la Argentina. Ciencia del Suelo. 31: 23 - 32.

Vázquez, M., Terminiello, A., Duhour, A., García, M. y Guilino, F.. 2009. Efecto de correctores de acidez sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico de la pradera pampeana. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 27 (1): 67 - 76.

Vázquez, M., Terminiello, A. y Millán, G. 2008. Lixiviación de iones en un suelo tratado con enmiendas carbonáticas y yeso. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16/5/08, Potrero de Funes, San Luis. ACTAS: 342. Trabajo completo versión electrónica.

Veen, B. W., van Noordwijk, M., de Wilhgen, P., Boone, F. R. y Kooistra, M. J. 1992. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. III. Effects on shoot growth, nitrate and water uptake efficiency, Plant Soil, 139: 131 -138.

Vieira, S. R., Hatfield, J. L., Nielsen, D. R. y Biggar, J. W. 1983. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia, Berkeley, 51 (3): 1 -75.

Voorhees, W. B. y Lindstrom, M. J. (1984). Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 152 - 156.

Wagner, G. H. y Wolf, D. C. 1999. Carbon tranformations and soil organic matter formation. In: Sylvia DM, Fuhrmann JJ, Hartel PG & Zuberer DA (1999) Principles and applications of soil microbiology. Englewood Cliffs, Prentice Hall. p. 218 - 256.

Walker, D. J. y Bernal, M. P. 2008. The effect of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. Bioresour. Technol. 99: 396 - 403.

Walworth, J. 2012. Using Gypsum and Other Calcium Amendments in Southwestern Soils. College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona (Tucson, AZ).

Wesseling, J. y van Wijk, W. R. 1957. Soil physical conditions in relation to drain depth. In: Luthin, J.N. (Ed.), Drainage of Agricultural Lands. American Society of Agronomy, Madison, Wisconson, pp. 461 - 504.

Wilson, M. G., Sasal, M. C. y Caviglia, O. 2013.Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. Geoderma 192: 354 - 361.

Wilson, M. G. y Cerana, J. 2004. Mediciones físicas en suelos con características vérticas. Revista Científica Agropecuaria 8(1): 11 - 22.

Wilson, M. G., Zino, L., Cerana, J., Boschetti, N. y Quintero, C. 2004. Efecto del agregado de yeso sobre las características físicas y químicas de un suelo degradado por el uso arrocero. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos.

Wolfarth, F., Schrader, S., Oldenburg, E., Weinert, J. y Brunotte, J. 2011. Earthworms promote the reduction of Fusarium biomass and deoxynivalenol content in wheat straw under field conditions. Soil Biology and Biochemistry. 43: 1858 - 1865.