



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados



**REGENERACIÓN DE LA ESTRUCTURA EN ARGIUDOLES
DE LA PROVINCIA DE SANTA FE (ARGENTINA)**

Ing. Agr. María Eugenia Carrizo

Tesis
Para optar al Grado Académico de
Doctor en Ciencias Agropecuarias

Córdoba, 2015

**REGENERACIÓN DE LA ESTRUCTURA EN ARGIUDOLES
DE LA PROVINCIA DE SANTA FE (ARGENTINA)**

Ing. Agr. María Eugenia Carrizo

Comisión Asesora de Tesis

Director: Dra. Silvia Imhoff

Asesor: Ing. Agr. (Ms. Sc.) Miguel Á. Pilatti

Asesora: Dra. Silvia Ceppi

Tribunal Examinador

Dra. Silvia Ceppi

Dra. Analía Rosa Becker

Dr. Hernán Apezteguía

Presentación formal académica:

27 de Marzo de 2015

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

AGRADECIMIENTOS

A Sebastián que siempre está presente.

A mi familia y especialmente a mis abuelos que inculcaron el esfuerzo y el estudio en mi persona.

A la Facultad de Ciencias Agrarias por permitirme ser parte de esta institución.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por el otorgamiento de la beca doctoral.

A mi directora, Dra. Silvia Imhoff, por su ejemplo de dedicación, compañerismo y trabajo. Además por su confianza y por el apoyo en los momentos difíciles que han contribuido en gran medida a mi formación.

A Dra. Silvia Ceppi y Ms. Sc. Miguel Pilatti que como asesores me brindaron su conocimiento y apoyo cada vez que lo solicité.

A Agustín Alesso por su gran amistad y sus valiosos aportes.

A mis amigos por la colaboración en diferentes momentos y por los momentos felices, especialmente a Andrés, Elisa, Vanesa, Nora, Andrea, Florencia, Celeste, Selene, An-gy.

Al Dr. Abelardo Vegetti por su ejemplo de profesionalismo y vocación por la ciencia.

A los alumnos de la Facultad que participaron en diferentes etapas de esta tesis.

A todos los que contribuyeron para la realización de esta tesis.

RESUMEN

Los suelos de la provincia de Santa Fe presentan diversos grados de degradación físico-química lo que genera la necesidad de estudiar alternativas para lograr la regeneración estructural de suelos cultivados en siembra directa con contenidos de carbono y textura contrastante. El objetivo general de esta tesis fue evaluar la influencia del crecimiento de plantas y residuos de cosecha sobre la regeneración estructural por medio de propiedades físico-químicas que afectan el crecimiento de plantas. Para ello se llevó a cabo un ensayo experimental sobre un suelo franco y franco-limoso en condiciones controladas con los siguientes tratamientos: (i) con y sin crecimiento de plantas de trigo y (ii) con y sin adición de residuos de cosecha (diferente calidad, dosis y ubicación). Se midió: carbono orgánico total y particulado, fracciones de carbohidratos y glomalina, estabilidad de agregados, resistencia ténsil y estrés efectivo. El crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha incrementaron la presencia de los agentes de agregación, especialmente en el suelo franco. La reducción de los mecanismos de desagregación estuvo relacionada al crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha, principalmente en el suelo limoso y hubo dependencia entre la estabilidad estructural y los agentes de agregación en ambos suelos. La resistencia ténsil de los agregados fue afectada por la textura del suelo y por el crecimiento de plantas, con lo cual las raíces generaron una mayor estabilidad del sistema poroso y una mejor condición física del suelo. El crecimiento de las plantas tuvo mayor efecto que los residuos de cosecha sobre el estrés efectivo y, en contenidos de humedad adecuados, la matriz del suelo de ambos suelos no opone restricciones en la retención y liberación de agua para las plantas. La dinámica de la estabilidad de agregados y agentes de agregación en el corto plazo fue dependiente de la presencia de plantas y adición de residuos de cosecha. Estos resultados demuestran que las prácticas de manejo tienen un fuerte impacto sobre las posibilidades de recuperación de la estructura del suelo.

Palabras clave: raíces activas, residuos de cosecha, glomalina, carbohidratos, estabilidad de agregados.

ABSTRACT

The soils of Santa Fe Province have diverse physical and chemical degradation degrees which creates the need to explore alternatives to achieve the structural regeneration in soils with different carbon contents and textures cultivated under no-till. The objective of this research was to evaluate the influence of plant growth and crop residues on structural regeneration through physical and chemical properties that affect plant growth. An experimental trial was conducted on a loamy soil (Typic Hapludoll) and a silty soil (Typic Argiudoll) under controlled conditions with the following treatments: (i) with and without wheat plant growth and (ii) with and without wheat residues addition. Particulate and total organic carbon, glomalin and carbohydrate fractions, structural stability, tensile strength and effective stress were assessed. The presence of plant and the residues addition increased the presence of aggregation agents especially in the loam soil. Reducing breakdown mechanisms were related to plant growth and the addition of residues mainly in the silty soil and there is dependence between the structural stability and aggregation agents in both soils. Tensile strength of the aggregates was affected by soil texture and plant growth, therefore the roots generated great stability of the porous system and improved soil physical conditions. The plants of the growth had greater effect than crop residues on the effective stress and, in appropriate moisture content, the soil matrix of both soils have not restrictions on the retention and release of water to the plants. The dynamics stability of aggregates and aggregating agents in the short term was dependent on the presence of plants and residues addition. These results confirm that management practices have a strong impact on the recovery of soil structure.

Keywords: active roots, crop residues, glomalin, carbohydrates, aggregate stability.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS	XVII
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	1
ESTRUCTURA DEL SUELO	1
Mecanismos de desagregación del suelo	1
Mecanismos involucrados en la agregación del suelo	4
Influencia de las plantas y sistemas radicales sobre la agregación del suelo	7
Influencia de los residuos de cosecha sobre la agregación del suelo	8
Agentes de agregación	10
METODOLOGÍAS DE EVALUACION DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO	14
Estabilidad de los agregados del suelo	14
Resistencia ténsil de los agregados y friabilidad del suelo	16
Estrés efectivo.....	19
DINAMICA DE LA AGREGACIÓN EN EL CORTO PLAZO	20
SISTEMAS PRODUCTIVOS Y USO DEL SUELO EN LA REGIÓN PAMPEANA	22
CARACTERIZACIÓN Y ESTADO ESTRUCTURAL DE LOS SUELOS	24
HIPOTESIS.....	27
OBJETIVOS	28
BIBLIOGRAFÍA CITADA	29
CAPÍTULO 2 IMPACTO DE LOS SISTEMAS RADICALES Y DE RESIDUOS DE COSECHA SOBRE AGENTES DE AGREGACIÓN EN SUELOS DE TEXTURA CONTRASTANTE	37
INTRODUCCIÓN	37
MATERIALES Y MÉTODOS	41

Sitios de estudio y muestreo de suelos	41
Diseño y tratamientos experimentales	42
Determinaciones de parámetros químicos de suelo	44
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
Carbono orgánico total y particulado del suelo	48
Fracciones de carbohidratos y concentración en distintos tamaños de agregados	54
Fracciones de glomalina y concentración en los distintos tamaños de agregados	66
CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFÍA CITADA	76
CAPÍTULO 3 IMPACTO DE LOS MECANISMOS BIÓTICOS Y ABIÓTICOS DE AGREGACIÓN SOBRE INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DE SUELO	81
INTRODUCCIÓN	81
MATERIALES Y MÉTODOS	85
Determinaciones de parámetros físicos de suelo	85
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	90
Estabilidad de agregados	90
Relación entre los agentes de agregación y la estabilidad estructural	98
Resistencia ténsil de los agregados y friabilidad del suelo	103
Relación entre los agentes de agregación y la resistencia ténsil de los agregados	111
Estrés efectivo	115
CONCLUSIONES	121
BIBLIOGRAFÍA CITADA	123
CAPÍTULO 4 DINÁMICA DE LOS AGENTES DE AGREGACIÓN Y PROPIEDADES EDÁFICAS EN SUELOS DE TEXTURAS CONTRASTANTES.....	129
INTRODUCCIÓN	129
MATERIALES Y MÉTODOS	132
Diseño y tratamientos experimentales	132
Determinación de parámetros químicos y físicos de suelo	133

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	134
Evolución de los agentes de agregación.....	134
Evolución de la estabilidad estructural y relación con los agentes de agregación	144
Evolución de la resistencia ténsil de los agregados y relación con los agentes de agregación	150
CONCLUSIONES	155
BIBLIOGRAFÍA CITADA	156
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES GENERALES	159
CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA CITADA	163

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de suelos en función de la friabilidad del suelo	17
Tabla 2.1. Caracterización física y química de los sitios de estudio	43
Tabla 2.2. Resumen de los diferentes tratamientos del ensayo experimental	45
Tabla 2.3. Contenido promedio de carbono orgánico total (COT, g kg ⁻¹), carbono orgánico particulado (COP, g kg ⁻¹) después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	49
Tabla 2.4. Contrastes ortogonales para la variable carbono orgánico particulado (COP, g kg ⁻¹) después de aplicar diferentes tratamientos de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	53
Tabla 2.5. Contenido promedio inicial (mg C kg suelo ⁻¹) de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt) en macro y microagregados en la serie Santa Isabel y Esperanza	54
Tabla 2.6. Contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en macroagregados después de aplicar tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.....	56
Tabla 2.7. Contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en microagregados después de aplicar tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.....	57
Tabla 2.8. Contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en macroagregados después de aplicar tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.....	58
Tabla 2.9. Contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en microagregados después de aplicar tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.....	59

Tabla 2.10. Contrastes ortogonales de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en macroagregados y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.....	62
Tabla 2.11. Contrastes ortogonales de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en macroagregados y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza	63
Tabla 2.12. Contenido promedio inicial de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE) en macro y microagregados en la serie Santa Isabel y Esperanza	67
Tabla 2.13. Contenido promedio de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE) en macro y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.	68
Tabla 2.14. Contenido promedio de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE) en macro y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.	69
Tabla 2.15. Contrastes ortogonales de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE) en macro y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel	71
Tabla 2.16. Contrastes ortogonales de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE) en macro y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza	73

Tabla 3.1. Diámetro medio ponderado de los agregados (DMP) de los pre-tratamientos de rápido humedecimiento (DMP_{RH}), ruptura mecánica (DMP_{RM}) y lento humedecimiento (DMP_{LH}) después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel	91
Tabla 3.2. Diámetro medio ponderado de los agregados (DMP) de los pre-tratamientos de rápido humedecimiento (DMP_{RH}), ruptura mecánica (DMP_{RM}) y lento humedecimiento (DMP_{LH}) después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza	92
Tabla 3.3. Contrastes ortogonales del pre-tratamiento de rápido humedecimiento después de aplicar diferentes tratamientos de adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	94
Tabla 3.4. Contrastes ortogonales del pre-tratamiento de ruptura mecánica después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	95
Tabla 3.5. Contrastes ortogonales del pre-tratamiento de lento humedecimiento después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	97
Tabla 3.6. Análisis de correlación canónica entre los agentes de agregación y los distintos pre-tratamientos de estabilidad estructural en la serie Santa Isabel	99
Tabla 3.7. Análisis de correlación canónica entre los agentes de agregación y los distintos pre-tratamientos de estabilidad estructural en la serie Esperanza	100
Tabla 3.8. Estadística descriptiva para las variables resistencia ténsil de los agregados y friabilidad del suelo (n: 2430) después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	104
Tabla 3.9. Coeficientes de correlación entre los agentes de agregación y la resistencia ténsil del suelo serie Santa Isabel y Esperanza	112

Tabla 3.10. Modelos de regresión para la estimación de la resistencia ténsil de los agregados en función de los agentes de agregación de la serie Santa Isabel y Esperanza.....	113
Tabla 3.11. Valores promedio de resistencia a la penetración (RP, MPa), contenido hídrico (θ , $\text{cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$), estrés efectivo (σ , kPa) para diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	116
Tabla 3.12. Coeficientes “a” y “b” de las ecuaciones de ajuste entre resistencia a la penetración (RP) y estrés efectivo (σ) para diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	117
Tabla 3.13. Contrastes ortogonales de los coeficientes “a” y el “b” después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza	118
Tabla 4.1. Resumen de los diferentes tratamientos del ensayo experimental	132

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Mecanismos de desagregación causados por el efecto del agua. Fuente: Chenu y Co-sentino (2007)	3
Fig. 1.2. Esquema de las interacciones entre los factores que intervienen en la agregación del suelo. Fuente: Six <i>et al.</i> (2004)	4
Fig. 2.1. Localización geográfica de los suelos estudiados	41
Fig. 2.2. Valor promedio de carbono orgánico total (COT, g kg ⁻¹) en la serie Santa Isabel y Esperanza. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	48
Fig. 2.3. Valor promedio de carbono orgánico total (COT, g kg ⁻¹) en la serie Santa Isabel por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	50
Fig. 2.4. Valor promedio de carbono orgánico total (COT, g kg ⁻¹) en la serie Esperanza por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	50
Fig. 2.5. Valores promedio de carbono orgánico total (COT, g kg ⁻¹) por efecto de la adición de residuos de cosecha (calidad, dosis y ubicación). Letras minúsculas distintas indican diferencias entre tratamientos en la serie Esperanza. Letras mayúsculas distintas indican diferencias entre tratamientos en la serie Santa Isabel (Test de Tukey, $\alpha = 0,05$).....	51
Fig. 2.6. Valor promedio inicial de carbono orgánico particulado (COP, g kg ⁻¹) en la serie Santa Isabel y Esperanza. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	52
Fig. 2.7. Valores promedio de carbohidratos solubles en agua caliente (A), en ácido diluido (B) y totales (C) en macro y microagregados en la serie de suelo Santa Isabel y Esperanza. Valores expresados en mg C kg suelo ⁻¹ . Letras diferentes indican diferencias significativas entre tamaños de agregados dentro de cada suelo (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).....	64

Fig. 3.1. Valor promedio de resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) en la serie Santa Isabel por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	106
Fig. 3.2. Valores promedio de resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) en la serie Santa Isabel por efecto de la adición de residuos de cosecha (calidad, dosis y ubicación). Letras distintas indican diferencias entre tratamientos (Test de Tukey, $\alpha = 0,05$)	106
Fig. 3.3. Valor promedio de resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) en la serie Esperanza por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	107
Fig. 3.4. Valores promedio de resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) en la serie Esperanza por efecto de la adición de residuos de cosecha (calidad, dosis y ubicación). Letras distintas indican diferencias entre tratamientos (Test de Tukey, $\alpha = 0,05$)	108
Fig. 3.5. Valor promedio de friabilidad (F) en la serie Santa Isabel y Esperanza. Líneas horizontales indican los rangos de clasificación de friabilidad según Imhoff <i>et al.</i> (2002). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	110
Fig. 3.6. Valor promedio de friabilidad (F) en la serie Santa Isabel por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	110
Fig. 3.7. Valor promedio de friabilidad (F) en la serie Esperanza por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	111
Fig. 3.8. Resistencia a la penetración (RP, MPa) en función del estrés efectivo (σ , kPa) para tratamientos con y sin crecimiento de plantas en la serie Santa Isabel ($y=RP$; $x = \sigma$). La línea horizontal representa el umbral crítico de resistencia a la penetración (2 MPa)	119
Fig. 3.9. Resistencia a la penetración (RP, MPa) en función del estrés efectivo (σ , kPa) para tratamientos con y sin crecimiento de plantas en la serie Esperanza ($y=RP$; $x = \sigma$). La línea horizontal representa el umbral crítico de resistencia a la penetración (2 MPa)	120

Fig. 4.1. Evolución del carbono orgánico total (COT, g kg ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media.....	134
Fig. 4.2. Evolución del carbono orgánico total (COT, g kg ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.....	135
Fig. 4.3. Evolución del carbono orgánico particulado (COP, g kg ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media	136
Fig. 4.4. Evolución del carbono orgánico particulado (COP, g kg ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media	136
Fig. 4.5. Evolución del contenido de carbohidratos solubles en agua (CHag, mg C kg ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media.....	137
Fig. 4.6. Evolución del contenido de carbohidratos solubles en agua (CHag, mg C kg ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.....	138
Fig. 4.7. Evolución del contenido de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG, mg g suelo ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media	139
Fig. 4.8. Evolución del contenido de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG, mg g suelo ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media	140

Fig. 4.9. Evolución del contenido de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE, mg g suelo ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media.....	141
Fig. 4.10. Evolución del contenido de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE, mg g suelo ⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.....	142
Fig. 4.11. Diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de rápido humedecimiento (DMP _{RH} , mm) por efecto de diferentes tratamientos (A) y distintos momentos de muestreo (B) en la serie Santa Isabel. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	144
Fig. 4.12. Diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de ruptura mecánica (DMP _{RM} , mm) por efecto de diferentes tratamientos (A) y distintos momentos de muestreo (B) en la serie Santa Isabel. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).....	145
Fig. 4.13. Diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de lento humedecimiento (DMP _{LH} , mm) por efecto de diferentes tratamientos (A) y distintos momentos de muestreo (B) en la serie Santa Isabel. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)	146
Fig. 4.14. Evolución del diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de rápido humedecimiento (DMP _{RH} , mm) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.....	146
Fig. 4.15. Evolución del diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de ruptura mecánica (DMP _{RM} , mm) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media	147

Fig. 4.16. Diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de lento humedecimiento (DMP_{LH} , mm) por efecto de diferentes tratamientos (A) y distintos momentos de muestreo (B) en la serie Esperanza. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$)..	148
Fig. 4.17. Componentes principales para la relación agentes de agregación-diámetro medio ponderado de los pre-tratamientos de rápido humedecimiento (DMPRH), ruptura mecánica (DMPRM), y lento humedecimiento (DMPLH) de la serie Esperanza y Santa Isabel.....	149
Fig. 4.18. Evolución de la resistencia ténsil (RT, kPa) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media	151
Fig. 4.19. Evolución de la resistencia ténsil (RT, kPa) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media	151
Fig. 4.20. Relación entre el carbono orgánico total del suelo (COT, $g\ kg^{-1}$) (A), carbono orgánico particulado (COP, $g\ kg^{-1}$) (B), carbohidratos solubles en agua caliente (CHag, $mg\ C\ g\ suelo^{-1}$) (C), proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG, $mg\ g\ suelo^{-1}$) (D) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE, $mg\ g\ suelo^{-1}$) (E) y la resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) durante el período experimental. Los círculos blancos corresponden a la serie Santa Isabel. Los círculos negros corresponden a la serie Esperanza.....	153

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

alto: alta dosis de residuos de cosecha	M: masa individual del agregado
bajo: baja dosis de residuos de cosecha	M_o: masa media de los agregados de la población
CE: conductividad eléctrica	n: número de repeticiones
CHac Ma: carbohidratos solubles en ácido diluído en los macroagregados	P: fuerza aplicada para la ruptura del agregado
CHac Mi: carbohidratos solubles en ácido diluído en los microagregados	pH: reacción del suelo
CHac: carbohidratos solubles en ácido diluído	PSRG Ma: proteínas del suelo relacionadas con la glomalina en los macroagregados
CHag Ma: carbohidratos solubles en agua caliente en los macroagregados	PSRG Mi: proteínas del suelo relacionadas con la glomalina en los microagregados
CHag Mi: carbohidratos solubles en agua caliente en los microagregados	PSRG: proteínas del suelo relacionadas con la glomalina
CHag: carbohidratos solubles en agua caliente	PSRG-FE Ma: proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble en los macroagregados;
CHt Ma: carbohidratos totales en los macroagregados	PSRG-FE Mi: proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble en los microagregados
CHt Mi: carbohidratos totales en los microagregados	PSRG-FE: proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble
CHt: carbohidratos totales	RH: rápido humedecimiento
CIC: capacidad de intercambio catiónica	RM: ruptura mecánica
COP: carbono orgánico particulado	RP: resistencia a la penetración del suelo
COS: carbono orgánico del suelo	RT: resistencia ténsil de los agregados
COT: carbono orgánico total	sup: ubicación superficial de residuos de

D² : diámetro efectivo de cada agregado	cosecha Y : valor medio de resistencia ténsil obtenido
D_m : diámetro medio del agregado	θ_s : contenido hídrico en saturación
DMP : diámetro medio ponderado de los agregados	θ_{sr} : saturación relativa
DMP_{LH} : diámetro medio ponderado del pretratamiento de lento humedecimiento	σ : estrés efectivo
DMP_{RH} : diámetro medio ponderado del pretratamiento de rápido humedecimiento	σ_γ : desvío estándar de los valores de resistencia ténsil medidos
DMP_{RM} : diámetro medio ponderado del pretratamiento de ruptura mecánica	ψ : potencial mátrico
F : friabilidad del suelo	-pl : sin crecimiento de cultivo de trigo
H₂SO₄ : ácido sulfúrico	-res : sin adición de residuos de cosecha
HMA : hongos micorrízicos arbusculares	 ψ_m : potencial mátrico en valor absoluto
inc : residuos de cosecha incorporados	+pl : crecimiento de cultivo de trigo
LH : lento humedecimiento	+res : con adición de residuos de cosecha

INTRODUCCIÓN

ESTRUCTURA DEL SUELO

La estructura del suelo ha sido definida como la heterogeneidad espacial de los diferentes componentes o propiedades del suelo (Dexter, 1988). Otros autores la describen como el arreglo espacial de los complejos órgano-mineral (agregados) y el espacio poroso (Oades, 1993; Carter, 2006). La disposición de las partículas del suelo en un momento dado es el resultado de interacciones físicas, químicas, mineralógicas y biológicas, por ello esta organización es compleja y dinámica (Bronick y Lal, 2005). El resultado de esas interacciones condiciona diversos aspectos químicos, físicos y biológicos del suelo, tales como la disponibilidad y movimiento de oxígeno, agua, la resistencia a la penetración de las raíces, el movimiento de solutos y la actividad biológica (Amézketa, 1999; Díaz Zorita *et al.*, 2002; Six *et al.*, 2004).

Mecanismos de desagregación del suelo

La estabilidad estructural es la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y la organización del espacio poroso cuando es expuesto a diferentes tipos de estrés (Kay, 1990). La pérdida de carbono orgánico del suelo (COS) provoca inestabilidad de los agregados (Elliott, 1986; Kay, 1998). Además la estructura está sometida a constantes modificaciones producidas por las gotas de lluvia y el laboreo. Diversos autores (Emerson, 1967; Le Bissonnais, 1996; Amézketa, 1999) han identificado cuatro mecanismos principales de desagregación: (i) disgregación por compresión del aire ocluido que origina ruptura por efecto del estallido, (ii) desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia, (iii) micro-

fisuración por hinchamiento diferencial y (iv) dispersión físico química (Figura 1.1). Estos mecanismos de desagregación se diferencian entre sí por la naturaleza de los enlaces entre partículas, por la energía necesaria para provocar la ruptura de las unidades estructurales, por las condiciones físico-químicas necesarias para que se activen los mismos, por la cinética del proceso, por las propiedades del suelo y por la naturaleza y tamaño de las partículas que se originan como consecuencia de la desagregación (Le Bissonnais, 1996).

El estallido se origina por la compresión del aire ocluido en el interior de los agregados durante la humectación. La presión interna creada por el aire atrapado produce la ruptura del agregado si supera la cohesión interna del mismo. El efecto del aire atrapado depende del volumen de aire en el interior de los agregados, de la velocidad de humectación y de la cohesión interna de los agregados. Este fenómeno disminuye al aumentar la humedad inicial de los agregados y el contenido de arcilla (Le Bissonnais, 1996). El estallido produce principalmente microagregados y su tamaño aumenta con el contenido de arcilla. Este mecanismo es particularmente importante en los suelos limosos (Cosentino *et al.*, 2006; Pilatti *et al.*, 2006).

La ruptura mecánica de los agregados se produce por la energía cinética de las gotas de lluvia que dispersan mecánicamente las partículas del suelo. Este mecanismo es importante, especialmente, cuando el suelo está húmedo ya que los agregados tienen una débil cohesión interna. Los fragmentos resultantes son microagregados o partículas elementales. Este efecto pone de manifiesto el papel que cumple la cubierta vegetal superficial en proteger la superficie del suelo contra el impacto de las gotas de lluvia (Le Bissonnais, 1996).

Los fenómenos de contracción y expansión que se producen como consecuencia de los ciclos de humedecimiento–secado originan la microfisuración de los agregados del suelo. Este proceso depende de los mismos factores que la ruptura por estallido y produce microagregados similares en tamaño a los resultantes en el estallido de suelos inicialmente húmedos (Cosentino, 2006). Sin embargo, es importante la distinción entre estos dos mecanismos ya que la respuesta a la desagregación de suelos con diferente contenido de arcilla es diferente. De acuerdo

con Chan y Mullins (1994) la ruptura por estallido disminuye al aumentar el contenido de arcilla de un suelo, mientras que el efecto de los fenómenos de contracción y expansión diferencial, aumenta en función del contenido de arcillas.

La dispersión físico-química resulta de la reducción de las fuerzas de atracción entre las partículas coloidales durante el humedecimiento (Emerson, 1967). La dispersión de los coloides del suelo está controlada por la naturaleza y distribución de los cationes de cambio que contrarrestan a las cargas permanentes y/o variables en las partículas coloidales, especialmente arcilla y humus. Los cationes monovalentes causan la dispersión físico-química debido al estrés osmótico y resulta el mecanismo más destructivo ya que genera partículas elementales.

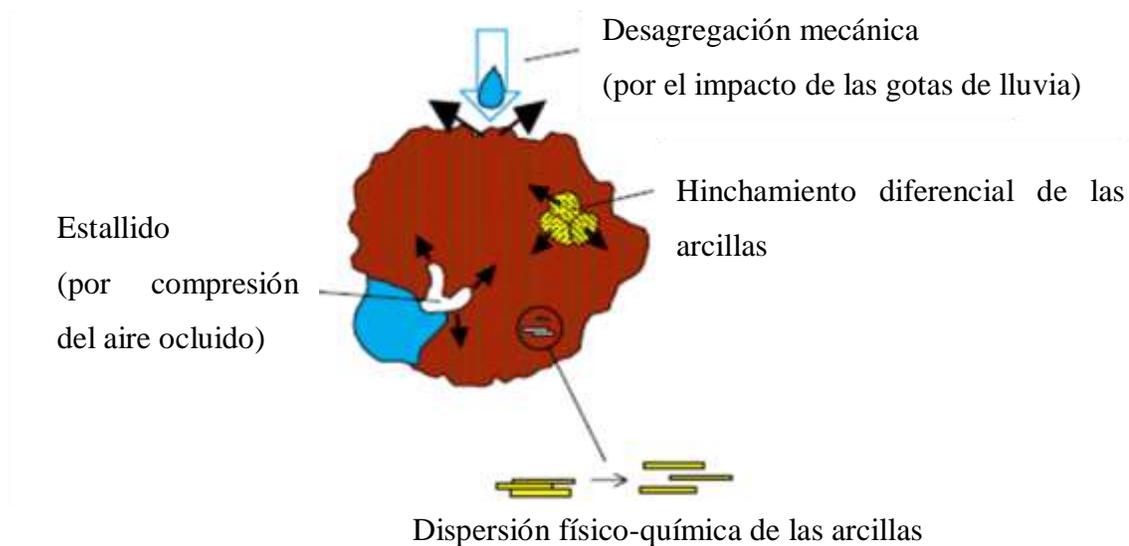


Fig. 1.1. Mecanismos de desagregación causados por el efecto del agua. Fuente: Chenu y Co-sentino (2007).

Mecanismos involucrados en la agregación del suelo

La agregación es un proceso por el cual las partículas de suelo son unidas a través de diferentes materiales orgánicos e inorgánicos (Tisdall y Oades, 1982; Amezketa, 1999). La potencialidad de un suelo para formar y estabilizar agregados depende de la interacción de diversos factores que incluyen: factores abióticos (tipo y cantidad de arcilla, sesquióxidos, cationes intercambiables), bióticos (cantidad y calidad del COS, actividad de las raíces de las plantas, fauna y microorganismos del suelo) y ambientales (temperatura, humedad, ciclos de humectación-secado) (Kay, 1998; Six *et al.*, 2004) (Figura 1.2). Estos factores en conjunto condicionan la dinámica del proceso de agregación, que consta principalmente de tres fases: la formación de agregados naturales, su estabilización y ruptura (Tisdall y Oades, 1982). Los procesos bióticos y abióticos están involucrados en la formación de la estructura, mientras que los procesos bióticos son particularmente importantes en la estabilización de la estructura del suelo (Chan y Heenan, 1996).

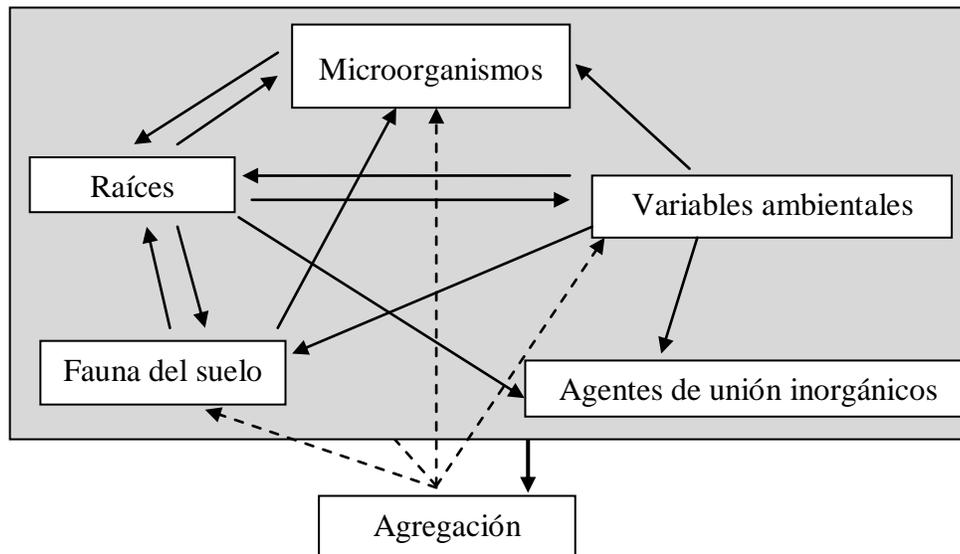


Fig. 1.2. Esquema de las interacciones entre los factores que intervienen en la agregación del suelo. Fuente: Six *et al.* (2004).

Existen distintas teorías y modelos de agregación. Inicialmente, Edwards y Bremner (1967) sugirieron que los macroagregados consisten de complejos de minerales de arcilla-materia orgánica humificada-cationes polivalentes, donde la arcilla es unida a la materia orgánica humificada a través de los metales polivalentes. También postularon que la declinación del COS favorecía la destrucción de los agregados. Tisdall y Oades (1982) propusieron un modelo conceptual para la jerarquía de agregación que describe como las partículas minerales primarias por la combinación con sustancias orgánicas e inorgánicas forman agregados. Esta teoría ha sido utilizada por numerosos autores para explicar correlaciones entre la reducción de la agregación y la pérdida del COS (Six *et al.*, 2000, 2004). Oades & Waters (1991) concluyeron que esta teoría sólo es aplicable a suelos dominados por arcillas de tipo 2:1, en los cuales el COS es el principal agente estabilizante. Este concepto reconoce tres niveles de organización estructural (pequeños microagregados <20 μm , grandes microagregados 20-250 μm y macroagregados >250 μm) y clasifica los agentes de agregación en tres grupos basados en el tiempo de degradación de la materia orgánica: transitorios (polisacáridos microbianos y derivados de plantas), temporarios (raíces e hifas de hongos) y persistentes (materia orgánica humificada y cationes polivalentes). De acuerdo con estos autores, los agentes de agregación actúan en los diferentes estados jerárquicos. Las partículas primarias libres y los agregados del tamaño del limo (<20 μm) forman microagregados y su estabilización involucra agentes permanentes. Los macroagregados están formados por microagregados estables y son estabilizados por agentes de agregación transitorios y temporarios, siendo estos últimos los más importantes en este nivel (Tisdall y Oades, 1982). Los microagregados, en especial los inferiores a <20 μm , son muy estables durante largos períodos de tiempo y por lo tanto no están influenciados por cambios en el manejo. En cambio, la macroagregación resulta más dinámica y sensible a las prácticas de labranzas, secuencias y rotación de cultivos, aplicación de fertilizantes debido a la naturaleza lábil de los agentes de agregación temporarios y transitorios (Elliott, 1986; Six *et al.*, 2004).

Oades (1984) propuso un nuevo modelo de formación de agregados en el cual los microagregados serían inicialmente formados dentro de los macroagregados del suelo. Recientes estudios de Angers *et al.* (1997), Beare *et al.* (1994) y Six *et al.* (2000) corroboran

el modelo propuesto por Oades (1984). Beare *et al.* (1994) sugirieron que los macroagregados pueden formarse alrededor del carbono orgánico particulado (COP), proceso que permite protegerlo del ataque microbiano al quedar ocluido dentro de los agregados del suelo. Sin embargo, las teorías sobre la mecánica de formación de agregados en el suelo indican que además de ese rol, el COP desempeñan un papel fundamental en la formación de microagregados (Golchin *et al.*, 1994). Con ello habrá COP con distinto grado de protección física lo que determina su exposición al ataque microbiano, y su dinámica (Six *et al.*, 2004).

El COS mejora la agregación al aumentar la cohesión de los agregados debido a que los polímeros orgánicos forman uniones químicas muy estables con las partículas minerales (Tisdall y Oades, 1982; Chenu y Guerif, 1991), y al disminuir la humectabilidad de los agregados (Chenu *et al.*, 2000). Estas acciones se deben a la acción física de las hifas fúngicas y de las raíces finas que permiten unir las partículas (Degens *et al.*, 1997), al incremento en la repelencia entre agregados por la producción de sustancias hidrofóbicas (Hallet y Young, 1999), y a los polisacáridos extracelulares exudados por bacterias y hongos que unen las partículas (Monnier, 1965; Tisdall y Oades, 1982; Chenu y Guerif, 1991).

Las raíces de las plantas y los residuos orgánicos frescos (*e.i.* residuos de cosecha) constituyen una de las principales fuentes del COS que permiten a través de diferentes mecanismos la formación y estabilización de agregados (Tisdall y Oades, 1979). El aporte de residuos orgánicos influye directamente sobre la producción de sustancias hidrofóbicas, polisacáridos y estimula el crecimiento de hifas fúngicas. Indirectamente, favorece el crecimiento de la biomasa microbiana (*e.i.* hongos y bacterias). Las raíces de las plantas favorecen la agregación a través del entramado de agregados y proveen una fuente de residuos orgánicos que estimula y mantiene las poblaciones microbiales (Tisdall y Oades, 1982; Miller y Jastrow, 1990; Jastrow *et al.*, 1998).

Influencia de las plantas y sistemas radiculares sobre la agregación del suelo

La importancia de las plantas y de los sistemas radicales sobre la agregación ha sido reportada por numerosos autores (Materechera *et al.*, 1994; Degens, 1997; Angers y Caron, 1998; Six *et al.*, 2004; Bronick y Lal, 2005). El efecto de las plantas sobre la estabilidad de los agregados está influenciado por la cantidad y la composición bioquímica de residuos que retornan al suelo y por la cantidad y el tipo de materiales orgánicos liberados al suelo (Tisdall y Oades, 1982; Lynch y Bragg, 1985). Las raíces de las plantas modifican la estructura del suelo a través de diversos mecanismos que incluyen: penetración de raíces, cambios en el régimen hídrico, producción de exudados radiculares, entramado de agregados por las raíces y descomposición radicular (Jastrow *et al.*, 1998; Gale *et al.*, 2000; Six *et al.*, 2004).

Las investigaciones han puesto de manifiesto que los sistemas radicales incorporan materia orgánica lábil que actúa como núcleo en la formación de macroagregados (Six *et al.*, 2000) y que el entramado físico de las partículas, la producción de agentes de unión orgánicos (*i.e.* exudados radiculares) y la estimulación de la biomasa microbiana favorecen la formación de agregados estables al agua (Tisdall y Oades, 1979; Jastrow *et al.*, 1998). Por otra parte, las raíces, al penetrar el suelo, crean zonas de fallas que contribuyen a fragmentar el suelo y forman agregados más pequeños (Angers y Caron, 1998). Este fenómeno es incrementado por los ciclos de secado y humedecimiento asociados con el crecimiento de las plantas que pueden producir grietas e inducir la ruptura de los agregados (Dexter, 1991). La magnitud de los efectos de los sistemas radicales está fuertemente relacionada con la arquitectura y biomasa radicular y con el tipo de sustancias exudadas (Chan y Heenan, 1996; Degens, 1997).

Denef *et al.* (2002) encontraron cambios en la agregación asociados con el crecimiento radicular de trigo en suelos con diferentes mineralogías. Otros estudios demostraron, en suelos de textura franco limosa, que la descomposición del carbono derivado de la actividad radicular fue más importante que la fase vegetativa en promover la agregación del suelo (Gale *et al.*, 2000; Puget y Drinkwater, 2001). Por otra parte, Materechera *et al.* (1994) encontraron que la

actividad radical de las plantas disminuía la proporción de agregados estables. En general, la mejora en la agregación del suelo ha sido atribuida al crecimiento de raíces activas, ciclos de humedecimiento y secado, producción de polisacáridos en la rizósfera, y desarrollo de poblaciones fúngicas (Degens *et al.*, 1997; Haynes y Beare, 1997; Angers y Caron, 1998; Jastrow *et al.*, 1998; Rillig *et al.*, 2002; Six *et al.*, 2004; Deneff y Six, 2005).

Los microorganismos presentes en el suelo desempeñan un rol fundamental en la agregación del suelo (Degens, 1997). Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) forman asociaciones simbióticas con la mayoría de las plantas. Diversos estudios han sido desarrollados para explicar la contribución de HMA y la asociación raíces-hifas en la agregación del suelo (Miller y Jastrow, 1990; Angers y Caron, 1998; Jastrow *et al.*, 1998). Los hongos, junto a las raíces, influyen en la agregación a través de procesos biofísicos, biológicos y bioquímicos que están fuertemente interrelacionados (Rillig y Mummey, 2006). Los efectos físicos de las hifas, de manera similar a las raíces aunque en menor escala, incluyen el entramado y entrelazado de partículas primarias, COS y pequeños agregados; reorientación de partículas de arcilla adyacentes a las hifas y la unión con el COS y la modificación del estado hídrico que contribuye a la unión de los exudados radiculares y fúngicos con las partículas. Desde el punto de vista biológico, los productos de rizodeposición de los HMA influyen en las comunidades microbianas y las redes alimentarias del suelo. Los mecanismos bioquímicos incluyen la liberación de mucílagos, polisacáridos y otros compuestos extracelulares, y la producción de proteínas como la glomalina.

Influencia de los residuos de cosecha sobre la agregación del suelo

El COS es el principal factor que afecta la agregación y debido a su abundancia y características puede ser modificado por las prácticas de manejo (Abiven *et al.*, 2009). La reducción de la intensidad de labranza mostró cambios en la distribución del COS, caracterizados por una estratificación cerca o sobre la superficie del suelo y un bajo contenido orgánico en profundidad (Ball *et al.*, 1996; Franzluebbers, 2002). Las prácticas que permitan

incrementar el retorno de residuos orgánicos, *i.e.* residuos de cosecha, se convierten en una alternativa para la mantención de la fertilidad de los suelos y para la recuperación de situaciones degradadas. La rotación de cultivos es una práctica de manejo que permite, a través de exudados radicales y residuos de cosecha, incrementar el COS, aumentar la biomasa y actividad microbiana y, consecuentemente, mejorar diversas propiedades edáficas, entre ellas la agregación (Wright *et al.*, 1999; Bronick y Lal, 2005).

Varios investigadores han reportado que la adición de residuos orgánicos frescos (ej. residuos de cosecha) provee COP que estimula el crecimiento de hongos y otros microbios de suelo y la producción de diversos elementos de unión, como hifas fúngicas, polisacáridos extracelulares y lípidos (Chenu y Guérif, 1991; Jastrow, 1996; Cosentino *et al.*, 2006; Abiven *et al.*, 2007) que favorecen la unión de las partículas del suelo.

La importancia que tienen los residuos de cosecha como mecanismo agregante y la incidencia en el aumento de la estabilidad estructural de los suelos está relacionada con la liberación de carbohidratos solubles desde los residuos (Ball *et al.*, 1996), con el COP (Gale *et al.*, 2000), y con la actividad de hongos (Wright *et al.*, 1999; Bossuyt *et al.*, 2001) u otros microbios. La magnitud de los efectos sobre la estabilidad estructural depende no sólo de la cantidad, sino también de la calidad de los residuos que ingresan al suelo (Tisdall y Oades, 1982; Lynch y Bragg, 1985; Abiven *et al.*, 2009). Existe una alta correlación entre la composición bioquímica de los residuos y la estabilidad de los agregados (Martens, 2000). Los residuos de maíz presentan una alta concentración de fenoles e incrementaron la agregación del suelo en comparación con otros cultivos. Por el contrario, la baja agregación de suelos cultivados con soja es atribuida a la baja concentración de fenoles y al bajo retorno de residuos en el suelo (Martens, 2000).

Lui *et al.* (2005) encontraron que la inclusión de cultivos de cobertura mejoró la estabilidad de los agregados, y esa mejora se relaciona con la cantidad de materiales orgánicos que se incorporen al suelo y con la producción de agentes de agregación como polisacáridos.

Similarmente, aunque para suelos tropicales, Martins *et al.* (2009) reportaron que la influencia de las secuencias de cultivos sobre la agregación se debe al mayor retorno de residuos y a la mayor cantidad de polisacáridos que ingresan al suelo.

Además de la cantidad y calidad de residuos, la ubicación de los residuos en el suelo es otro factor que influencia la agregación del suelo. En este sentido, Mulumba y Lal (2008) encontraron que la mayor presencia de residuos de maíz sobre la superficie del suelo contribuyó positivamente en la estabilidad de los agregados del suelo. En un estudio sobre manejo de residuos de trigo, Blanco-Canqui y Lal (2007) demostraron que la falta de incorporación de residuos causa una estratificación del COS cerca de la superficie del suelo e incrementa la estabilidad estructural en los primeros centímetros del suelo. Estos autores concluyen que esta mejora corrobora la importancia de mantener residuos sobre la superficie del suelo para mejorar la calidad del suelo y favorecer el secuestro de carbono. Rubio *et al.* (2012) encontraron en suelos franco arenosos que la mayor biomasa de residuos que permanece sobre la superficie del suelo, debido a la incorporación de cultivos de cobertura en la rotación, incrementaron la estabilidad estructural. Otros estudios demostraron que la remoción de los residuos de cosecha reduce el ingreso de agentes de agregación esenciales para la formación y la estabilización de los agregados, favorece la formación de costras y la compactación. Además afecta negativamente la presencia de macro y micronutrientes que derivan de la descomposición de los residuos (Singh y Malhi, 2006; Blanco-Canqui *et al.*, 2007; Blanco-Canqui y Lal, 2009).

Agentes de agregación

El COP es una fracción lábil constituida principalmente por residuos de plantas en distintos estados de descomposición, semillas y restos microbiales (Bronick y Lal, 2005). Esta comprendido por partículas de materia orgánica que varían entre 50 y 2000 μm que pueden encontrarse fuera de los agregados (COP libre) u ocluido dentro de los agregados (COP intra-agregado) (Cambardella y Elliott, 1992; Plante y Mc Gill, 2002).

El material vegetal fresco (residuos de cosecha y raíces) que ingresa al suelo induce la formación de macroagregados debido a que estimula la producción de agentes de agregación derivado de la actividad microbial y constituye una fuente directa de carbono para el desarrollo de los microorganismos del suelo (Golchin *et al.*, 1994; Jastrow, 1996; Gale y Cambardella, 2000). Diversos modelos conceptuales han sido desarrollados para proponer el rol que desempeña el COP en la formación de microagregados dentro de los macroagregados (Jastrow, 1996; Angers *et al.*, 1997; Six *et al.*, 1998; Gale *et al.*, 2000). Six *et al.* (2000) establecieron que si los macroagregados del suelo no son perturbados por la labranza o por factores ambientales, esos residuos frescos o el COP comienzan a descomponerse y gradualmente se produce la incrustación con partículas de arcilla y productos microbianos formando microagregados dentro de los macroagregados. Cuando los macroagregados se desestabilizan se produce la liberación de microagregados que se transforman en componentes básicos para el próximo ciclo de formación de macroagregados (Tisdall y Oades, 1982).

En este modelo, la tasa de formación, la estabilización y la degradación de macro y microagregados está directamente relacionada con la dinámica de COP. Puget *et al.* (2000) y Deneff *et al.* (2001), respaldaron este modelo al mostrar que los macroagregados estables estuvieron enriquecidos en COP por incorporaciones de materia orgánica joven proveniente de residuos vegetales. Similarmente, Bossuyt *et al.* (2004) señalaron que la macroagregación es resultado de un enriquecimiento con materia orgánica fresca, la cual constituye un núcleo alrededor de la cual se adhieren las partículas minerales y que la alteración de los macroagregados genera la aparición de microagregados estables.

Existen diversas metodologías para la separación de la fracción lábil del carbono del suelo. Los métodos de fraccionamiento físico, sean por densidad o por tamaño de partículas, son simples, rápidos, sensibles y menos destructivos que los métodos de fraccionamientos químicos (Galantini, 2008). Este fraccionamiento recupera la fracción ligera y los productos orgánicos parcialmente descompuestos, lo que permite establecer el papel de los minerales edáficos dentro de la estabilización y el ciclado del COS. Cambardella y Elliott (1992),

sugirieron que el COP puede ser separado por métodos de fraccionamiento físicos y genera información sobre cambios en el corto plazo debido al uso del suelo y prácticas de manejo.

Los carbohidratos del suelo pueden representar entre un 5-20% del COS y constituyen una mezcla de mono y polisacáridos, derivados principalmente de plantas y microorganismos del suelo (Cheshire, 1979; Gregorich *et al.*, 1994). Estos compuestos representan la principal fuente de energía y nutrientes para la microflora del suelo, e intervienen en la agregación del suelo (Cheshire, 1979 Tisdall y Oades, 1982); sin embargo, su importancia en la agregación del suelo está relacionada a su origen (Bronick y Lal, 2005). Además, al estar involucrados en reacciones bioquímicas y órgano-minerales y formar una parte importante del carbono orgánico lábil del suelo son utilizados como indicador temprano y sensible de cambios del COS ya que tales cambios no son detectados por fracciones menos lábiles o recalcitrantes (Gregorich *et al.*, 1994; Jolivet *et al.*, 2006).

Los carbohidratos extraíbles en agua caliente y en ácido diluído han sido identificados como fracciones del COS que responden rápidamente al ingreso de carbono por los residuos de cosecha, actividad de las raíces y microorganismos asociados (Tisdall y Oades, 1982; Haynes y Swift, 1990). La evaluación de estas fracciones resulta útil para explicar incrementos en la estabilidad de agregados ya que actúan como agentes activos en la agregación en cortos períodos de tiempo (Tisdall y Oades, 1982; Lui *et al.*, 2005; Jolivet *et al.*, 2006).

Diversos enfoques han sido desarrollados para determinar el contenido de carbohidratos en los suelos. La mayoría de los métodos involucran una hidrólisis ácida y la determinación de los azúcares hidrolizados (Lowe, 1993). El ácido sulfúrico es generalmente utilizado para producir la ruptura de los polisacáridos en monosacáridos, los cuales se pueden cuantificar por métodos colorimétricos o por cromatografía líquida o gaseosa. Este último método permite evaluar la contribución relativa de carbohidratos derivados de plantas y microbios (Puget *et al.*, 1999). La cantidad de carbohidratos extraída se incrementa con la concentración del ácido y la temperatura de la hidrólisis (Puget *et al.*, 1999). El ácido sulfúrico concentrado hidroliza

la totalidad de los polisacáridos incluyendo la celulosa y refleja el contenido total de carbohidratos. La hidrólisis con ácido sulfúrico diluido y agua caliente no logran solubilizar los carbohidratos estructurales de las plantas (Cheshire, 1979), por lo tanto estas fracciones están enriquecidas con carbohidratos no estructurales de plantas y carbohidratos de origen microbial. Cheshire (1979) indica la utilidad de hidrólisis parcial en el estudio de la naturaleza de carbohidratos. En relación a la cuantificación, los métodos colorimétricos más ampliamente utilizados son el método ácido sulfúrico-antrona y el fenol-sulfúrico (Dubois *et al.*, 1956).

La glomalina es una glicoproteína producida en cantidades variables y de manera específica por los HMA, por lo cual puede ser un importante contribuyente del total de proteínas del suelo y del COS (Wright y Upadhyaya, 1996; Lovelock *et al.*, 2004a). Esta proteína llega al suelo por la secreción desde la hifa o por la liberación después de la muerte de la hifa (Wright y Upadhyaya, 1996). A pesar de las investigaciones realizadas a partir del descubrimiento (Wright y Upadhyaya, 1996; Wright *et al.*, 1999; Rillig *et al.*, 2002), su estructura y bioquímica no es conocida totalmente (Rillig, 2005). Distintos estudios señalan que el contenido de carbono de la glomalina fluctúa entre 30 y 40%, el porcentaje de nitrógeno varía entre un 3 y un 5% y el contenido de hidrógeno entre un 4,1 a 4,5 % (Lovelock *et al.*, 2004a). Es considerada importante en la agregación del suelo por su baja tasa de descomposición (7-42 años en suelos inalterados) y alta concentración en los suelos (típicamente entre 2-15 hasta > 60 mg g⁻¹) (Wright y Upadhyaya, 1998; Rillig y Mummey, 2006). Diversos estudios han propuesto que actúa como un pegamento de las partículas del suelo y ha sido positivamente correlacionada con la estabilidad en agua de los agregados en diversos suelos (Wright y Upadhyaya, 1996, 1998; Wright *et al.*, 1999; Rillig, 2004; Spohn y Giani, 2011). La acumulación en el suelo depende de las propiedades físicoquímicas de los suelos y puede representar, en el largo plazo, un almacenamiento de carbono y nitrógeno en la materia orgánica (Lovelock *et al.*, 2004a). La glomalina puede ser utilizada como índice de la biomasa de los HMA dada la laboriosidad y las limitaciones de los métodos para la medición de la abundancia de los HMA (Lovelock *et al.*, 2004b).

La glomalina ha sido operacionalmente definida como *protein glomalin related soil* (Rillig, 2004). Cada fracción de glomalina es definida en términos operativos por procedimientos de extracción, obteniéndose proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) la cual corresponde a la fracción de mayor cantidad de glomalina que puede ser extraída y corresponde a la proteína fuertemente unida a las partículas del suelo (Wright y Upadhyaya, 1998; Lovelock *et al.*, 2004a). Las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble (PSRG-FE), son consideradas como un material de reciente deposición en el suelo y de naturaleza muy lábil.

METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Una adecuada estructura debería proveer a las plantas cantidades adecuadas de aire y agua, y al mismo tiempo favorecer un correcto contacto raíz/suelo para asegurar la absorción de agua y nutrientes, y presentar baja resistencia mecánica para que las raíces puedan explorar el mayor volumen de suelo (Letey, 1985). Por ello, la caracterización de la estructura por medio de propiedades que afectan directamente el crecimiento de las raíces de las plantas, como la estabilidad de los agregados, la resistencia ténsil de los agregados, la friabilidad del suelo y el estrés efectivo, resulta primordial para conocer el impacto de las prácticas de manejo sobre las propiedades edáficas.

Estabilidad de los agregados

La estabilidad de los agregados es utilizada frecuentemente como un indicador de la estructura del suelo (Six *et al.*, 2000) y es una medida de la capacidad de las unidades estructurales del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso bajo la acción del agua o la aplicación de un estrés mecánico externo (Dexter, 1988). Esta propiedad

depende de las fuerzas de cohesión que unen las partículas primarias entre sí y de la naturaleza y magnitud del estrés disruptivo (Beare y Bruce, 1993).

La estabilidad de los agregados es función del COS. Las raíces de las plantas, la presencia de residuos de cosecha, y la aplicación de enmiendas orgánicas constituyen las principales fuentes de carbono que favorecen la presencia de agentes de agregación, los cuales tienen un impacto positivo sobre la estabilidad de los agregados (Six *et al.*, 2004). Los agregados de suelos labrados resultan estructuralmente inestables y son dispersados rápidamente por el impacto de la gota de lluvia en comparación con aquellos de sistemas agrícolas no perturbados (*e.i.* pasturas, sistemas de siembra directa). Esto sucede porque la intensificación de los sistemas de labranza impide el desarrollo natural de la estructura y favorecen la pérdida del COS. Los sistemas agrícolas con presencia de residuos de cosecha en la superficie del suelo junto a la no remoción del suelo favorecen la presencia de agregados estables. Los macro y microagregados, en suelos en siembra directa, son más estables y presentan una tasa de ciclado más lenta debido a la presencia de altos contenidos de carbono orgánico.

Diversas metodologías han sido desarrolladas para evaluar la estabilidad de los agregados por diversas razones: (i) existen diversos mecanismos que producen la ruptura de los agregados, (ii) por el tipo de escala a la cual puede ser determinada y (iii) por razones metodológicas (Amezqueta *et al.*, 1999; Díaz Zorita *et al.*, 2002). Hasta el momento no existe un consenso generalizado para utilizar una misma metodología de evaluación de la estabilidad de los agregados (Díaz Zorita *et al.*, 2002). Esto se puede deber a la naturaleza dinámica del proceso de agregación y a la interacción de los diferentes agentes de agregación (orgánicos e inorgánicos) durante las fases de formación y estabilización de los agregados.

Según Amezqueta (1999), el método elegido para evaluar la estabilidad de los agregados depende principalmente del propósito del estudio. La mayoría de ellos consisten en examinar la ruptura de los agregados bajo diferentes condiciones de humedecimiento y de aplicación de energía. Los métodos de tamizado en húmedo son los más ampliamente utilizados y permiten

cuantificar la cantidad de agregados que resultaron intactos frente a la acción de las fuerzas mecánicas del agua durante el tamizado (Yoder, 1936; Le Bissonnais, 1996). Entre éstos se encuentra el propuesto por Le Bissonnais (1996) que permite diferenciar los mecanismos básicos de ruptura de los agregados en el suelo: (i) ruptura por compresión del aire ocluido que origina ruptura por efecto del estallido; (ii) microfisuración por hinchamiento diferencial; (iii) ruptura mecánica debido al impacto de las gotas de lluvia y (iv) dispersión por procesos físico-químicos. En este sentido, la determinación de la estabilidad de los agregados bajo diferentes condiciones de humectación puede proveer valiosa información sobre el comportamiento de los suelos en relación a las fuerzas predominantes en la desagregación del suelo y podría ser útil para explorar los mecanismos de estabilización de la estructura que son afectados por cambios en el manejo del suelo.

Resistencia ténsil de los agregados y friabilidad del suelo

La resistencia ténsil de los agregados (RT) refiere a la fuerza por unidad de área requerida para la ruptura de un agregado (Dexter y Kroesbergen 1985; Imhoff *et al.*, 2002). Es una medida de las uniones dentro y entre los agregados y de la magnitud de agregación del suelo (Horn y Dexter, 1989) y resulta un indicador sensible para evaluar la condición estructural ya que depende de la macro y microestructura del suelo (Blanco-Canqui y Lal, 2006; Watts y Dexter, 1998). Los valores elevados de RT fueron asociados con dificultades en el establecimiento de cultivos (Ley *et al.*, 1993). Una elevada RT dificulta la penetración de sembradoras en el suelo, restringe la emergencia de las plántulas y el crecimiento de las raíces, la absorción de agua y nutrientes por disminución de la porosidad y permeabilidad del suelo (Blanco-Canqui y Lal, 2006).

La RT puede ser determinada por medio de test de tensión directo o indirecto en una amplia gama de tamaños de agregados (Dexter y Kroesbergen, 1985; Dexter y Watts, 2000). Los test de tensión directos consisten en la aplicación de dos fuerzas de la misma magnitud y sentido, pero en dirección opuesta, en ambos extremos de un agregado, hasta su separación en dos par-

tes por acción de esas fuerzas (Imhoff *et al.*, 2002). El inconveniente de la utilización de este test radica en la dificultad en la preparación de la muestra de suelo. El test indirecto, es comúnmente utilizado para medir la resistencia en agregados individuales, y consiste en colocar un agregado entre dos placas paralelas y luego se aplica una fuerza conocida con una velocidad de desplazamiento constante a través del diámetro del agregado hasta su fractura.

La RT es usada para describir la friabilidad del suelo (F), la cual ha sido definida como la tendencia de una masa de suelo a desintegrarse en fragmentos de menor tamaño por la aplicación de un estrés o carga (Watts y Dexter, 1998). La F resulta de la heterogeneidad de la RT debido a los planos de debilidad o zonas de fallas presentes en el interior de los agregados (Utomo y Dexter, 1981; Dexter y Watts, 2000). Este atributo (calculado como el desvío estándar de los valores de RT de los agregados dividido por el valor medio de la RT) es sinónimo de calidad física del suelo (Utomo y Dexter, 1981), indicador de la condición estructural de un suelo (Watts y Dexter, 1998) y es considerado una propiedad física clave para la producción de cultivos y para evaluar el impacto de los sistemas productivos sobre el medio ambiente.

Utomo y Dexter (1981) propusieron una clasificación de suelos en función de valores de friabilidad (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Clasificación de suelos en función de la friabilidad del suelo.

Categorías	Valor F
Suelo no friable	< 0,1
Suelo levemente friable	0,10-0,20
Suelo friable	0,20-0,50
Suelo muy friable	0,50-0,80
Suelo mecánicamente inestable	> 0,80

Valores bajos de F indican una tendencia del suelo a quebrarse en fragmentos de suelo muy grandes y pequeños cuando es sometido a una labranza, los cuales resultan inadecuados para la germinación y crecimiento de las plántulas. Por otro lado, los suelos que presentan elevados valores tienden a fragmentarse fácilmente cuando una fuerza mínima es aplicada, razón por la cual resultan inadecuados para ser utilizados en labores mecanizadas. Valores intermedios indican que los agregados grandes poseen menor resistencia que los agregados pequeños y, por lo tanto, pueden ser más fácilmente quebrados en fragmentos pequeños (Utomo y Dexter, 1981). Macks *et al.* (1996) consideran que la F no es sólo relevante en los sistemas de labranza convencionales sino que también resulta de crucial importancia en relación a la siembra y el establecimiento de cultivos bajo sistemas de siembra directa.

Una condición de suelo friable está constituida por agregados con diámetros que varían entre 1 a 5 mm (Macks *et al.*, 1996; Dexter, 1988) y es una característica deseable para el establecimiento de una cama de siembra y de enraizamiento de adecuada calidad para la germinación y crecimiento de las plántulas de cultivos agrícolas (Watts y Dexter, 1998). Braunack y Dexter (1989) indicaron que la presencia de agregados excesivamente pequeños (<0,5–1 mm) favorecen la erodabilidad del suelo, impiden la emergencia de plántulas e incrementan el riesgo de formación de costras superficiales; y por el contrario, una elevada proporción de agregados mayores a 8 mm no es deseable debido a la reducción del área de contacto suelo/raíz, rápido secado del suelo, dificultad en la emergencia de las plántulas y a una alta impedancia a la penetración radicular.

La RT y la F están influenciadas por diversos factores tales como: humedad del suelo, ciclos de humedecimiento y secado, contenido y mineralogía de arcillas, estabilidad de los agregados, composición de cationes intercambiables, carbono orgánico del suelo y forma de los agregados del suelo, entre otros (Utomo y Dexter, 1981; Ley *et al.*, 1993; Macks *et al.*, 1996; Dexter y Watts, 2000; Imhoff *et al.*, 2002). La influencia de estos factores depende de las condiciones climáticas, prácticas de manejo y composición del suelo (Macks *et al.*, 1996; Watts y Dexter, 1998; Blanco-Canqui y Lal, 2006). Entre las prácticas de manejo que afectan la RT y

F, podemos citar, el sistema de cultivo, tipo de fertilizantes, manejo de residuos de cosecha y tipo de labranza (Chan y Heenan, 1996, Macks *et al.*, 1996; Watts y Dexter, 1998; Blanco-Canqui y Lal, 2007).

Estrés efectivo

El deterioro de la estructura edáfica se caracteriza, entre otros aspectos, porque se reduce la porosidad total, fundamentalmente la macroporosidad. Esto tiene consecuencias negativas directas sobre la captación y movimiento del agua en el suelo y en su capacidad de aeración, además de aumentar la resistencia mecánica del suelo (Imhoff *et al.*, 2010). A medida que la densidad del suelo aumenta, el contacto entre las partículas se incrementa, aumentando la energía que se requiere para penetrar el suelo. Del mismo modo, el secado del suelo produce un acercamiento de sus partículas y favorece la formación de nuevas conexiones entre ellas y entre los microagregados del suelo, lo que incrementa la energía de retención del agua por la matriz del suelo (potencial mátrico). En estos casos, la resistencia del suelo es producida por el efecto combinado del contenido hídrico y potencial mátrico sobre los puentes inter-partículas e inter-agregados, proceso conocido como estrés efectivo (Mullins y Panayiotopoulos, 1984).

El contenido hídrico del suelo a determinado valor de potencial mátrico puede variar en función de la textura del suelo, tenor de carbono orgánico y grado de compactación del suelo. Por esta razón, Mullins y Panayiotopoulos (1984) propusieron el estrés efectivo (σ) para representar el efecto combinado del potencial mátrico del suelo y de su contenido hídrico. Estos autores señalaron además que cualquier factor que altere σ (densificación del suelo, sustancias aglutinantes) afectará indirectamente la resistencia mecánica del suelo, ya que esta propiedad es función de la densidad del suelo y de la humedad.

El estrés efectivo presenta relación lineal positiva con la resistencia a la penetración y varios autores lo utilizan como indicador de calidad física del suelo (Fabiola *et al.*, 2003; Wha-

lley *et al.*, 2005; Miretti *et al.*, 2010). La impedancia mecánica puede ser la mayor limitación para el crecimiento de las raíces en suelos tan húmedos como -100 kPa, debido al incremento del estrés efectivo entre las partículas del suelo resultante de la tensión existente en las películas de agua entre las partículas (Whalley *et al.*, 2005). Este efecto puede agravarse por el incremento de la compactación asociada al tráfico de la maquinaria y de los animales (Bengough *et al.*, 2011). Las raíces que experimentan impedancia mecánica requieren energía extra para desplazar las partículas del suelo y así, poder crecer. Esto restringe la habilidad del sistema radical en acceder al agua y los nutrientes de las capas de suelo más profundas.

DINÁMICA DE LA AGREGACIÓN EN EL CORTO PLAZO

La agregación del suelo ejerce un importante control en los procesos de almacenamiento y descomposición del COS y constituye un factor determinante en la estructura y funcionamiento de las comunidades microbianas (Six *et al.*, 1998). A pesar de que la mayoría de los estudios sobre la estructura del suelo, por razones metodológicas, consideran los agregados como unidades estáticas, la agregación del suelo es una propiedad dinámica que presenta alteraciones temporales provocadas por factores relacionados con las variables climáticas y biológicas, los sistemas de manejo y el tiempo (Amézketa, 1999). El efecto de los factores intrínsecos del suelo como la textura y mineralogía del suelo, contenido de carbono orgánico, pH están relacionados con cambios que suceden más lentamente y no son detectados en el corto plazo.

Los sistemas de labranza afectan fuertemente el proceso de agregación del suelo ya que producen una intensa remoción del suelo y generan un bajo aporte de residuos orgánicos (residuos de cosecha, raíces) afectando el contenido de COS. Por lo tanto, la adopción de prácticas de manejo conservacionistas (*e.i.* mínima labranza, mayores tasas de retorno de residuos de cosecha) puede detener el deterioro de la estabilidad estructural, así como promover la recuperación de suelos que ya han sufrido una degradación.

Los residuos orgánicos (*e.i.* residuos de cosecha) mejoran el contenido de COS y la estabilidad estructural. Los efectos observados sobre la estabilidad varían con las características bioquímicas y con la biodegradabilidad de los residuos orgánicos (Martens, 2000; Abiven *et al.*, 2007; Annabi *et al.*, 2007). La descomposición de los residuos resulta en la producción de agentes biológicos de agregación (*e.i.* polisacáridos, hifas fúngicas) e incrementa la estabilidad de los agregados 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 adición de residuos orgánicos estimula la actividad microbiana que influencia ambas propiedades de los agregados (Lynch y Bragg, 1985). Monnier (1965) propuso un esquema conceptual que describe el efecto de diferentes materiales orgánicos sobre la dinámica de la estabilidad estructural en diferentes escalas de tiempo después de su incorporación. 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 incremento fuerte pero transitorio en la agregación del suelo luego de la adición de residuos de cosecha. 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 en el suelo la tasa de descomposición es más rápida dado que se incrementa el área de contacto para los microorganismos en comparación con los residuos mantenidos en superficie (Wolf y Wagner, 1999).

Las secuencias de cultivos pueden afectar la dinámica de la agregación de diferente manera, al presentar distintos tiempos de ocupación con cobertura viva, y diferir en la cantidad y calidad de los residuos que retornan al suelo (Alvaro-Fuentes *et al.*, 2008). Un mayor período de ocupación del suelo con raíces activas, característico de sistemas intensificados (Caviglia y Andrade, 2010), favorece la presencia de agentes de agregación temporarios y transitorios (Tisdall y Oades, 1982) e incrementa los pools lábiles de carbono orgánico como el COP estrechamente vinculado con la dinámica de la macroagregación (Cambardella y Elliot, 1992; Gale *et al.*, 2000). En este sentido, Novelli (2013) detectó una relación positiva entre el tiempo

de ocupación del suelo con raíces activas y la agregación. Coincidentemente, otros estudios han documentado que la presencia de sistemas radiculares activos incrementan la agregación en comparación con sistemas sin cultivos (Denef y Six, 2005; Cosentino *et al.*, 2006).

SISTEMAS PRODUCTIVOS Y USO DEL SUELO EN LA REGIÓN PAMPEANA

La degradación de los suelos refiere a la pérdida de la productividad debido al uso intensivo. Este proceso afecta la sustentabilidad de los sistemas agrícolas y la calidad medioambiental (Lal, 1993). Los distintos procesos de degradación afectan la estructura del suelo y las distintas funciones determinando sus posibles usos. Actualmente existen cerca de dos billones de hectáreas degradadas, en escala mundial y se estima que, en los últimos 50 años, dos tercios de las tierras agrícolas fueron afectadas por distintos procesos de degradación. La recuperación de estas áreas constituye una de las alternativas para el aumento de la producción sustentable de alimentos y la protección del ambiente (Matson *et al.*, 1997).

En Argentina, principalmente en la llanura pampeana, grandes superficies de tierras naturales fueron sometidas a un proceso de creciente conversión que provocó cambios estructurales y funcionales en los ecosistemas (Viglizzo *et al.*, 2010). La conversión de tierras naturales en tierras cultivadas, la rápida incorporación de tecnología, insumos y prácticas agronómicas permitieron elevar la productividad de esas tierras provocando alteraciones funcionales en los ecosistemas con un alto impacto ambiental (Solbrig y Viglizzo, 1999).

La predominancia de la agricultura continua, el uso de sistemas de labranza agresivos y el monocultivo de soja o la secuencia trigo/soja, ha derivado en el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Micucci y Taboada, 2006). La degradación química ha sido vinculada con disminuciones del COS, acidificación y disminución de la fertilidad (Michelena *et al.*, 1989; Ferreras *et al.*, 2007; Carrizo *et al.*, 2011; Miretti *et al.*, 2012). Las

condiciones físicas sufrieron un importante deterioro que se evidencia por la formación de costras superficiales, el incremento en las tasas de escurrimiento/escorrentía, pérdida de suelo por erosión, una menor capacidad de almacenamiento hídrico y alteración del estado de agregación del suelo (Michelena *et al.*, 1989; Senigagliaesi y Ferrari 1993; Pilatti *et al.*, 2006; Sasal *et al.*, 2006; Ferreras *et al.*, 2007; Steinbach y Álvarez, 2007; Miretti *et al.*, 2010). Estas propiedades influyen sobre el crecimiento de las plantas a través de sus efectos sobre la humedad, la temperatura, la aireación del suelo y sobre la impedancia mecánica al desarrollo radicular, incidiendo finalmente sobre el rendimiento de los cultivos (Letey, 1985).

Para contrarrestar la degradación de los suelos surgió el reemplazo de las labranzas convencionales por sistemas conservacionistas como la siembra directa (García *et al.*, 2000). Este sistema ocupa actualmente cerca de 25 millones de hectáreas, de las cuales 20 millones son ocupadas por el cultivo de soja y el resto por maíz y trigo (Wall, 2011). La siembra directa provocó cambios en el proceso hidrológico, en la estabilidad y fertilidad de los suelos, y en la biodiversidad (Viglizzo *et al.*, 2010). Además, entre otros efectos, propicia la mantención o el aumento del contenido superficial del COS como resultado de un retorno incrementado de residuos, menor mezcla y disturbios en el suelo, mayor contenido de humedad, menor temperatura, mayor proliferación de raíces y de actividad biológica y los menores riesgos de erosión (García *et al.*, 2000; Ferreras *et al.*, 2007). Así, este sistema logra altos niveles productivos con estabilidad temporal y en armonía con el ambiente. Sin embargo, presenta algunas limitaciones como el desarrollo de compactación superficial que ocurre como consecuencia de la falta de remoción del suelo, del asentamiento natural de las partículas y por el tráfico de implementos agrícolas (Taboada *et al.*, 1998; Díaz Zorita *et al.*, 2002; Micucci y Taboada, 2006; Sasal *et al.*, 2006).

CARACTERIZACIÓN Y ESTADO ESTRUCTURAL DE LOS SUELOS

La región Pampeana, corresponde a una de las praderas más extensas del planeta ocupando alrededor de 52 millones de hectáreas de tierras relativamente fértiles, adecuadas para la agri-

cultura y la ganadería (Hall *et al.*, 1992). Los suelos de esta región están desarrollados sobre sedimentos eólicos y el orden Molisol es el más representativo (INTA-SAGyP, 1990). En general, son suelos moderadamente ácidos, con un contenido de materia orgánica de alrededor de 30 g kg⁻¹ y moderada disponibilidad de los principales nutrientes (Hall *et al.*, 1992). Presentan una amplia composición textural, aunque los suelos con elevada proporción de limo ocupan una importante superficie de esta región (INTA, 1983).

La provincia de Santa Fe se caracteriza por presentar distintos tipos de suelo, desde franco arcillo limosos en el centro (*i.e.* Argiudoles) hasta arenosos y franco (*i.e.* Hapludoles) en el sur (Hall *et al.*, 1992). Dentro de los primeros, un perfil típico presenta un horizonte superior de textura franco a franco arcillo limosa, seguido de un horizonte B textural con estructura prismática. Los Hapludoles en cambio, se caracterizan por ser suelos más livianos, con escaso desarrollo, con textura franca y menor contenido de arcilla en profundidad (INTA, 1983). Este amplio rango de texturas en el horizonte superficial, con presencia o no de un horizonte B textural, genera limitaciones para el correcto desarrollo radicular y problemas en el movimiento de agua y aire del suelo.

Estos suelos presentan elevada proporción de limo de origen biológico (*e.i.* 50-70 %), de los cuales la mitad corresponde a la fracción fina (2-20 µm) (Pecorari *et al.*, 1990; Cosentino y Pecorari, 2002). Estos materiales otorgan a los suelos una débil resistencia mecánica a la ruptura y con ello una alta susceptibilidad a la degradación debido a las características físicas, como la alta porosidad lacunar (Cosentino y Pecorari, 2002). El tipo de arcilla prevaleciente son illitas, de carácter poco expansible debido a su composición mineralógica. Ambas características conllevan a que estos suelos presenten una capacidad de agrietamiento limitada durante los ciclos de humedecimiento-secado (Pecorari *et al.*, 1990). En términos generales, son suelos a menudo débilmente estructurados, con limitado potencial de expansión-contracción, lo que confiere baja capacidad de regeneración estructural. Además, presentan susceptibilidad a compactarse fácilmente, formar estructura masiva con encostramiento superficial y pérdida

de porosidad estructural (Senigagliesi y Ferrari, 1993; Cosentino y Pecorari, 2002; Sasal *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008).

Diversos estudios han mostrado los efectos de la siembra directa sobre las propiedades físicas de los suelos con alto contenido de limo. En estos suelos la falta de remoción ha conducido a la formación de estructuras superficiales masivas caracterizadas por elevada resistencia a la penetración, mayor densidad y menor macroporosidad (Taboada *et al.*, 1998; Cosentino y Pecorari, 2002; Steinbach y Álvarez, 2007). Estas capas afectan negativamente el desarrollo radicular y reducen el volumen de suelo explorado para absorber agua y nutrientes así como las tasas de infiltración y aireación (Díaz Zorita *et al.*, 2002). Además, en algunos casos, se observó la presencia de estructuras laminares, con agregados alargados orientados paralelamente al suelo, que condicionan el ingreso y la circulación de agua en el suelo (Bonel *et al.*, 2005; Sasal *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2009).

Teniendo en cuenta las características texturales y mineralógicas, no resulta adecuada la utilización de estos suelos bajo sistemas de siembra directa continua dado que presentan baja resiliencia y escaso potencial para reestructurarse (Micucci, 2006; Taboada *et al.*, 2008). Estos rasgos de fragilidad estructural condicionan el movimiento del agua y del aire en el suelo, lo que dificulta la emergencia y el crecimiento de las plántulas, incrementa la resistencia mecánica del suelo a la penetración, con efectos sobre el crecimiento y oxigenación de las raíces pudiendo causar disminuciones en la productividad de los cultivos. Estas evidencias indican que la recuperación de la estructura superficial de estos suelos es clave para lograr un correcto crecimiento de los cultivos en suelos cultivados en siembra directa.

Diversos estudios reportaron que la regeneración de la estructura de suelos limosos depende de la contracción y expansión que se produce durante los ciclos de humedeciendo y secado por las plantas y/o clima y de los mecanismos biológicos de agregación (Dexter, 1988; Barbosa *et al.*, 1997; Taboada *et al.*, 2004; Taboada *et al.*, 2008). El avance en el conocimiento del efecto de la actividad radicular y residuos de cosecha sobre la producción de agentes de agregación,

principales mecanismos de ruptura de agregados e impacto sobre indicadores de calidad estructural del suelo son aspectos claves para seleccionar estrategias productivas que permitan regenerar la estructura de suelos de texturas contrastantes de la provincia de Santa Fe.

HIPÓTESIS

Este trabajo se sustenta sobre la hipótesis general de que los agentes de agregación, sean de origen biológico o ambiental, son los de mayor relevancia para la regeneración de la estructura de los suelos franco-limosos de la provincia de Santa Fe. Para contribuir al avance en el conocimiento se plantean las siguientes hipótesis específicas:

1. La mayor producción de agentes de agregación se logra mediante la combinación del crecimiento de plantas y la incorporación al suelo de cantidades elevadas de residuos de cosecha, independientemente de su calidad, en suelos con elevado contenido de limo y arcillas no expansibles.
2. El crecimiento de plantas y los residuos de cosecha incorporados al suelo, a través de la producción de los agentes bióticos y abióticos, mejoran la calidad física del suelo medida a través de la estabilidad y resistencia de los agregados y el estrés efectivo en suelos con contenidos de carbono y textura contrastante.
3. El máximo contenido de los agentes de agregación, resultado del crecimiento de plantas y de la incorporación de residuos, coincide con el momento de máximo crecimiento radicular y dicho efecto se mantienen luego de la senescencia del cultivo. Este patrón se traduce en las propiedades dependientes de los agentes de agregación, como la estabilidad y resistencia de los agregados.

OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis fue evaluar en suelos con carbono orgánico y textura contrastante la influencia del crecimiento de plantas y residuos de cosecha sobre la regeneración estructural por medio de propiedades físico-químicas que afectan el crecimiento de plantas.

1. Cuantificar el efecto del crecimiento de plantas en combinación con la adición de diversas calidades, cantidades y ubicación de residuos de cosecha sobre la producción de diversos agentes de agregación en suelos que poseen contenidos de carbono y textura contrastante.
2. Determinar el impacto del crecimiento de plantas, de los residuos de cosecha y de los agentes de agregación sobre la estabilidad estructural, resistencia de los agregados y el estrés efectivo del suelo.
3. Determinar la evolución temporal de agentes de agregación y de propiedades físicas, en suelos con carbono y textura contrastante, debido al crecimiento de plantas y a la adición y ubicación de diferentes dosis de residuos de cosecha.

En el Capítulo 2 se analiza el efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha sobre la producción de agentes de agregación. De manera similar, en el Capítulo 3 se aborda la influencia del crecimiento de plantas, residuos de cosecha y agentes de agregación sobre propiedades físicas indicadoras del grado de agregación del suelo. El Capítulo 4 evalúa la dinámica temporal de agregación y producción de agentes de agregación por efecto de del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las consideraciones generales sobre la tesis y se plantean posibles líneas de investigación.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A. and Leterme P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during the decomposition of organic material. *European Journal of Soil Science* 58: 239-247.
- Abiven S., Menasseri S. and Chenu C. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1-12.
- Álvarez C.R., Taboada M.A., Gutierrez Boem F.H., Bono A., Fernandez P.L. y Prystupa P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the rolling pampa region of Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1242-1250.
- Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Gracia R. and López M.V. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145: 390-396.
- Amézketa E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14: 83-151.
- Angers D.A., Recous S. and Aita C. 1997. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ¹³C ¹⁵N-labelled wheat straw in situ. *European Journal of Soil Science* 48: 295-300.
- Angers D.A. and Caron J. 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry* 45: 55-72.
- Annabi M., Houot S., Francou C., Poitrenaud M. and Le Bissonnais Y. 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal* 71: 413-423.
- Ball B.C., Cheshire M.V., Robertson E.A.G. and Hunter E.A. 1996. Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long-term experiment. *Soil and Tillage Research* 39: 143-160.
- Barbosa A., Taboada M.A., Rodriguez M.B. y Cosentino D.J. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada (Argentina). *Ciencia del Suelo* 15: 81-86.
- Beare M.H. and Bruce R.R. 1993. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: Implications for determining environmental effects on soil structure. *Geoderma* 56: 87-104.
- Beare M.H., Hendrix P.F. and Coleman D.C. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 777-786.
- Bengough A.G., Mc Kenzie B.M., Hallett P.D. and Valentine T.A. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62: 59-68.
- Blanco-Canqui H., Lal R., Post W.M., Izaurralde R.C. and Owens L.B. 2006. Corn stover impacts on near-surface soil properties of no-till corn in Ohio. *Soil and Tillage Research* 92: 144-155.

- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2007. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil and Tillage Research* 95: 240-254.
- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2009. Corn stover removal for expanded uses reduces soil fertility and structural stability. *Soil Science Society of America Journal* 73: 418-426.
- Bonel B., Morrás H. y Bisaro V. 2005. Modificaciones en la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* 23:1-12.
- Bossuyt H., Denef K., Six J., Frey S.D., Merckx R. and Paustian K. 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology* 16: 195-208.
- Bossuyt H., Six J. and Hendrix P.F. 2004. Rapid incorporation of carbon from fresh residues into newly formed stable microaggregates within earthworm casts. *European Journal of Soil Science* 55: 393-401.
- Braunack M.V. and Dexter A.R. 1989. Soil aggregation in the seedbed: a review. I. Properties of aggregates and beds of aggregates. *Soil and Tillage Research* 14: 259-279.
- Bronick C.J. and Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Cambardella C.A. and Elliott E.T. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56: 777-783.
- Carrizo M.E., Pilatti M.A., Alesso C.A. y Imhoff S. 2011. Atributos químicos de suelos Argiudoles cultivados y no cultivados del Departamento Las Colonias (Santa Fe). *Ciencia del Suelo* 29: 173-179.
- Carter M.R. 2006. Crop rotation and farming systems: temperate zone. En: *Encyclopedia of Soil Science*. Lal, R., (ed.). Taylor & Francis Group, Madison, New York, pp. 362-364.
- Caviglia O. and Andrade F. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas. Capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3: 1-8.
- Chan K.Y. and Mullins C.E. 1994. Slaking characteristics of some Australian and British soils. *European Journal of Soil Science* 45: 273-283.
- Chan K.Y. and Heenan D.P. 1996. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. *Soil and Tillage Research* 37: 113-125.
- Chenu C. and Guérif J. 1991. Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Science Society of America Journal* 55: 1076-1080.
- Chenu C., Le Bissonnais Y. and Arrouays D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64: 479-1486.
- Chenu C. and Cosentino D. 2007. Microbial regulation of soil structural dynamics. En: *Architecture and Biology of Soils: Life in Inner Space*. Ritz, K. and Young, M.I., (ed.). CABI Publishing, Cambridge, MA, USA, pp. 37-71.
- Cheshire M.V. 1979. Nature and origin of carbohydrates in soils. Academic Press, London, pp. 216.
- Cosentino D.J. 2006. Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme. Tesis Doctorado. Institut National Agronomique Paris- Grignon, Paris, Francia, 186 pp.
- Cosentino D.J. y Pecorari C. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.

- Cosentino D., Chenu C. and 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.
- De Gryze S., Six J., Brits C. and Merckx R. 2005. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 55-66.
- Degens B.P. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Australian Journal of Soil Research* 35: 431-459.
- Denef K., Six J., Bossuyt H., Frey S.D., Elliott E.T., Merckx R. and Paustian K. 2001. Influence of dry –wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1599-1611.
- Denef K., Six J., Merckx R. and Paustian K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant and Soil* 246: 185-200.
- Denef K. and Six J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal of Soil Science* 56: 469-479.
- Dexter A.R. and Kroesbergen B. 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research* 31: 139-147.
- Dexter A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research* 11: 199-238.
- Dexter A.R. 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research* 20:87-100.
- Dexter A.R. and Watts C. 2000. Tensile strength and friability. In: *Soil and environmental analysis: physical methods*. Smith, K. and Mullins C., (eds.). Marcel Dekker, New York, USA, pp. 401-430.
- Díaz Zorita M., Perfect E. and Grove J.H. 2002. Disruptive methods for assessing soil aggregation: A review. *Soil and Tillage Research* 64: 3-22.
- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. and Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugar and related substances. *Analytical Chemistry* 28: 350-356.
- Edwards A.P. and Bremner J.M. 1967. Dispersion of soil particules by sonic vibration. *Journal of Soil Science* 18: 47-63.
- Elliott E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soil. *Soil Science Society of America Journal* 50: 627-633.
- Emerson W.W. 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research* 5: 47-57.
- Ferreras L. Magra G., Besson P. Kovalevski E. y García F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25: 159-172.
- Franzluebbers A.J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research* 66: 197-205.

- Galantini J.A. 2008. Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. En: Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de Argentina. Galantini, J.A., (ed.). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, pp. 19-39.
- Gale W.J., Cambardella C.A. and Bailey T.B. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Science Society of America Journal* 64: 201-207.
- García F.O., Ambroggio M. and Trucco V. 2000. No-tillage in the Pampas of Argentina: A success story. *Better Crops International* 14: 24-27.
- Fabiola N., Giarola B., Silva A.P., Imhoff S. and Dexter A.R. 2003. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma* 113: 95-108.
- Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O. and Clarke P. 1994. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C P/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research* 32: 285-309.
- Gregorich E.G., Carter M.R., Angers D.A., Monreal C.M. and Ellert B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74: 367-385.
- Hall A.J., Rebella C.M., Ghersa C.M. and Culot J.P. 1992. Field-crop systems of the Pampas. En: *Field Crop Ecosystems Series: Ecosystems of the World*. Pearson, C.J., (ed.). Elsevier Scientific, New York, pp. 413-450.
- Hallett P.D. and Young I.M. 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science* 50: 35-40.
- Haynes R.J. and Swift R.S. 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *Journal of Soil Science* 41: 73-83.
- Haynes R.J. and Beare M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1647-1653.
- Horn R. and Dexter A.R. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil and Tillage Research* 13: 253-266.
- Imhoff S., Silva A.P. and Dexter A. 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1656-1661.
- Imhoff S., Ghiberto P., Grioni A. and Gay J.P. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the flat Pampas of Argentina. *Geoderma* 158: 95-108.
- INTA. 1983. Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3360-20. Arroyo Seco-San Nicolás de los Arroyos. INTA-MAG. Provincia de Santa Fe, Buenos Aires.
- INTA-SAGyP. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Estudios para la implementación de la reforma impositiva agropecuaria, Proyecto PNDU, Argentina 85/019. Área Edafológica, Buenos Aires, Argentina. Tomos I y II. pp. 667.
- Jastrow J.D. 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 28: 665-676.
- Jastrow J.D., Miller R.M. and Lussenhop J. 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 905-916.
- Jolivet C., Angers D.A., Chantigny M.H., Andreux F. and Arrouays D. 2006. Carbohydrate dynamics in particle-size fractions of sandy spodosols following forest conversion to maize cropping. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 2834-2842.

- Kay B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science* 12: 1-41.
- Kay B.D. 1998. Soil structure and organic carbon: a review. En: *Soil processes and the carbon cycle*. Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F. and Stewart, B.A., (eds.). Boca Raton, CRC Press, Florida, USA, pp. 169-197.
- Lal R. 1993. Soil degradation, soil quality and soil resilience. *Soil and Tillage Research* 29: 1-8.
- Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437.
- Letey J. 1985. Relationship between soil properties and crop production. *Advances in Soil Science* 1: 273-294.
- Ley G.J., Mullins C.E. and Lal R. 1993. Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. *Soil and Tillage Research* 28: 1-13.
- Liu A., Ma B. and Bomke A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of America* 69: 2041-2048.
- Lovelock C.E., Wright S.F., Clark D.A. and Ruess R.W. 2004a. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. *Journal of Ecology* 92: 278-287.
- Lovelock C.E., Wright S.F. and Nichols K.A. 2004b. Using glomalin as an indicator for arbuscular mycorrhizal hyphal growth: an example from a tropical rain forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 36: 1009-1012.
- Lowe L.E. 1993. Total and labile polysaccharide analysis of soils. En: *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Carter, M.R., (ed.). CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 373-376.
- Lynch J.M. and Bragg E. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Advances Soil Science* 2: 134-170.
- Macks S.P., Murphy B.W., Cresswell H.P. and Koen T.B. 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Australian Journal of Soil Research* 34: 343-360.
- Martens D.A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 361-369.
- Martins M., Corá J., Jorge R. and Marcelo A. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil and Tillage Research* 104: 22-29.
- Materechera S.A., Kirby J.M., Alston A.M. and Dexter A.R. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant and Soil* 160: 57-66.
- Matson P.A., Parton W.J., Power A.G. and Swift M.J. 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277: 504-509.
- Michelena R.O., Iruetia C.B., Vavruska F.A., Mon R. y Pittaluga A. 1989. Degradación de suelos del Norte de la Región Pampeana. *Publicación Técnica* 6. INTA.
- Micucci F.G. 2006. Aptitud física de suelos de Pampa Ondulada para ser manejados con siembra directa continúa. Tesis Magister. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 127 pp.

- Micucci F. and Taboada M. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 86: 152-162.
- Miller R.M. and Jastrow J.D. 1990. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology and Biochemistry*. 22: 579-584.
- Miretti M.C., Imhoff S., Silva A.P. and Lavado S.R. 2010. Soil structure degradation in patches of alfalfa fields in Santa Fe. *Scientia Agrícola* 67: 604-610.
- Miretti M.C., Pilatti M.A., Lavado S.R. y Imhoff S. 2012. Historia de uso del suelo y contenido de micronutrientes en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Ciencia del Suelo* 30: 67-73.
- Monnier G. 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques* 16: 327-400.
- Mullins C.E. and Panayiotopoulos K.P. 1984. The strength of unsaturated mixture of sand and kaolin and the concept of effective stress. *Journal of Soil Science* 35: 459-468.
- Mulumba L.N. and Lal R. 2008. Mulching effects on select soil properties. *Soil and Tillage Research* 98: 106-111.
- Novelli L.E. 2013. Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. Tesis Doctorado. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 127 pp.
- Oades J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76: 319-337.
- Oades J.M. and Waters A.G. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research* 29: 815-828.
- Oades J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Pecorari C., Guerif J. y Stengel P. 1990. Fitolitos en los suelos pampeanos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo* 8: 135-141.
- Pilatti M.A., Imhoff S., Ghiberto P. and Marano R. 2006. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Plante A.F. and Mc Gill W.B. 2002. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil and Tillage Research* 66: 79-92.
- Puget P., Angers D.A. and Chenu C. 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 55-63.
- Puget P., Chenu C. and Balensdent J. 2000. Dynamics of soil organic matter associated whit particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science* 51: 595-601.
- Puget P. and Drinkwater L.E. 2001. Short-term dynamics of root-and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Science Society of America Journal* 65: 771-779.
- Rillig M., Wright S. and Eviner V. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil* 238: 325-333.

- Rillig M. 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters* 7: 740-754.
- Rillig M. 2005. A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency?. *Pedobiologia* 49: 395-399.
- Rillig M. and Mummey D. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* 171: 41-53.
- Rubio G., Mosca C., Varela M.F., Scianca C. y Taboada M.A. 2012. Estructura de suelos arenosos bajo cultivos de cobertura. *Memoria Técnica INTA 2011-2012*: 43-47.
- Sasal M.C., Andriulo A. and Taboada M.A. 2006. Soil porosity characteristics on water dynamics under direct drilling in Argiudolls of the Argentinean Rolling Pampas. *Soil and Tillage Research* 87: 9-18.
- Senigagliales C. and Ferrari M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. En: *International Crop Science I*. Buxton D.R., Shibles R., Forsberg R.A. Blad B.L., Asay K.H., Paulsen G.M. and Wilson R.F., (ed.). Crop Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, pp. 27-35.
- Singhy B. and Malhi S.S. 2006. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. *Soil and Tillage Research* 85: 143-153.
- Six J., Elliott E.T., Paustian K. and Doran J.W. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America* 62: 1367-1377.
- Six J., Elliott E.T. and Paustian K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 2099-2103.
- Six J., Bossuyt H., De Gryze S. and Denef K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7-31.
- Solbrig O.T. and Viglizzo E.F. 1999. Sustainable farming in the Argentine pampas: history, society, economy and ecology. Paper No. 99/00-1, DRCLAS (Working papers on Latin America), Harvard University, Cambridge, MA, pp. 40.
- Spohn M. and Giani L. 2011. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1081-1088.
- Steinbach H.S. y Álvarez R. 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana?. *Informaciones Agronómicas* 33: 7-12.
- Taboada M.A., Cosentino D.J., Micucci F.G. and Lavado R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research* 49: 57-63.
- Taboada M., Barbosa O., Rodríguez M. and Cosentino D. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.
- Taboada M.A., Barbosa O.A. and Cosentino D.J. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loamy soils. *Journal of Soil Science* 173: 130-142.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1979. Stabilization of soil aggregates by the roots systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research* 17: 429-441.

- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science* 62: 141-163.
- Utomo W.H. and Dexter A.R. 1981. Soil friability. *Journal of Agricultural Engineering Research* 32: 203-213.
- Viglizzo E.F., Carreño L.V., Pereyra H., Ricard F., Clatt J. y Pincén D. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental*. Viglizzo, E.F. y Jobbágy, E., (ed.). Ediciones INTA, Buenos Aires, pp. 9-17.
- Wall L.G. 2011. The BIOSPAS consortium. En: *Handbook of molecular microbial ecology I*. de Bruijn, F.J., (ed.). Wiley-Blackwell, New Jersey, pp. 299-306.
- Watts C.W. and Dexter A.R. 1998. Soil Friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science* 49: 73-84.
- Whalley W.R., Leeds-Harrison P.B., Clark L.J. and Gowing D.J. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 84: 18-27.
- Wolf D.C. and Wagner G.H. 1999. Carbon transformations and soil organic matter formation. En: *Principles and applications of soil microbiology*. Sylvia, D.M., Fuhrmann, J.J., Hartel, P.G. and Zuberer, D.A., (eds.). Pearson Prentice Hall, New Jersey, pp. 285-332.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. 1996. Extraction of and abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Soil Science* 161: 575-586.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.
- Wright S.F., Starr J.L. and Paltineanu I.C. 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal* 63:1825-1829.
- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *American Society of Agronomy* 28: 337-351.

IMPACTO DE LOS SISTEMAS RADICALES Y DE RESIDUOS DE COSECHA SOBRE AGENTES DE AGREGACIÓN EN SUELOS DE TEXTURA CONTRASTANTE

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la extensión de la agricultura hacia áreas de menor aptitud agrícola, el incremento en la frecuencia del cultivo de soja y prolongados períodos de barbecho invernal se han convertido en un escenario común de los sistemas agrícolas actuales de la provincia de Santa Fe. El cultivo de soja provee una limitada cantidad de residuos de cosecha con una baja calidad (Wright y Hons, 2004), lo que promueve una rápida degradación de los residuos y afecta de manera negativa diversas propiedades del suelo en comparación con sistemas de cultivos más balanceados en su composición (Studdert y Echeverría, 2000).

Los suelos de la provincia de Santa Fe manifiestan degradación de sus propiedades químicas y físicas (Santanatoglia y Fernández, 1983; Pilatti *et al.*, 2006; Carrizo *et al.*, 2011; Miretti *et al.*, 2012). Esto tiene consecuencias negativas directas sobre la captación y movimiento del agua en el suelo y en su capacidad de aeración, además de aumentar la resistencia mecánica del suelo (Imhoff *et al.*, 2010). En este tipo de suelos, el COS y los procesos biológicos constituyen los principales agentes de unión y de estabilización de los agregados (Puget *et al.*, 1995; Six *et al.*, 2004; Bronick y Lal, 2005). Tisdall y Oades (1982) clasificaron a los agentes de agregación en persistentes (sustancias húmicas), transitorios (polisacáridos derivados de plantas y microorganismos) y temporarios (hifas fúngicas, raíces finas). Dada la importancia de

estos agentes sobre la estructura, la generación de información sobre las prácticas de manejo que permitan aumentar la presencia de estos agentes en el suelo resulta útil para recuperar la estructura degradada.

Las prácticas de manejo de los suelos y de los cultivos que reducen el COS, como labranza y monocultivo, tienden a degradar la estructura mientras que prácticas como la siembra directa, las rotaciones y la intensificación de las secuencias de cultivos tienen efectos positivos sobre el COS y la agregación (Studdert y Echeverría, 2000; Bronick y Lal, 2005; Six *et al.*, 1999; Six *et al.*, 2002; Varela *et al.*, 2011). Esto sugiere que los sistemas de manejo que conserven el COS y que introduzcan continuamente en el sistema un gran volumen de material orgánico (residuos y raíces) resultan fundamentales (Portella *et al.*, 2012) ya que la naturaleza y la cantidad de agentes de agregación presentes en un suelo dependen de estas variables y tienen una importancia clave en la formación y en la estabilización de los agregados.

La adición de residuos orgánicos (*e.i.* residuos de cosecha) constituye una fuente importante de COP, estimula la actividad microbiana del suelo que produce diversos agentes de agregación, como polisacáridos extracelulares y lípidos (Golchin *et al.*, 1994; Gale *et al.*, 2000; Abiven *et al.*, 2007) y también hifas fúngicas que mediante el entrelazado de las partículas y microagregados favorecen diversos mecanismos de unión de las partículas del suelo y la estabilización de los agregados formados (Tisdall y Oades, 1982; Rillig y Mummey, 2006). Dentro de la comunidad microbiana los hongos tienen un rol clave en la agregación (Tisdall y Oades, 1982). Wright y Upadhyaya (1996) proponen que una glicoproteína secretada por los hongos micorrízicos arbusculares, denominada glomalina, actúa como un agente estabilizante de las partículas al promover la formación de complejos órgano-minerales y al preservar el COS. Estudios recientes han descrito a la glomalina como un componente primario del suelo para la formación y la mantención de la estructura del suelo (Rillig *et al.*, 2002; Emran *et al.*, 2012).

Por otra parte, las plantas a través de sus raíces también afectan la formación y la ruptura de agregados mediante un conjunto de mecanismos físicos, químicos y biológicos (Degens,

1997). Los efectos físicos de las raíces son evidentes a través del enredo de las partículas, penetración radicular y por los ciclos de humedecimiento y secado (Materechera *et al.*, 1994; Jastrow *et al.*, 1998; Deneff *et al.*, 2002). Además de estos efectos físicos, las plantas producen exudados radiculares y estimulan la actividad microbiana responsable de la síntesis de polímeros que actúan como agentes de unión (Tisdall y Oades, 1979; Jastrow *et al.*, 1998; Six *et al.*, 2002). Por último, las raíces constituyen una fuente de entrada de carbono y pueden promover la agregación del suelo a medida que se descomponen. Angers y Caron (1998) indican que el secado del suelo producido por las raíces puede actuar sinérgicamente con los agentes de unión producidos en la rizósfera y favorecer la unión de partículas y agregados.

Numerosos estudios reportaron el impacto de la adición de residuos de cosecha y del crecimiento de las plantas sobre diferentes agentes orgánicos de agregación (contenido de carbohidratos, actividad fúngica, COP). Estos experimentos se han llevado a cabo para evaluar el impacto de diferentes cantidades (De Gryze *et al.*, 2005; Cosentino *et al.*, 2006), calidades de residuos (Martens, 2000; Abiven *et al.*, 2007), o la acción de los sistemas radiculares (Materechera *et al.*, 1994; Taboada *et al.*, 2004; Deneff y Six, 2005; Martins *et al.*, 2009) sobre la producción de agentes agregantes. En general, los resultados mostraron que la adición de residuos de cosecha y el crecimiento de las plantas produjo un incremento de la actividad microbiana, resultando en aumento de las hifas fúngicas y en el contenido de polisacáridos.

Mientras que la mayoría de las investigaciones se ha focalizado en la evaluación de la cantidad y calidad de los residuos que retornan al suelo y/o en el crecimiento de las plantas, el estudio del impacto de estos factores en forma conjunta sobre la producción de agentes de agregación no ha sido estudiada en suelos con altos contenidos de limo y cantidades variables de arcilla cultivados en sistemas de siembra directa. Esta temática tiene una trascendencia importante en los actuales sistemas agrícolas, los cuales presentan elevados períodos de barbechos y sistemas agrícolas continuos con predominancia de soja. El conocimiento del impacto de la adición de residuos y del crecimiento de las plantas sobre los agentes de agregación, en suelos donde los mecanismos bióticos de agregación tienen primordial relevancia, permitirá

conocer el efecto de las prácticas de manejo sobre su producción ante cambios en las tasas de ingreso de residuos de cosecha al suelo y en la presencia de raíces activas.

El objetivo del presente capítulo fue evaluar el efecto del crecimiento de las plantas en combinación con la adición de diversas calidades, cantidades y posición de residuos de cosecha sobre la producción de diversos agentes de agregación en suelos que poseen contenidos de carbono y textura contrastante.

MATERIALES Y MÉTODOS

SITIOS DE ESTUDIO Y MUESTREO DE SUELOS

Los suelos utilizados en este estudio fueron un Argiudol típico (serie Esperanza) y un Hapludol típico (serie Santa Isabel), que se encuentran en el centro ($31^{\circ}26'8''\text{S}$, $60^{\circ}56'43''\text{O}$) y sur ($33^{\circ}53'2''\text{S}$, $61^{\circ}44'58''\text{O}$) de la provincia de Santa Fe, Argentina (Fig. 2.1). El clima del área es templado húmedo de llanura con precipitaciones anuales medias de 900 a 1200 mm y una temperatura promedio anual de 18°C (Mosconi *et al.*, 1981). Estos suelos han sido sometidos a rotaciones agrícolas-ganaderas y agrícolas respectivamente y en los últimos años con agricultura bajo siembra directa con una rotación basada en trigo (*Triticum aestivum* L.), soja [*Glycine max* (L.) Merrill], y maíz (*Zea mays* L.).



Fig. 2.1. Localización geográfica de los suelos estudiados.

En cada localidad, las muestras de suelo ($n = 20$) se extrajeron de la capa superficial (0-20 cm). Este trabajo se llevó a cabo de forma manual, utilizando una pala, para no perturbar la estructura natural del suelo. La vegetación y los residuos superficiales fueron retirados antes

del muestreo. Las muestras de suelo fueron colocadas en bolsas y se enviaron al laboratorio. El contenido promedio de humedad al momento del muestreo fue de $0,17 \text{ g g}^{-1}$. Inmediatamente, el suelo se desmenuzó manualmente siguiendo los planos de ruptura natural, se dejó secar lentamente al aire y se pasó a través de un tamiz para la obtención de agregados de suelo inferiores a 2 mm. Luego, la mayor parte de este material fue mezclado para obtener una muestra compuesta de cada suelo que se utilizó para preparar el experimento. Este procedimiento permite evaluar la formación y estabilización de los agregados del suelo, y el uso de una estructura de suelo controlada inicialmente evita la confusión con la desagregación previa proveniente del campo o durante el procedimiento de muestreo y acondicionamiento (Le Bissonnais, 1996).

Una sub-muestra de cada muestra compuesta fue empleada para medir: distribución del tamaño de partícula (Gee y Or, 2002), carbono orgánico total (COT, g kg^{-1}) estimada a partir de carbono fácilmente oxidable (IRAM-SAGPyA 29571-2, 2007), reacción del suelo (pH) por el método potenciométrico en relación suelo-agua 1:2,5 (SAMLA, 2004), conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1}) en el extracto de saturación (SAMLA, 2004) y capacidad de intercambio catiónica (CIC, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) por extracción con acetato de amonio 1N pH 7 y post-determinación del amonio por destilación Kjeldahl (SAMLA, 2004). Los resultados analíticos de las dos series de suelo empleadas se encuentran en la Tabla 2.1.

DISEÑO Y TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES

Dos experimentos independientes se llevaron a cabo en forma simultánea en invernadero, uno para cada tipo de suelo (Tabla 2.2). Los experimentos fueron conducidos bajo condiciones controladas de temperatura ($10\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$) y humedad ($50\text{-}80 \%$). Las muestras compuestas, constituidas por agregados menores a 2 mm, fueron colocadas en macetas de 5 L de capacidad, con una densidad aproximada de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$. Los siguientes tratamientos se llevaron a cabo por triplicado: (i) crecimiento de plantas (con y sin crecimiento de cultivo de trigo); (ii) adición de residuos de cosecha (con y sin adición de residuos); (iii) calidad de residuos (residuos de trigo

vs soja); (iv) dosis de residuos (2000 y 5000 kg de materia seca ha⁻¹ para trigo y 2000 y 6000 kg de materia seca ha⁻¹ para soja) y (v) ubicación de residuos (superficial vs incorporado) (Tabla 2.2).

Tabla 2.1. Caracterización física y química de los sitios de estudio.

	Hapludol típico serie Santa Isabel	Argiudol típico serie Esperanza
Granulometría		
Arcilla (%)	16	24
Limo (%)	43	71
Arena (%)	41	5
COT (g kg ⁻¹)	21,1	15,3
pH (suelo:agua 1;2,5)	5,9	6,1
CE (dS m ⁻¹)	0,7	0,8
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	16,4	15,5

COT, carbono orgánico total; CE, conductividad eléctrica; CIC, capacidad de intercambio catiónica.

En los tratamientos con plantas, se permitió el crecimiento de cuatro plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) por maceta y todos los nutrientes necesarios fueron adicionados con solución Hoagland (Hoagland y Arnon, 1950). En los tratamientos con residuos se utilizaron residuos de soja y trigo y se cortaron en trozos de aproximadamente 1 cm de longitud. Las dosis aportadas fueron en una cantidad equivalente a 2000 y 5000 kg materia seca ha⁻¹ para trigo y 2000 y 6000 kg materia seca ha⁻¹ para soja previo a la siembra de las semillas. De acuerdo con la ubicación de los residuos, se dejaron sobre la superficie del suelo o fueron mezclados manualmente con los primeros 10 cm de suelo.

La totalidad de las macetas fueron sometidas a ciclos de humedecimiento y secado, variando el contenido hídrico entre la humedad que correspondía a 10% de aeración y a un tercio del

contenido total de agua a capacidad de campo. La reposición de la humedad se realizó con agua desmineralizada o solución Hoagland hasta llegar al valor establecido.

Cuando las plantas alcanzaron la senescencia (día 112) fue concluido el experimento, para evitar una significativa descomposición radical (Denef y Six, 2005). La parte aérea de las plantas fue cortada para permitir el secado del suelo al aire hasta que la humedad del suelo alcance un valor aproximado de 20%. Los primeros diez centímetros de cada maceta fueron extraídos y desmenuzados cuidadosamente con las manos por sus planos de ruptura natural. En primer lugar, el suelo fue tamizado para obtener una cantidad adecuada de los agregados de entre 3 y 5 mm. Luego, la materia orgánica gruesa (raíces libres y restos vegetales) fue eliminada y las muestras de suelo fueron nuevamente tamizadas para obtener distintas fracciones: agregados mayores a 2 mm, macro (2000-250 μm) y microagregados (250-53 μm) para cada una de las determinaciones químicas.

DETERMINACIONES DE PARÁMETROS QUÍMICOS DE SUELO

El COT fue estimado por triplicado a partir del carbono fácilmente oxidable con un factor de recuperación de 0,77 (IRAM-SAGPyA 29571-2, 2007). Este método consiste en una oxidación del carbono orgánico por vía húmeda mediante exceso de dicromato potásico y un calentamiento espontáneo por adición de ácido sulfúrico. Finalmente se valora el cromo reducido a Cr^{3+} por titulación con una sal ferrosa. Paralelamente se desarrollan dos soluciones de ensayo en blanco siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

El fraccionamiento del COP se llevó a cabo mediante el método descrito por Irizar *et al.* (2010). Para ello se agitan 40 g de suelo con 200 mL de agua destilada y 5 bolitas de vidrio durante 5 horas a 40 rpm. La suspensión es tamizada a través de un tamiz con malla de 53 μm de diámetro haciendo movimientos de vaivén hasta que el agua de salida a través del mismo resultase límpida. El material conservado en el tamiz fue se secado a 105 °C hasta peso cons-

tante y pesado. Posteriormente en esa masa de suelo se determinó el contenido de carbono orgánico según IRAM-SAGPyA 29571-2, (2007).

Tabla 2.2. Resumen de los diferentes tratamientos del ensayo experimental.

Código del tratamiento	Crecimiento de plantas	Adición de residuos		
	Aporte	Calidad	Dosis (kg ha ⁻¹)	Posición
+pl –res		no		
+pl trigo bajo inc			2000	incorporado
+pl trigo alto inc		trigo	5000	
+pl soja bajo inc			2000	
+pl soja alto inc	si	soja	6000	
+pl trigo bajo sup		si	2000	superficial
+pl trigo alto sup		trigo	5000	
+pl soja bajo sup			2000	
+pl soja alto sup		soja	6000	
-pl –res		no		
-pl trigo bajo inc			2000	incorporado
-pl trigo alto inc		trigo	5000	
-pl soja bajo inc			2000	
-pl soja alto inc	no	soja	6000	
-pl trigo bajo sup		si	2000	superficial
-pl trigo alto sup		trigo	5000	
-pl soja bajo sup			2000	
-pl soja alto sup		soja	6000	

+pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

El contenido de carbohidratos fue determinado por triplicado en cada muestra a partir de 1 g de suelo en macro y microagregados usando el procedimiento ácido sulfúrico-fenol (Dubois *et al.*, 1956). Los carbohidratos solubles en agua caliente (CHag) fueron digeridos con 10 mL de agua destilada a 80°C durante 24 h. Los carbohidratos solubles en ácido diluído (CHac) fueron extraídos a partir de la hidrólisis del suelo con 10 mL de H₂SO₄ 0,5 M a 80°C durante 24 h. Los carbohidratos totales (CHt) fueron obtenidos de una hidrólisis ácida concentrada que consiste en tratar el suelo con 2 ml de H₂SO₄ 12 M durante 16 h a temperatura ambiente. Posteriormente, esta mezcla fue diluida hasta obtener una concentración de H₂SO₄ 1 M y fue colocada en estufa de cultivo a 100°C por 5 h (Puget *et al.*, 1999). Los carbohidratos en la hidrólisis fueron medidos por colorimetría con soluciones de glucosa como estándares.

Las fracciones de glomalina son obtenidas mediante extracciones con alta temperatura y los extractos no son completamente puros, por ello han sido operacionalmente definidas como aquellas proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble (PSRG-FE) (Wright y Upadhyaya, 1996, 1998). Es recomendable esta denominación, ya que su cuantificación con el método de Bradford permite detectar proteínas derivadas desde diferentes fuentes, ya que no constituye una prueba específica. Ambas fracciones fueron extraídas del suelo en macro y microagregados por triplicado usando el procedimiento descrito por Wright y Upadhyaya (1996) mediante una extracción con citrato de sodio en autoclave a 121°C. La fracción total (PSRG) fue extraída realizando 4 ciclos de autoclavado por 60 minutos con citrato 50 mM pH 8,0 y posterior centrifugado a 10000 g durante 20 minutos. Mientras que la fracción fácilmente extraíble (PSRG-FE) fue extraída utilizando citrato 20 mM pH 7,0 autoclavado durante 30 minutos y centrifugado a 10000 g durante 20 minutos. Los sobrenadantes fueron acumulados y almacenados a 4 °C hasta su análisis. La cuantificación de PSRG y PSRG-FE se realizó espectrofotométricamente con la metodología de medición de proteína total de Bradford utilizando albúmina bovina como estándar (Wright *et al.*, 1999).

El análisis de estadístico se realizó utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013). Los efectos de los tratamientos se evaluaron mediante ANOVA y la comparación de medias mediante el Test de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Por otro lado, cuando se observó un efecto significativo de los tratamientos sobre los agentes de agregación se realizaron contrastes ortogonales para evaluar el efecto del crecimiento de plantas, residuos de cosecha (dosis, calidad y ubicación) y la interacción « crecimiento de plantas x residuos de cosecha» sobre los agentes de agregación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARBONO ORGÁNICO TOTAL Y PARTICULADO DEL SUELO

El COT inicial fue 18,3 y 14,5 g kg⁻¹ en la serie Santa Isabel y Esperanza. Posterior al crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha los valores variaron entre 17,9 a 19,6 g kg⁻¹ y entre 16,1 a 18,5 g kg⁻¹ en cada serie de suelo respectivamente (Tabla 2.3). La serie Santa Isabel presentó valores de COT superiores a la serie Esperanza (Fig. 2.2).

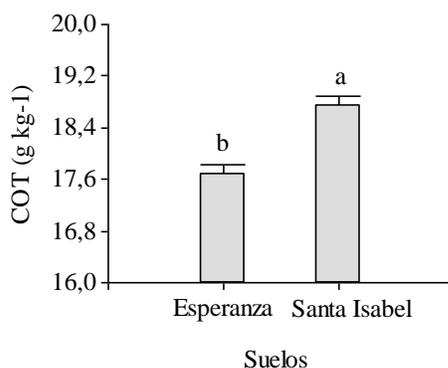


Fig. 2.2. Valor promedio de carbono orgánico total (COT, g kg⁻¹) en la serie Santa Isabel y Esperanza. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

En ninguna de las series de suelo hubo interacción significativa «crecimiento de plantas x residuos» sobre el COT, por lo que se analizaron los efectos principales. La serie Santa Isabel presentó diferentes valores de COT debido al crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha (Fig. 2.3 A y B). Similar tendencia fue observada en la serie Esperanza en la cual el crecimiento de plantas y la adición de residuos provocaron incrementos significativos del COT (Fig. 2.4 A y B). En relación a los residuos, en ambas series, la calidad, dosis y ubicación de los residuos adicionados no tuvieron efectos significativos sobre el COT (Fig. 2.5).

Tabla 2.3. Contenido promedio de carbono orgánico total (COT, g kg⁻¹), carbono orgánico particulado (COP, g kg⁻¹) después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Suelo	Santa Isabel		Esperanza	
	COT	COP	COT	COP
Tratamientos	(g kg ⁻¹)			
+pl -res	18,5±0,64	3,8±0,06	16,7±0,17	3,3±0,05
+pl soja bajo inc	19,0±0,23	4,2±0,03	18,2±0,15	3,5±0,12
+pl soja alto inc	19,5±0,46	5,1±0,08	18,5±0,49	3,9±0,10
+pl trigo bajo inc	18,9±0,22	4,5±0,03	18,2±0,09	3,6±0,15
+pl trigo alto inc	19,2±0,26	5,2±0,11	18,5±0,23	4,0±0,08
+pl soja bajo sup	19,1±0,33	4,6±0,03	18,1±0,50	3,7±0,03
+pl soja alto sup	19,6±0,12	5,0±0,10	18,3±0,30	4,1±0,09
+pl trigo bajo sup	19,1±0,27	4,4±0,04	17,9±0,05	3,7±0,03
+pl trigo alto sup	19,6±0,32	5,2±0,11	18,5±0,03	3,9±0,04
-pl -res	17,9±0,23	3,3±0,04	16,1±0,06	2,9±0,03
-pl soja bajo inc	18,1±0,49	4,0±0,12	17,3±0,10	3,1±0,08
-pl soja alto inc	18,4±0,15	4,8±0,03	17,6±0,15	3,5±0,08
-pl trigo bajo inc	18,1±0,55	4,2±0,11	17,5±0,09	3,1±0,05
-pl trigo alto inc	18,5±0,26	4,7±0,07	17,3±0,33	3,4±0,02
-pl soja bajo sup	18,8±0,15	4,2±0,09	17,1±0,64	3,1±0,05
-pl soja alto sup	18,6±0,55	4,9±0,05	17,4±0,07	3,7±0,02
-pl trigo bajo sup	18,2±0,27	4,2±0,05	17,2±0,18	3,1±0,08
-pl trigo alto sup	18,5±0,10	4,7±0,10	17,6±0,10	3,2±0,04

Valores expresados en g kg⁻¹. Valores medios ± error estándar de la media (n=3). +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

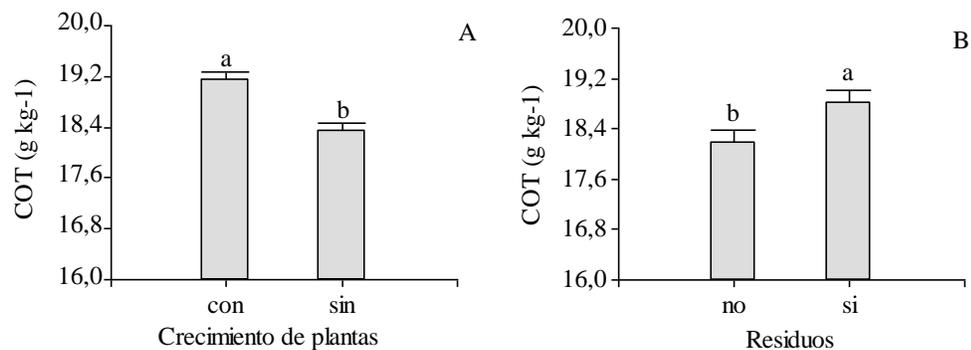


Fig. 2.3. Valor promedio de carbono orgánico total (COT, g kg⁻¹) en la serie Santa Isabel por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

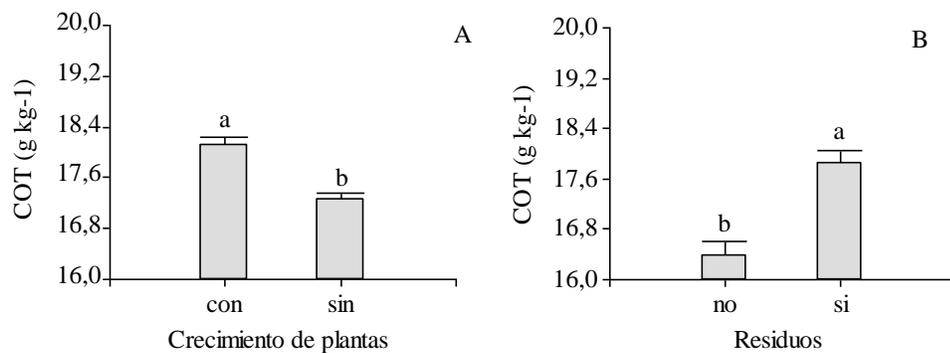


Fig. 2.4. Valor promedio de carbono orgánico total (COT, g kg⁻¹) en la serie Esperanza por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

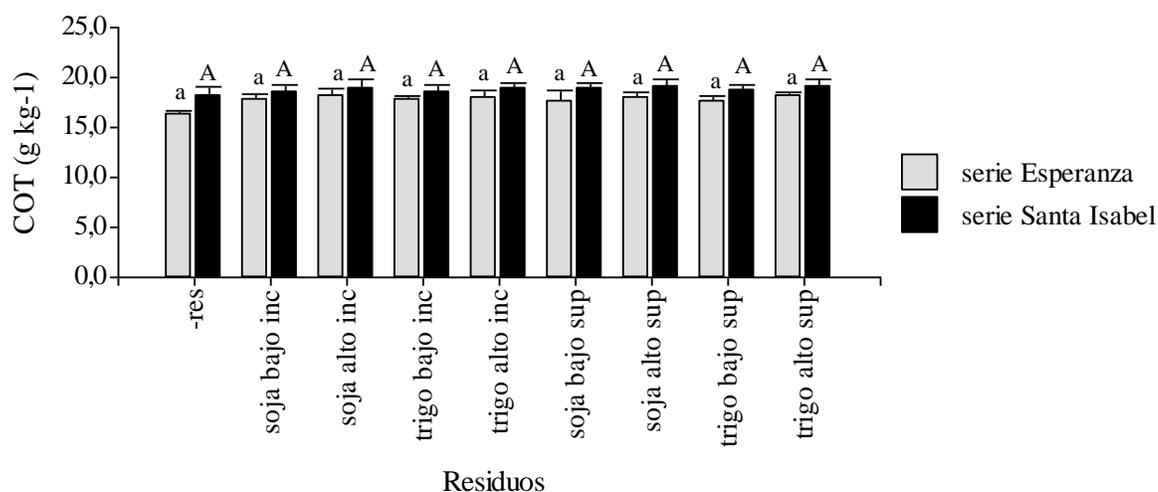


Fig. 2.5. Valores promedio de carbono orgánico total (COT, g kg^{-1}) por efecto de la adición de residuos de cosecha (calidad, dosis y ubicación). Letras minúsculas distintas indican diferencias entre tratamientos en la serie Esperanza. Letras mayúsculas distintas indican diferencias entre tratamientos en la serie Santa Isabel (Test de Tukey, $\alpha = 0,05$).

El COP inicial fue superior en la serie Santa Isabel respecto de la serie Esperanza (Fig. 2.6). Los valores COP de variaron entre 3,3 a 5,2 g kg^{-1} y entre 2,9 a 4,1 g kg^{-1} en la serie Santa Isabel y Esperanza respectivamente por el crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha (Tabla 2.3). Hubo interacción entre el crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha la cual resultó similar en ambas series de suelo. En los tratamientos sin crecimiento de plantas el aporte de residuos permitió incrementar 0,71 g kg^{-1} la concentración de COP, mientras que en los tratamientos con crecimiento de plantas el incremento fue de 0,74 g kg^{-1} .

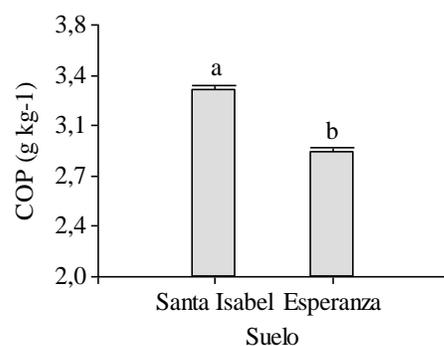


Fig. 2.6. Valor promedio inicial de carbono orgánico particulado (COP, g kg⁻¹) en la serie Santa Isabel y Esperanza. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

Por otra parte, el efecto principal del crecimiento de plantas fue diferente en cada serie de suelo. En la serie Santa Isabel, el crecimiento de plantas tuvo un efecto significativo y permitió incrementar 0,33 g kg⁻¹ el contenido de COP mientras que en la serie Esperanza la magnitud del incremento fue superior (0,52 g kg⁻¹).

El efecto global de la adición de residuos de cosecha fue diferente en las series de suelo. En contraste al crecimiento de plantas, en la serie Santa Isabel la adición de residuos permitió un incremento de 1,03 g kg⁻¹ y en la serie Esperanza de 0,42 g kg⁻¹ (Tabla 2.4). A su vez, en la serie Santa Isabel se detectaron diferencias en el contenido de COP por la dosis de los residuos adicionados, sin embargo la calidad y la ubicación no mostraron efectos significativos (Tabla 2.4). El mayor volumen de residuos, independientemente de su calidad y ubicación, permitió obtener mayores valores de COP en comparación con los tratamientos que recibieron la menor dosis de residuos. Similares resultados fueron obtenidos en la serie Esperanza, aunque el efecto de la dosis fue de menor magnitud (0,19 g kg⁻¹ vs 0,33 g kg⁻¹).

Tabla 2.4. Contrastes ortogonales para la variable carbono orgánico particulado (COP, g kg⁻¹) después de aplicar diferentes tratamientos de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Contrastes	Serie Santa Isabel		Serie Esperanza	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
-res vs +res	1,03	<0,0001	0,42	<0,0001
soja vs trigo	-0,02	0,2105	0,03	0,0846
alta vs baja	0,33	<0,0001	0,19	<0,0001
inc. vs sup.	-0,03	0,0509	-0,01	0,3522

La cantidad de residuos aéreos que retornan al suelo y la influencia de los sistemas radicales contribuyen marcadamente sobre la cantidad y la dinámica del carbono orgánico lábil del suelo (Gregorich *et al.*, 1994; Puget y Drinkwater, 2001). Los resultados alcanzados coinciden con los reportados Janzen *et al.* (1992), quienes encontraron un mayor contenido de COP en sistemas de cultivo perenne o en sistemas de cultivo permanente que en sistemas con alta frecuencia de barbecho estival.

El COP está compuesto por residuos de plantas frescos parcialmente descompuestos y es considerada una reserva en continua descomposición entre los residuos orgánicos que ingresan al suelo y el carbono orgánico humificado (Gregorich y Janzen, 1996). El COP mostró cambios y refleja mejor que el COT las variaciones experimentadas por el suelo en función de los diferentes tratamientos aplicados. Este comportamiento pone de manifiesto que el COP, a diferencia del COT, resulta un indicador más sensible de los efectos de las prácticas agronómicas sobre la dinámica del carbono en el suelo. Resultados semejantes fueron obtenidos por Janzen *et al.* (1992) y Haynes (2000, 2005) quienes manifestaron que las fracciones livianas fueron las que mejor representaron las variaciones causadas por las diferentes prácticas de manejo. Gregorich *et al.* (1994) indican que esta fracción, al responder a los sistemas de manejo y de cultivo, resulta un indicador de la calidad de la materia orgánica en los suelos agrícolas.

FRACCIONES DE CARBOHIDRATOS Y CONCENTRACIÓN EN DISTINTOS TAMAÑOS DE AGREGADOS

Los resultados de la Tabla 2.5 muestran la concentración promedio inicial de carbohidratos en los macro y microagregados en cada serie de suelo. En líneas generales, la concentración de carbohidratos en la serie Esperanza fue menor que en la serie Santa Isabel. En todos los casos las fracciones de carbohidratos recuperados se incrementaron con la intensidad de la hidrólisis (CHt > CHac > CHag). La distribución de carbohidratos entre las distintas fracciones fue similar a la encontrada por otros autores (Puget *et al.*, 1999; Martins *et al.*, 2009), aunque los contenidos y los rangos de variación en este estudio fueron inferiores.

Tabla 2.5. Contenido promedio inicial (mg C kg suelo⁻¹) de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt) en macro y microagregados en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Fracciones de carbohidratos	Serie de suelo	
	Santa Isabel	Esperanza
Macroagregados		
CHag	25,6 cA	20,5 cB
CHac	615,0 bA	603,6 bA
CHt	1013,9 aA	849,6 aB
Microagregados		
CHag	18,9 cA	16,3 cB
CHac	627,7 bA	426,3 bB
CHt	824,7 aA	549,1 aB

Letras minúsculas distintas indican diferencias entre fracciones dentro de cada serie de suelo y tamaño de agregado. Letras mayúsculas distintas indican diferencias entre series de suelo en cada fracción y tamaño de agregado. Test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

El contenido promedio de las distintas fracciones de carbohidratos en los macro y microagregados por el crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza se muestran en las Tablas 2.6 a 2.9.

En las diferentes fracciones de carbohidratos de los macro y microagregados hubo interacción entre el crecimiento de plantas y la adición de residuos y el efecto de los factores fue diferente en las series de suelo. El crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha permitieron generar en la serie Esperanza una concentración superior de CHag en los macroagregados respecto de la serie Santa Isabel (32,3 vs 14,8 mg C kg suelo⁻¹) mientras que en los microagregados la interacción tuvo un efecto similar en ambas series (serie Santa Isabel: 56,7 mg C kg suelo⁻¹; serie Esperanza: 50,0 mg C kg suelo⁻¹). En la fracción de CHac en los macroagregados el efecto del crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha tuvo una magnitud similar, y en los microagregados el efecto fue superior en la serie Santa Isabel (1497,0 vs 647,7 mg C kg suelo⁻¹). En los CHt en los macroagregados dichos efectos fueron mayores en la serie Santa Isabel (1118,3 mg C kg suelo⁻¹) que en la serie Esperanza (898,0 mg C kg suelo⁻¹). Por su parte, en los microagregados los efectos resultaron inversos (1238,3 mg C kg suelo⁻¹ en la serie Esperanza y 259,3 mg C kg suelo⁻¹ en la serie Santa Isabel). La inclusión de residuos de cosecha y el activo crecimiento de las raíces de las plantas causó incrementos en la concentración de las diferentes fracciones de carbohidratos con efectos variables en los macro y microagregados y en las diferentes texturas de suelo.

Tabla 2.6. Contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en macroagregados después de aplicar tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.

Macroagregados (2000-250 μ m)							
Tratamientos	CHag	CHac	CHt	Tratamientos	CHag	CHac	CHt
+pl -res	33,66 \pm 0,35	1053 \pm 7,31	1203 \pm 6,01	-pl -res	28,13 \pm 0,32	636 \pm 4,67	1060 \pm 12,44
+pl soja bajo inc	39,43 \pm 0,37	1102 \pm 1,00	1352 \pm 19,91	-pl soja bajo inc	37,33 \pm 0,22	1140 \pm 20,73	1175 \pm 11,93
+pl soja alto inc	64,69 \pm 0,26	1291 \pm 7,67	1431 \pm 15,60	-pl soja alto inc	58,26 \pm 0,41	1186 \pm 6,74	1282 \pm 7,55
+pl trigo bajo inc	37,50 \pm 0,35	1088 \pm 1,86	1369 \pm 12,77	-pl trigo bajo inc	35,02 \pm 0,13	767 \pm 17,21	1069 \pm 4,04
+pl trigo alto inc	54,41 \pm 0,43	1151 \pm 9,53	1471 \pm 10,71	-pl trigo alto inc	50,50 \pm 0,17	1174 \pm 3,18	1266 \pm 6,51
+pl soja bajo sup	42,69 \pm 0,41	1251 \pm 3,71	1484 \pm 5,21	-pl soja bajo sup	41,43 \pm 0,57	1062 \pm 6,11	1336 \pm 7,09
+pl soja alto sup	44,21 \pm 0,72	1387 \pm 4,98	1476 \pm 7,23	-pl soja alto sup	42,63 \pm 0,27	1087 \pm 7,57	1371 \pm 8,01
+pl trigo bajo sup	41,31 \pm 0,27	1122 \pm 5,51	1371 \pm 7,51	-pl trigo bajo sup	39,51 \pm 0,41	679 \pm 8,29	1277 \pm 9,02
+pl trigo alto sup	54,58 \pm 0,32	1262 \pm 14,18	1433 \pm 12,91	-pl trigo alto sup	53,73 \pm 0,23	737 \pm 15,34	1350 \pm 15,19

Valores expresados en mg C kg suelo⁻¹. Valores medios \pm error estándar de la media. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Tabla 2.7. Contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en microagregados después de aplicar tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.

Microagregados (53-250 μ m)							
Tratamientos	CHag	CHac	CHt	Tratamientos	CHag	CHac	CHt
+pl -res	36,03 \pm 0,35	991 \pm 4,70	1202 \pm 17,07	-pl -res	31,53 \pm 0,38	883 \pm 10,04	1088 \pm 10,49
+pl soja bajo inc	22,89 \pm 0,33	658 \pm 7,00	1163 \pm 9,84	-pl soja bajo inc	34,75 \pm 0,38	1080 \pm 6,81	1177 \pm 9,70
+pl soja alto inc	25,60 \pm 0,19	880 \pm 5,51	1109 \pm 7,51	-pl soja alto inc	35,77 \pm 0,25	1132 \pm 5,21	1276 \pm 8,35
+pl trigo bajo inc	38,51 \pm 0,38	826 \pm 2,91	859 \pm 6,74	-pl trigo bajo inc	37,46 \pm 0,17	972 \pm 8,29	1116 \pm 8,95
+pl trigo alto inc	26,30 \pm 0,47	643 \pm 4,98	1111 \pm 9,06	-pl trigo alto inc	50,23 \pm 0,11	1026 \pm 3,53	1250 \pm 11,37
+pl soja bajo sup	44,34 \pm 0,69	724 \pm 9,77	1076 \pm 7,54	-pl soja bajo sup	38,86 \pm 0,34	1007 \pm 2,96	1155 \pm 8,62
+pl soja alto sup	29,53 \pm 0,32	685 \pm 6,89	1139 \pm 6,44	-pl soja alto sup	31,01 \pm 0,12	1205 \pm 5,57	1088 \pm 11,85
+pl trigo bajo sup	28,17 \pm 0,56	798 \pm 0,88	1171 \pm 2,73	-pl trigo bajo sup	37,98 \pm 0,18	894 \pm 3,18	1118 \pm 29,38
+pl trigo alto sup	21,76 \pm 0,33	839 \pm 0,88	1032 \pm 5,36	-pl trigo alto sup	31,53 \pm 0,50	883 \pm 5,86	1188 \pm 8,82

Valores expresados en mg C kg suelo⁻¹. Valores medios \pm error estándar de la media. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Tabla 2.8. Contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en macroagregados después de aplicar tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.

Macroagregados (2000-250 μ m)							
Tratamientos	CHag	CHac	CHt	Tratamientos	CHag	CHac	CHt
+pl -res	21,70 \pm 0,75	757 \pm 14,25	1007 \pm 11,17	-pl -res	24,02 \pm 0,53	629 \pm 4,41	875 \pm 14,97
+pl soja bajo inc	41,13 \pm 0,53	882 \pm 5,61	1093 \pm 23,60	-pl soja bajo inc	35,17 \pm 0,46	774 \pm 11,29	992 \pm 6,89
+pl soja alto inc	43,41 \pm 0,44	1044 \pm 8,45	1334 \pm 6,69	-pl soja alto inc	36,87 \pm 0,61	845 \pm 8,72	1057 \pm 8,50
+pl trigo bajo inc	27,20 \pm 0,36	934 \pm 4,91	1004 \pm 4,93	-pl trigo bajo inc	21,61 \pm 0,32	687 \pm 11,46	959 \pm 7,86
+pl trigo alto inc	31,97 \pm 0,80	1002 \pm 11,46	1118 \pm 6,98	-pl trigo alto inc	29,61 \pm 0,81	839 \pm 5,70	1062 \pm 6,11
+pl soja bajo sup	28,82 \pm 1,00	884 \pm 4,91	1072 \pm 9,71	-pl soja bajo sup	23,10 \pm 0,55	692 \pm 8,25	975 \pm 5,24
+pl soja alto sup	34,30 \pm 0,49	954 \pm 5,81	1120 \pm 7,88	-pl soja alto sup	32,34 \pm 0,58	836 \pm 6,03	1008 \pm 5,69
+pl trigo bajo sup	21,38 \pm 0,45	778 \pm 11,05	1080 \pm 6,11	-pl trigo bajo sup	24,11 \pm 0,52	612 \pm 7,57	906 \pm 3,46
+pl trigo alto sup	24,00 \pm 0,78	1043 \pm 9,39	1169 \pm 6,12	-pl trigo alto sup	19,73 \pm 0,71	658 \pm 6,35	1017 \pm 10,07

Valores expresados en mg C kg suelo⁻¹. Valores medios \pm error estándar de la media. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Tabla 2.9. Contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en microagregados después de aplicar tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.

Microagregados (53-250 μ m)							
Tratamientos	CHag	CHac	CHt	Tratamientos	CHag	CHac	CHt
+pl -res	21,18 \pm 0,21	620 \pm 5,24	827 \pm 4,63	-pl -res	19,30 \pm 0,50	449 \pm 6,12	570 \pm 4,33
+pl soja bajo inc	30,77 \pm 0,46	644 \pm 9,61	1020 \pm 6,08	-pl soja bajo inc	21,30 \pm 0,51	604 \pm 3,18	570 \pm 5,81
+pl soja alto inc	33,54 \pm 0,59	642 \pm 5,13	1120 \pm 2,91	-pl soja alto inc	25,01 \pm 0,80	641 \pm 3,84	886 \pm 6,17
+pl trigo bajo inc	24,85 \pm 0,51	660 \pm 2,91	905 \pm 4,26	-pl trigo bajo inc	23,36 \pm 0,37	522 \pm 5,51	756 \pm 4,18
+pl trigo alto inc	31,20 \pm 0,49	712 \pm 4,73	979 \pm 4,91	-pl trigo alto inc	22,34 \pm 0,40	566 \pm 5,36	727 \pm 3,21
+pl soja bajo sup	22,79 \pm 0,84	637 \pm 4,58	1018 \pm 9,64	-pl soja bajo sup	20,43 \pm 0,24	511 \pm 2,73	812 \pm 3,48
+pl soja alto sup	23,51 \pm 0,45	750 \pm 1,45	972 \pm 3,21	-pl soja alto sup	19,18 \pm 0,90	599 \pm 4,70	836 \pm 7,54
+pl trigo bajo sup	27,67 \pm 3,68	542 \pm 4,10	952 \pm 2,40	-pl trigo bajo sup	20,51 \pm 0,61	504 \pm 3,28	786 \pm 6,12
+pl trigo alto sup	30,47 \pm 0,42	671 \pm 5,55	973 \pm 5,55	-pl trigo alto sup	20,83 \pm 1,11	489 \pm 6,12	887 \pm 6,94

Valores expresados en mg C kg suelo⁻¹. Valores medios \pm error estándar de la media. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

La Tabla 2.10 muestra que los CHag, CHac y CHt en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas (+pl y -pl) de la serie Santa Isabel presentan diferencias entre el tratamiento sin residuos y el promedio de los tratamientos que tuvieron aporte de residuos. En los tratamientos con y sin crecimiento de plantas se encontraron diferencias debido a la calidad de los residuos, excepto en los CHag de los macroagregados en los tratamientos sin plantas. En los macro y microagregados, la cantidad de carbohidratos recuperados fue superior cuando se aplicaron residuos de soja en comparación con residuos de trigo. En los tratamientos con y sin el crecimiento de plantas, las diferencias entre los tratamientos que recibieron dosis altas y bajas de residuos fueron marcadas; en ambos tamaños de agregados la adición de dosis altas de residuos presentó mayor concentración de CHag, CHac y CHt. En relación a la ubicación de los residuos, en los macroagregados, la incorporación de los residuos produjo mayor concentración de CHag (3,3 y 0,9 mg C kg suelo⁻¹) en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas. Un comportamiento opuesto se observó en los CHac y CHt, en los cuales las concentraciones recuperadas son mayores en los tratamientos con residuos ubicados superficialmente (valor negativo del contraste). En los microagregados, en los tratamientos con crecimiento de plantas, todas las fracciones fueron superiores cuando los residuos se incorporaron en el suelo. Una respuesta similar se manifestó en los tratamientos sin crecimiento de plantas en los CHag, mientras que en el resto de las fracciones los contrastes no resultaron significativos.

En la serie Esperanza, en ambos tamaños de agregados, todas las fracciones de carbohidratos en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas registraron menores concentraciones en los tratamientos sin adición de residuos (Tabla 2.11). Con relación a la calidad de los residuos, en los macroagregados en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas, aquellos tratamientos que recibieron residuos de soja presentaron valores superiores que los tratamientos con trigo, excepto los CHac y los CHt en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas. En los microagregados, la calidad de los residuos afectó solamente los CHac y CHt en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas. Los contrastes entre dosis altas y bajas de residuos también mostraron diferencias significativas en la concentración de carbohidratos recuperados; los tratamientos con adición de dosis altas de residuos presentaron concentraciones mayo-

res. Este comportamiento no fue significativo en los CHag en los tratamientos con crecimiento de plantas. En relación a la ubicación de los residuos, en los macroagregados en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas se observaron diferencias entre tratamientos en los CHag y CHac, siendo superior el tratamiento con residuos incorporados. Por el contrario, los CHt no manifestaron diferencias por la ubicación de los residuos. En los microagregados se registró una mayor concentración de CHag, CHac y CHt en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas con los residuos ubicados superficialmente (Tabla 2.11).

Los agregados de mayor tamaño contienen una concentración significativamente superior de CHag, CHac y CHt que los microagregados (Fig. 2.7 A, B y C). Estos mayores contenidos de carbohidratos en agregados mayores a 250 μm fueron encontrados en otros estudios (Puget et al., 1999; Liu et al., 2005; Martins et al., 2009; Spohn y Giani, 2011). Sin embargo, Spaccini et al. (2002) encontraron una acumulación preferencial en los pequeños agregados antes que en los macroagregados. La variación en los contenidos de polisacáridos en los distintos tamaños de agregados se puede deber a diferentes patrones de mineralización de los residuos de las plantas y de acumulación de los productos microbianos (Guggenberger et al., 1995), así como a una mayor presencia de hifas fúngicas y de pequeñas raíces en los macroagregados (Tisdall y Oades, 1982).

Tabla 2.10. Contrastes ortogonales de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en macroagregados y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.

Macroagregados						
Contrastes	CHag		CHac		CHt	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
<i>+pl</i>						
+res vs -res	13,7	<0,0001	153,5	<0,0001	220,0	<0,0001
soja vs trigo	0,8	0,0021	102,0	<0,0001	24,6	0,0027
alta vs baja	14,2	<0,0001	132,1	<0,0001	58,5	<0,0001
inc vs sup	3,3	<0,0001	-97,4	<0,0001	-35,2	<0,0001
<i>-pl</i>						
+res vs -res	16,7	<0,0001	342,7	<0,0001	205,9	<0,0001
soja vs trigo	0,2	0,3690	279,4	<0,0001	50,6	<0,0001
alta vs baja	12,9	<0,0001	134,4	<0,0001	102,9	<0,0001
inc vs sup	0,9	0,0004	-175,6	<0,0001	-135,3	<0,0001
Microagregados						
Contrastes	CHag		CHac		CHt	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
<i>+pl</i>						
+res vs -res	6,2	<0,0001	155,9	<0,0001	96,8	<0,0001
soja vs trigo	2,3	<0,0001	134,9	<0,0001	34,4	0,0075
alta vs baja	0,9	0,0004	100,4	<0,0001	87,4	<0,0001
inc vs sup	3,5	<0,0001	28,3	<0,0001	38,9	0,0028
<i>-pl</i>						
+res vs -res	6,7	<0,0001	108,8	<0,0001	264,8	<0,0001
soja vs trigo	1,7	<0,0001	60,3	<0,0001	57,5	<0,0001
alta vs baja	7,6	<0,0001	10,3	0,0183	52,7	<0,0001
inc vs sup	8,2	<0,0001	2,4	0,5636	28,8	0,0231

La magnitud del contraste indica el incremento en la concentración de carbohidratos en $\text{mg C kg suelo}^{-1}$ por efecto del residuo adicionado. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Tabla 2.11. Contrastes ortogonales de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag), en ácido diluido (CHac) y totales (CHt), en macroagregados y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.

Macroagregados						
Contrastes	CHag		CHac		CHt	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
<i>+pl</i>						
+res vs -res	9,8	<0,0001	183,6	<0,0001	116,4	0,0003
soja vs trigo	10,8	<0,0001	1,8	0,7741	61,9	0,0032
alta vs baja	3,8	<0,0001	140,9	<0,0001	123,6	<0,0001
inc vs sup	8,8	<0,0001	50,8	<0,0001	26,9	0,1784
<i>-pl</i>						
+res vs -res	3,5	<0,0001	113,6	<0,0001	121,3	<0,0001
soja vs trigo	8,1	<0,0001	87,6	<0,0001	21,9	0,2712
alta vs baja	3,6	<0,0001	103,3	<0,0001	77,9	0,0003
inc vs sup	5,9	<0,0001	87,1	<0,0001	41,3	0,0425
Microagregados						
Contrastes	CHag		CHac		CHt	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
<i>+pl</i>						
+res vs -res	6,9	<0,0001	36,7	<0,0001	165,8	<0,0001
soja vs trigo	0,9	0,2330	22,0	<0,0001	80,2	<0,0001
alta vs baja	3,2	<0,0001	73,1	<0,0001	37,2	<0,0001
inc vs sup	3,9	<0,0001	14,6	<0,0001	27,5	<0,0001
<i>-pl</i>						
+res vs -res	2,3	0,0031	105,4	<0,0001	235,9	<0,0001
soja vs trigo	-0,3	0,7070	68,4	<0,0001	33,0	<0,0001
alta vs baja	0,4	0,5539	38,8	<0,0001	56,7	<0,0001
inc vs sup	2,8	0,0006	57,3	<0,0001	49,3	<0,0001

La magnitud del contraste indica el incremento en la concentración de carbohidratos en mg C kg suelo⁻¹ por efecto del residuo adicionado. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

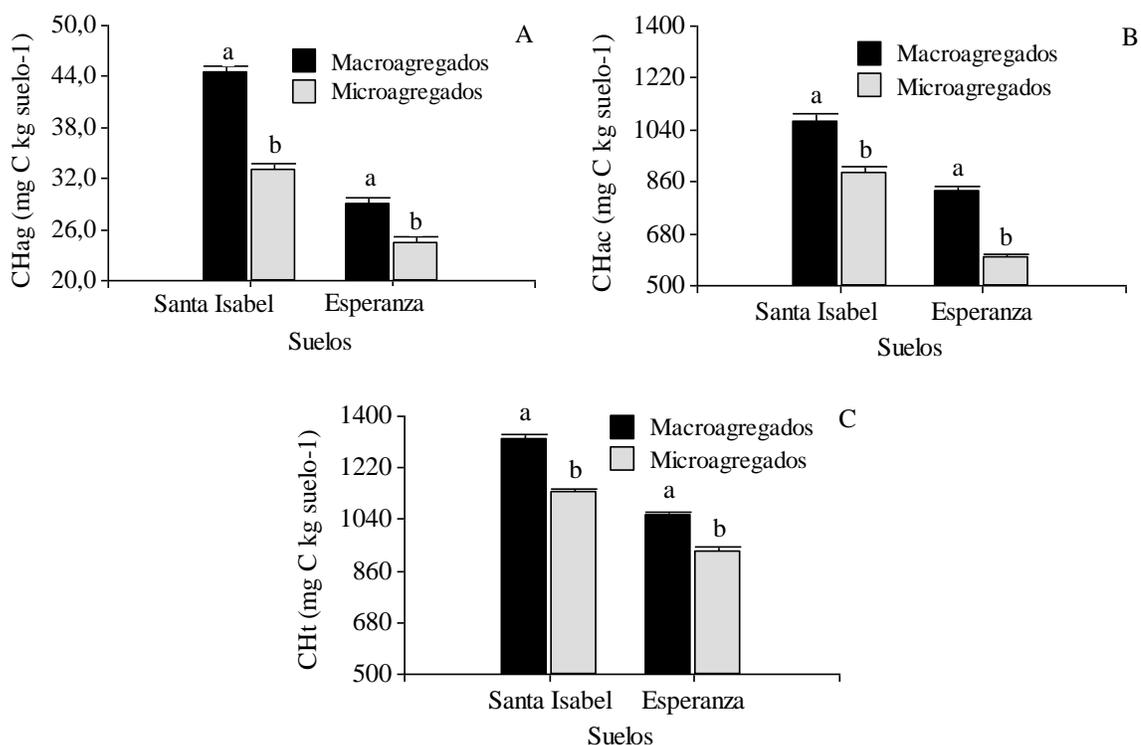


Fig. 2.7. Valores promedio de carbohidratos solubles en agua caliente (A), en ácido diluido (B) y totales (C) en macro y microagregados en la serie de suelo Santa Isabel y Esperanza. Valores expresados en mg C kg suelo⁻¹. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tamaños de agregados dentro de cada suelo (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

Los CHag corresponden a una fracción enriquecida de polisacáridos extracelulares de origen microbial, aunque también pueden contribuir en esta fracción los mucilagos radiculares (Haynes y Swift, 1990; Puget *et al.*, 1999). A partir de los resultados obtenidos se observa que en ambas series de suelo esta fracción representa una pequeña proporción de los carbohidratos totales, siendo inferior al 10%. Por otro lado, los CHac representan entre un 70 a un 85% de los CHt indicando una fuerte participación de los polisacáridos no celulósicos en estos suelos (Tabla 2.5 a 2.8). Por consiguiente, estos polisacáridos lábiles originados a partir de los microorganismos del suelo y de los residuos de los cultivos, representan la mayor parte de los polisacáridos del suelo, y esta fracción constituye el agente de agregación, en el corto plazo, más activo de estos suelos (Lui *et al.*, 2005; Martins *et al.*, 2009).

El crecimiento de plantas y la adición de residuos tuvieron un impacto significativo sobre la concentración de carbohidratos. En ambas series de suelo el incremento en las concentraciones están relacionadas con el aporte de carbono por parte de los residuos de los cultivos, por los exudados y por la senescencia radicular, y/o por la estimulación de la actividad biológica que produce polisacáridos extracelulares microbiales (Degens, 1997; Puget *et al.*, 1999; Haynes, 2005). La mayor concentración de carbohidratos en la serie Santa Isabel derivaría del mayor contenido inicial y en algunas fracciones se debería a la mayor actividad radical y descomposición de los residuos de cosecha. Esto conduce a que el suelo con menor contenido de limo presente una mayor cantidad de agentes de agregación, es decir mayor proporción de polisacáridos de origen microbial y derivado de las plantas que el suelo serie Esperanza.

Lo anterior demuestra que prolongados períodos de barbecho en las secuencias de rotación, reducen el ingreso de carbono orgánico y, consecuentemente, el de carbohidratos (Cheshire *et al.*, 1990). Al comparar el tratamiento control (-pl -res) con aquellos que recibieron aporte de residuos y crecimiento de plantas confirma los efectos negativos de una alta frecuencia de períodos de barbecho desnudo o rotaciones con reducido volumen de residuos sobre la calidad edáfica y en el almacenamiento de carbono. Este comportamiento indica que los carbohidratos constituyen una de las fracciones lábiles más activas del COS (Guggenberger *et al.*, 1995) y están influenciados fuertemente por los cambios en las prácticas de manejo que afectan la cantidad y la calidad de la biomasa (residuos de cosecha y raíces) que retorna al suelo (Haynes y Beare, 1997; Spaccini *et al.*, 2002; Haynes, 2005).

Los resultados de este estudio coinciden con los de Lui *et al.* (2005) quienes en un suelo franco arcillo limoso documentaron que la presencia de cultivos de cobertura incrementó la concentración de carbohidratos en el suelo respecto a uno sin cultivar. Por su parte, Haynes y Swift (1990) obtuvieron una mayor concentración de carbohidratos por efecto del crecimiento de diferentes cultivos en un suelo franco limoso de bajo contenido orgánico. Martens (2000) encontró que la incubación por 84 días de diversos residuos orgánicos en un suelo franco arcillo limoso favoreció la producción de CHt. Similarmente, Abiven *et al.* (2007) determinaron

incrementos significativos en la producción de CHag luego de la descomposición de residuos orgánicos de diferentes calidades en un suelo franco limoso.

Los carbohidratos están involucrados en reacciones órgano-minerales y bioquímicas, constituyen una parte importante de la materia orgánica lábil del suelo y son importantes agentes de unión que contribuyen en la agregación del suelo (Chenu, 1993; Gregorich *et al.*, 1994). Por ello pueden ser utilizados como un indicador sensible y temprano de la dinámica de la materia orgánica y de la presencia de agentes de agregación ya que estos cambios no pueden ser detectados, en cortos periodos de tiempo, por otras fracciones menos lábiles o recalcitrantes como el COT (Gregorich *et al.*, 1994; Haynes, 2005).

FRACCIONES DE GLOMALINA Y CONCENTRACIÓN EN LOS DISTINTOS TAMAÑOS DE AGREGADOS

La Tabla 2.12 presenta la concentración promedio inicial de las distintas fracciones de glomalina en los macro y microagregados de cada serie de suelo. La serie Santa Isabel presentó valores de PSRG más elevados que la serie Esperanza, mientras que las PSRG-FE no fueron diferentes entre las series evaluadas. Los valores de PSRG y PSRG-FE se encuentran dentro del rango de valores informados para la mayoría de los suelos templados (Wright *et al.*, 1999; Grumberg *et al.*, 2010; Reyna y Wall, 2014), siendo menores a los encontrados por Wright y Upadhyaya (1998) quienes informan un rango de 4,4 a 14,0 mg g⁻¹ en suelos con diferentes historias agrícolas.

Tabla 2.12. Contenido promedio inicial de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble (PSRG-FE) en macro y microagregados en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Fracciones de glomalina	Series de suelo	
	Santa Isabel	Esperanza
	Macroagregados	
PSRG	3,07 aA	1,11 aB
PSRG-FE	0,88 bA	0,82 bA
	Microagregados	
PSRG	2,30 aA	0,98 aB
PSRG-FE	0,72 bA	0,76 bA

Valores expresados en mg g^{-1} . Letras minúsculas distintas indican diferencias entre fracciones dentro de cada serie de suelo y tamaño de agregado. Letras mayúsculas distintas indican diferencias entre series de suelo suelos en cada fracción y tamaño de agregado. Test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

El contenido promedio de PSRG y PSRG-FE en los macro y microagregados luego del crecimiento de plantas y adición de residuos en la serie Santa Isabel y Esperanza se muestran en la Tabla 2.13 y 2.14. El contenido de PSRG y PSRG-FE fue superior en los macroagregados comparado a los microagregados, mostrando una diferencia significativa entre tamaños de agregados (Tabla 2.13 y 2.14). El contenido de PSRG en los macroagregados en la serie Santa Isabel varió entre 3,07 a 3,94 mg g^{-1} , y en la serie Esperanza varió entre 1,11 a 2,25 mg g^{-1} . En los microagregados, los valores oscilaron entre 2,33 a 3,27 y entre 0,73 a 1,86 mg g^{-1} en la serie Santa Isabel y Esperanza, observándose una disminución significativa en los contenidos de PSRG en los microagregados respecto de los macroagregados. El contenido de PSRG-FE fue superior en los macroagregados (Santa Isabel: 0,84 a 1,27 mg g^{-1} , Esperanza: 0,82 a 1,24 mg g^{-1}) comparado a los microagregados (Santa Isabel: 0,72 a 1,05 mg g^{-1} , Esperanza: 0,73 a 1,14 mg g^{-1}), mostrando una diferencia significativa entre tamaños de agregados.

Tabla 2.13. Contenido promedio de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble (PSRG-FE) en macro y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.

Tratamientos	Macroagregados		Microagregados	
	PSRG	PSRG-FE	PSRG	PSRG-FE
+pl -res	3,51±0,03	1,09±0,03	2,71±0,03	0,83±0,01
+pl soja bajo inc	3,58±0,04	1,22±0,01	2,84±0,04	0,88±0,01
+pl soja alto inc	3,67±0,07	1,27±0,02	2,93±0,03	0,88±0,01
+pl trigo bajo inc	3,62±0,03	1,24±0,03	3,01±0,07	0,86±0,01
+pl trigo alto inc	3,66±0,05	1,27±0,03	3,06±0,06	0,92±0,02
+pl soja bajo sup	3,76±0,03	1,20±0,02	3,14±0,06	1,02±0,01
+pl soja alto sup	3,85±0,01	1,23±0,01	3,22±0,06	1,05±0,04
+pl trigo bajo sup	3,82±0,01	1,22±0,02	3,25±0,04	1,04±0,02
+pl trigo alto sup	3,94±0,04	1,23±0,02	3,27±0,03	1,05±0,04
-pl -res	3,07±0,06	0,84±0,03	2,33±0,03	0,72±0,03
-pl soja bajo inc	3,45±0,05	1,06±0,01	2,75±0,06	0,78±0,02
-pl soja alto inc	3,58±0,02	1,06±0,01	2,74±0,04	0,82±0,02
-pl trigo bajo inc	3,43±0,03	1,00±0,03	2,84±0,03	0,86±0,02
-pl trigo alto inc	3,54±0,04	1,06±0,02	2,99±0,03	0,87±0,02
-pl soja bajo sup	3,41±0,06	0,98±0,02	2,94±0,04	0,87±0,03
-pl soja alto sup	3,47±0,03	1,02±0,02	3,03±0,06	0,94±0,01
-pl trigo bajo sup	3,44±0,05	1,03±0,03	3,03±0,06	0,88±0,02
-pl trigo alto sup	3,50±0,06	1,07±0,01	3,09±0,05	0,86±0,03

Valores expresados en mg g⁻¹. Valores medios ± desvío estándar de la media. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Tabla 2.14. Contenido promedio de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE) en macro y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.

Tratamientos	Macroagregados		Microagregados	
	PSRG	PSRG-FE	PSRG	PSRG-FE
+pl -res	1,25±0,01	1,03±0,03	0,91±0,01	0,83±0,02
+pl soja bajo inc	1,71±0,01	1,19±0,03	1,34±0,01	0,89±0,02
+pl soja alto inc	2,12±0,01	1,18±0,02	1,63±0,01	0,90±0,01
+pl trigo bajo inc	2,25±0,01	1,19±0,03	1,50±0,02	0,95±0,02
+pl trigo alto inc	1,86±0,01	1,17±0,03	1,69±0,01	1,03±0,01
+pl soja bajo sup	2,11±0,02	1,19±0,01	1,58±0,02	1,09±0,01
+pl soja alto sup	1,99±0,01	1,17±0,03	1,66±0,01	1,14±0,01
+pl trigo bajo sup	1,95±0,01	1,22±0,02	1,86±0,02	1,04±0,01
+pl trigo alto sup	2,11±0,02	1,24±0,02	1,81±0,03	1,11±0,02
-pl -res	1,11±0,02	0,82±0,03	0,73±0,02	0,73±0,01
-pl soja bajo inc	1,31±0,01	1,06±0,01	1,21±0,01	0,78±0,02
-pl soja alto inc	1,71±0,02	1,02±0,03	1,48±0,02	0,81±0,01
-pl trigo bajo inc	1,60±0,01	1,01±0,02	1,29±0,02	0,88±0,02
-pl trigo alto inc	1,83±0,01	1,06±0,02	1,61±0,02	1,00±0,03
-pl soja bajo sup	1,69±0,01	0,99±0,02	1,40±0,02	0,91±0,03
-pl soja alto sup	1,78±0,02	1,05±0,01	1,52±0,01	0,95±0,02
-pl trigo bajo sup	1,68±0,01	1,03±0,03	1,55±0,01	0,91±0,02
-pl trigo alto sup	1,96±0,02	1,07±0,02	1,72±0,02	1,03±0,02

Valores expresados en mg g⁻¹. Valores medios ± desvío estándar de la media. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

La mayor concentración de glomalina en los macroagregados concuerda con la teoría de jerarquía de agregación propuesta por Tisdall y Oades (1982), y con diversos estudios realizados recientemente (Curaqueo *et al.*, 2011; Spohn y Giani, 2011). Este resultado permite confirmar que las hifas de los hongos, cuantificadas a través de PSRG y PSRG-FE, son agentes temporales de agregación y que contribuyen a formar macroagregados a partir de microagregados como también fue indicado por Wright *et al.*, (2007).

El análisis estadístico determinó la existencia de interacción significativa entre el crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha en las diferentes fracciones de glomalina en los macro y microagregados siendo diferente el efecto en cada una de las series de suelo. El crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha permitieron generar en la serie Esperanza una concentración superior de PSRG en los macroagregados (2,41 vs 1,65 mg g⁻¹) y microagregados (1,11 vs 0,92 mg g⁻¹) respecto de la serie Santa Isabel. Similarmente, la interacción tuvo mayor incidencia en la concentración de PSRG-FE en la serie Esperanza respecto de la serie Santa Isabel en los macroagregados (1,34 vs 1,07 mg g⁻¹) y microagregados (0,79 vs 0,72 mg g⁻¹). La presencia de raíces activas y la adición de materia orgánica (residuos) estimularon la actividad fúngica en el suelo. No obstante, el mayor efecto se observó en el suelo de textura franco arcillo limoso, destacando la influencia de la textura del suelo sobre la actividad de los microorganismos y las raíces. Rillig y Steinberg (2002) encontraron que las proteínas del suelo relacionadas a la glomalina fueron producidas en mayores concentraciones en suelos pobremente agregados, como en el caso de la serie de suelo Esperanza.

Los contrastes ortogonales de la serie Santa Isabel en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas, en los macro y microagregados, revelan que los tratamientos sin adición de residuos presentaron menor concentración de PSRG respecto de los que tuvieron residuos (Tabla 2.15).

Tabla 2.15. Contrastes ortogonales de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE) en macro y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.

Macroagregados				
Contrastes	PSRG		PSRG-FE	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
<i>+pl</i>				
-res vs +res	0,23	<0,0001	0,14	<0,0001
soja vs trigo	-0,01	0,0137	-0,01	0,2988
alta vs baja	0,08	<0,0001	0,03	0,0019
inc vs sup	-0,21	<0,0001	-0,03	0,0011
<i>-pl</i>				
-res vs +res	0,41	<0,0001	0,19	<0,0001
soja vs trigo	8,3E ⁻⁴	0,9611	5,0E ⁻³	0,5066
alta vs baja	0,01	<0,0001	0,035	0,0004
inc vs sup	-0,05	0,0081	-0,02	0,0019
Microagregados				
Contrastes	PSRG		PSRG-FE	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
<i>+pl</i>				
-res vs +res	0,38	<0,0001	0,14	<0,0001
soja vs trigo	-0,11	<0,0001	-0,01	0,3093
alta vs baja	0,06	0,0074	0,02	0,0067
inc vs sup	-0,26	<0,0001	-0,16	<0,0001
<i>-pl</i>				
-res vs +res	0,59	<0,0001	0,14	<0,0001
soja vs trigo	-0,12	<0,0001	-0,02	0,1197
alta vs baja	0,07	0,0017	0,03	0,0062
inc vs sup	-0,19	<0,0001	-0,06	<0,0001

La magnitud del contraste indica el incremento en la concentración de proteínas en mg g⁻¹ por efecto del residuo adicionado. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Por otra parte, en los macroagregados en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas no se encontraron diferencias por efecto de la calidad de los residuos. En los microagregados el efecto de los residuos de trigo sobre la concentración de PSRG fue mayor. En relación a la dosis de residuos, en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas las dosis altas presentaron valores de PSRG mayores en los macro y microagregados. El contraste entre los residuos ubicados superficialmente e incorporados mostró diferencias. Los tratamientos con residuos incorporados, en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas, presentaron valores de PSRG menores que los tratamientos con residuos ubicados superficialmente.

La concentración de PSRG-FE de la serie Santa Isabel también mostró diferencias en su concentración, en los macro y microagregados, por efecto de la presencia de residuos de cosecha en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas (Tabla 2.15). Los resultados de la técnica de contrastes ortogonales, en ambos tamaños de agregados, no mostraron diferencias por la calidad de los residuos adicionados en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas. Por otra parte, en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas la adición de dosis altas de residuos permitió producir una mayor concentración de PSRG-FE. De manera similar a las PSRG, la concentración de PSRG-FE fue significativamente mayor en los tratamientos con residuos superficiales en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas.

En la serie Esperanza, en los macroagregados los tratamientos que tuvieron aporte de residuos presentaron mayores niveles de PSRG y PSRG-FE respecto de aquellos sin residuos (Tabla 2.16). La adición de residuos de trigo, la presencia de altas dosis de residuos y su ubicación superficial favorecieron la producción de PSRG. Por el contrario, las PSRG-FE no fueron afectadas por la calidad, la dosis y la ubicación de los residuos. En los microagregados la adición de residuos, la calidad, la dosis y la posición de los residuos tuvieron efectos significativos sobre la concentración de PSRG y PSRG-FE (Tabla 2.16).

Tabla 2.16. Contrastes ortogonales de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE) en macro y microagregados después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.

Macroagregados				
Contrastes	PSRG		PSRG-FE	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
<i>+pl</i>				
-res vs +res	0,77	<0,0001	0,16	<0,0001
soja vs trigo	-0,06	<0,0001	0,02	0,0212
alta vs baja	0,02	0,0010	2,5E ⁻³	0,7130
inc vs sup	-0,06	<0,0001	0,02	0,0136
<i>-pl</i>				
-res vs +res	0,58	<0,0001	0,21	<0,0001
soja vs trigo	-0,14	<0,0001	-0,01	0,1730
alta vs baja	0,25	<0,0001	0,03	0,0158
inc vs sup	-0,17	<0,0001	5,0E ⁻³	0,6459
Microagregados				
Contrastes	PSRG		PSRG-FE	
	Contraste	Valor p	Contraste	Valor p
<i>+pl</i>				
-res vs +res	0,73	<0,0001	0,19	<0,0001
soja vs trigo	-0,16	<0,0001	-0,03	0,0006
alta vs baja	0,13	<0,0001	0,05	<0,0001
inc vs sup	-0,19	<0,0001	-0,16	<0,0001
<i>-pl</i>				
-res vs +res	0,74	<0,0001	0,18	<0,0001
soja vs trigo	-0,14	<0,0001	-0,09	<0,0001
alta vs baja	0,22	<0,0001	0,08	<0,0001
inc vs sup	-0,15	<0,0001	-0,08	<0,0001

La magnitud del contraste indica el incremento en la concentración de proteínas en mg g⁻¹ por efecto del residuo adicionado. +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Bedini *et al.* (2009) sugieren el rol activo de los HMA sobre la producción y acumulación de mayores cantidades de glomalina con la presencia de sistemas radiculares. Otros autores indican que cuando cesa la actividad radicular, al incubar el suelo sin plantas hospederas, declina marcadamente la concentración de PSRG y PSRG-FE (Steinberg y Rillig 2003; Rillig y Mumme 2006). En este estudio, el crecimiento de plantas conjuntamente con la adición de residuos de cosecha tuvo un impacto positivo sobre la producción de glomalina y se verificó un mayor efecto de estos factores en el suelo serie Esperanza. Sin embargo, el mayor contenido de ambas fracciones de glomalina del suelo serie Santa Isabel estaría asociado con su mayor contenido inicial. Esto podría indicar una fuerte relación entre la presencia de raíces activas y de residuos de cosecha para incrementar la concentración de agentes de agregación como la glomalina. De este modo, los resultados demuestran que los contenidos de PSRS y PSRG-FE son sensibles a las prácticas de manejo y aportan información sobre los factores responsables de estos cambios. En este contexto, se destaca el beneficio de la presencia permanente de cubierta vegetal viva, en las secuencias de rotación de cultivos, la cual permite mantener la actividad fúngica por un mayor periodo de tiempo. Además es importante que la cobertura vegetal viva presente elevada productividad para garantizar un elevado volumen de raíces y residuos. Estas raíces activas propician un abastecimiento permanente de fotosintatos como fuente de energía para los HMA que favorecen la producción de glomalina. Numerosos estudios han reportado que los HMA contribuyen en la agregación del suelo y en la estabilidad estructural por un efecto físico del micelio extra-radicular y por la producción de PSRG (Wright y Upadhyaya, 1996; Angers y Caron, 1998; Jastrow *et al.*, 1998; Bedini *et al.*, 2009; Singh, 2012). Por ello, las secuencias de cultivos más intensificadas, se asociarán con incrementos en la producción de PSRG, PSRG-FE, y consecuentemente en la agregación, en comparación con aquellas que incluyen barbechos desnudos frecuentes o rotaciones con escasa cantidad de residuos, en particular en estos suelos, en los cuales la materia orgánica del suelo constituye el principal agente de agregación (Rillig *et al.*, 2004).

CONCLUSIONES

La presencia de los sistemas radiculares de las plantas que crecen activamente y la adición de residuos de cosecha condicionan la producción de agentes de agregación en ambas series de suelos. El aporte de material orgánico joven, a través de raíces y residuos, favoreció la presencia de agentes de agregación temporarios y transitorios tales como carbono orgánico particulado, diferentes fracciones de glomalina y de carbohidratos.

En ambas series de suelo el contenido de carbono orgánico particulado resultó una variable más sensible ya que se evidenció un cambio debido a las dosis de los residuos adicionados. La concentración de carbohidratos estuvo fuertemente influenciada por la actividad radical y por la dosis, la calidad y la ubicación de los residuos de cultivos. En general, la presencia de raíces activas y la adición de residuos mostraron mayor influencia sobre la producción de glomalina en el suelo de mayor contenido de limo. La concentración de los diversos agentes de agregación fue superior en el suelo con textura franca y mayor contenido de carbono.

Estos resultados demuestran que la presencia de prolongados periodos de barbechos y un escaso aporte de residuos en las secuencias de cultivos puede conducir a una reducción de los agentes de agregación. Por ello, resulta fundamental la producción de una adecuada cantidad de agentes orgánicos de agregación para mantener el estado físico del suelo en óptimas condiciones y que permita un crecimiento radicular sin restricciones con una eficiente exploración del suelo para la absorción de agua y nutrientes.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A. and Leterme P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during the decomposition of organic material. *European Journal of Soil Science* 58: 239-247.
- Angers D.A. and Caron J. 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry* 45: 55-72.
- Bedini S., Pellegrino E., Avio L., Pellegrini S., Bazzoffi P., Argese E. and Giovannetti, M. 2009. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1491-1496.
- Bronick C.J. and Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Carrizo M.E., Pilatti M.A., Alesso C.A. y Imhoff S. 2011. Atributos químicos de suelos Argiudoles cultivados y no cultivados del Departamento Las Colonias (Santa Fe). *Ciencia del Suelo* 29: 173-179.
- 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.
- Cheshire M.V., Christensen B.T. and Sorensen L.H. 1990. Labelled and native sugars in particle-size fractions from soils incubated with ¹⁴C straw for 6 to 18 years. *Journal of Soil Science* 41: 29-39.
- Cosentino D., Chenu C. and 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.
- Curaqueo G., Barea J.M., Acevedo E., Rubio R., Cornejo P. and Borie F. 2011. Effects of different tillage system on arbuscular mycorrhizal fungal propagules and physical properties in a Mediterranean agroecosystem in central Chile. *Soil and Tillage Research* 113: 11-18.
- De Gryze S., Six J., Brits C. and Merckx R. 2005. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 55-66.
- Degens B.P. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Australian Journal of Soil Research* 35: 431-459.
- Denef K., Six J., Merckx R. and Paustian K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant and Soil* 246: 185-200.
- Denef K. and Six J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal of Soil Science* 56: 469-479.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C.W. 2013. InfoStat, versión 2013, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. and Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugar and related substances. *Analytical Chemistry* 28: 350-356.
- Emran M., Gispert M. and Pardini G. 2012. Patterns of soil organic carbon, glomalin, and structural stability in Mediterranean abandoned terraced lands. *European Journal of Soil Science* 63: 637-649.
- Gale W.J., Cambardella C.A. and Bailey T.B. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Science Society of America Journal* 64: 201-207.
- Gee G.W. and Or D. 2002. Particle-Size Analysis. En: *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Dane, J.H. and Topp, G.C., (eds). Soil Science Society of America, Madison, USA, pp 255-293.
- Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O. and Clarke P. 1994. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C P/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research* 32: 285-309.
- Gregorich E.G., Carter M.R., Angers D.A., Monreal C.M. and Ellert B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74: 367-385.
- Gregorich E.G. and Janzen H.H. 1996. Storage of soil carbon in the light fraction and macro-organic matter. En: *Structure and soil organic matter storage in agricultural soils*. Carter, R. and Steward, B.A., (eds.). CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 167-190.
- Grumberg B., Conforto G., Rovea A., Boxler M., March G.J., Luna C., Meriles J. y Vargas Gil S. 2010. La glomalina y su relación con la productividad del cultivo de maíz. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 47: 23-25.
- Guggenberger G., Zech W. and Thomas R.J. 1995. Lignin and carbohydrate alteration in particle-size separates of an oxisol under tropical pastures following native savanna. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 1629-1638.
- Haynes R.J. and Swift R.S. 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *Journal of Soil Science* 41: 73-83.
- Haynes R.J. and Beare M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1647-1653.
- Haynes R.J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 211-219.
- Haynes R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An Overview. *Advances in Agronomy* 85: 221-268.
- Hoagland D. and Arnon D. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiments Station. Circular 347: 1-32.
- Imhoff S., Ghiberto P., Grioni A. and Gay J.P. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the flat Pampas of Argentina. *Geoderma* 158: 95-108.
- IRAM-SAGPYA 29571-2. 2007. Calidad ambiental. Calidad del suelo. Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 2 - Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla sulfocrómica en suelos. 14 pp.
- Irizar A., Andriulo A., Cosentino D. y Améndola C. 2010. Comparación de dos métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo. *Ciencia del Suelo* 28: 115-121.

- Janzen H.H., Campbell C.A., Brandt S.A., Lafond G.P. and Townley-Smith L. 1992. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal* 56: 1799-1806.
- Jastrow J.D., Miller R.M. and Lussenhop J. 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 905-916.
- Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437.
- Liu A., Ma B. and Bomke A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of America* 69: 2041-2048.
- Martens D.A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 361-369.
- Martins M., Corá J., Jorge R. and Marcelo A. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil and Tillage Research* 104: 22-29.
- Materechera S.A., Kirby J.M., Alston A.M. and Dexter A.R. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant and Soil* 160: 57-66.
- Miretti M.C., Pilatti M.A., Lavado S.R. y Imhoff S. 2012. Historia de uso del suelo y contenido de micronutrientes en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Ciencia del Suelo* 30: 67-73.
- Mosconi F., Priano L., Moscatelli G., Salazar J.L., Gutierrez T. y Caceres L. 1981. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. INTA-MAG, pp. 246.
- Pilatti M.A., Imhoff S., Ghiberto P. and Marano R. 2006. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Portella C., Guimarães M., Feller C., Batista Fonseca I. and Tavares Filho J. 2012. Soil aggregation under different management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36: 1868-1877.
- Puget P., Chenu C. and Balesdent J. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 46: 449-459.
- Puget P., Angers D.A. and Chenu C. 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 55-63.
- Puget P. and Drinkwater L. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Science Society of America Journal* 65: 771-779.
- Reyna D.L. and Wall L.G. 2014. Revision of two colorimetric methods to quantify glomalin-related compounds in soils subjected to different managements. *Biology and Fertility of Soils* 50: 395-400.
- Rillig M.C. and Steinberg P.D. 2002. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 1371-1374.
- Rillig M., Wright S. and Eviner V. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil* 238: 325-333.
- Rillig M. 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters* 7: 740-754.

- Rillig M. and Mummey D. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* 171: 41-53.
- SAMLA. 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos . CD-room. ISBN 987-9184-40-8.
- Santanatoglia O.J. y Fernández N. 1983. Estabilidad estructural y contenido de gomas microbianas bajo distintos tipos de manejo, en un suelo de la Serie Ramallo (Argiudol Vértico). *Ciencia del Suelo* 1: 43-49.
- Singh P.K. 2012. Role of glomalin related soil protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi : a review. *Agricultural Science Research Journal* 2: 119-125.
- Six J., Elliot E. and Paustian K. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1350-1358.
- Six J., Feller C., Deneff K., Ogle S.M., Moraes Sa, J.C. and Albrecht A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie* 22: 755-775.
- Six J., Bossuyt H., De Gryze S. and Deneff K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7-31.
- Spaccini R., Piccolo A., Mbagwu J.S., Zena Teshale A. and Igwe C.A. 2002. Influence of the addition of organic residues on carbohydrate content and structural stability of some highland soils in Ethiopia. *Soil Use and Management* 18: 404-411.
- Spohn M. and Giani L. 2011. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1081-1088.
- Steinberg P.D. and Rillig M.C. 2003. Differential decomposition of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae and glomalin. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 191-194.
- Studdert G.A. and Echeverría H.E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1496-1503.
- Taboada M., Barbosa O., Rodríguez M. and Cosentino D. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science* 62: 141-163.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1979. Stabilization of soil aggregates by the roots systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research* 17: 429-441.
- Varela M., Fernandez P., Rubio G. y Taboada, M. 2011. Cultivos de cobertura: efectos sobre la macroporosidad y la estabilidad estructural de un suelo franco-limoso. *Ciencia del Suelo* 29: 99-106.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. 1996. Extraction of and abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Soil Science* 161: 575-586.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.

- Wright S.F., Starr J.L. and Paltineanu I.C. 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal* 63:1825-1829.
- Wright A.L. and Hons H.F. 2004. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Science Society of America Journal* 68: 507-513.
- Wright S.F., Green V.S. and Cavigelli M.A. 2007. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. *Soil and Tillage Research* 94: 546-549.

IMPACTO DE LOS MECANISMOS BIÓTICOS Y ABIÓTICOS DE AGREGACIÓN SOBRE INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO

INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo es una propiedad de gran importancia porque interviene sobre diversos procesos químicos, físicos y biológicos (Kay, 1988). Directamente influencia la porosidad y consecuentemente el intercambio gaseoso, la infiltración, la susceptibilidad a erosión y la disponibilidad de agua para las plantas (Dexter, 1988). Debido a esto, la mantención de las propiedades físicas en un correcto estado resulta clave para el crecimiento de los cultivos y para la calidad del suelo. Sin embargo, la utilización intensiva del suelo, el escaso aporte de residuos de cosecha y la implementación de prácticas agronómicas no conservacionistas culminan en la disminución de la fertilidad de los suelos. Este tipo de prácticas favorecen la disminución de los niveles de COS y la degradación de un conjunto de propiedades edáficas asociadas. Por esta razón, resulta indispensable la búsqueda de sistemas de manejos menos agresivos así como de indicadores edáficos que permitan detectar el impacto resultante de las prácticas agronómicas para acceder a sistemas de producción más sustentables.

Los suelos de la región pampeana, incluidos los de textura franco y franco-limosa de la provincia de Santa Fe, presentan un marcado deterioro de sus propiedades físicas, especialmente su estado de agregación. Este deterioro es causado, en parte, por la reducción del COS (Pilatti *et al.*, 2006; Miretti *et al.*, 2012) y por las características texturales que le confieren a los suelos una marcada tendencia a la degradación y escasa resiliencia debido a la presencia de

minerales no expansibles, como limos finos y arcillas illíticas (Pecorari *et al.*, 1990). La pérdida de la calidad estructural se evidencia a través de la susceptibilidad de la capa arable a formar una estructura masiva con compactación superficial, pérdida de porosidad y aumento de la resistencia mecánica del suelo (Taboada *et al.*, 1998; Sasal *et al.*, 2006; Imhoff *et al.*, 2010).

En los últimos años, la evaluación de la calidad estructural de los suelos franco y franco-limosos se realizó a través de la medición de las siguientes propiedades: densidad y porosidad del suelo (Taboada *et al.*, 1998; Micucci y Taboada, 2006; Sasal *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008; Imhoff *et al.*, 2010), estado de agregación (Barbosa *et al.*, 1997; Pilatti *et al.*, 2006; Alvarez *et al.*, 2009), resistencia del suelo a la penetración de las raíces (Taboada *et al.*, 1998; Micucci y Taboada, 2006; Alvarez *et al.*, 2009; Miretti *et al.*, 2010) y el intervalo hídrico óptimo (Miretti *et al.*, 2010), entre otras.

La estabilidad de los agregados es ampliamente utilizada para estudiar el comportamiento físico de los suelos (Six *et al.*, 2000). Esta propiedad describe la capacidad del suelo para mantener el tamaño de los agregados y su distribución después de haber sido expuestos a diferentes fuerzas destructivas (Kay, 1998). El método elegido para evaluar la estabilidad de los agregados depende principalmente del propósito del estudio (Amezketá, 1999). La mayoría de los métodos consisten en examinar la ruptura de los agregados bajo diferentes condiciones de humedecimiento y de aplicación de energía. Los métodos de tamizado en húmedo son los más ampliamente utilizados y permiten cuantificar la cantidad de agregados que resultaron intactos frente a la acción de las fuerzas mecánicas del agua durante el tamizado (Yoder, 1936; Le Bissonnais, 1996). Entre éstos se encuentra el propuesto por Le Bissonnais (1996) que permite diferenciar los mecanismos básicos de ruptura de los agregados (estallido, ruptura mecánica y microfisuración) y cuantificar el grado de agregación del suelo. Por estas características este método se ha utilizado para evaluar suelos con variado contenido de carbono orgánico y composición granulométrica (Gabioud *et al.*, 2011; Novelli, 2013). Varios trabajos demuestran que este método es muy eficiente para el estudio de los suelos de textura franco-limosa, como los predominantes en la provincia de Santa Fe (Cosentino *et al.*, 2006; Abiven *et al.*, 2007).

Además de la estabilidad estructural, la evaluación de la RT puede ser un buen indicador de los efectos de los sistemas de manejo sobre la estructura, ya que el estrés aplicado resulta en la ruptura de los agregados del suelo en los planos de debilidad o en las zonas de menor resistencia. La RT es un indicador robusto de la condición estructural del suelo y puede ser determinada mediante una prueba simple en amplios tamaños de agregados (Dexter y Kroesbergen, 1985). A partir de esta medida se puede cuantificar la friabilidad (F), otra propiedad importante de la calidad estructural del suelo. La heterogeneidad de la RT resultante de los planos de debilidad o zonas de fallas dentro de los agregados es identificada como la F del suelo (Dexter y Watts, 2000). La F es considerada una importante propiedad física de los suelos, dado que una condición de suelo friable es deseable para un adecuado establecimiento de las plantas (Macks *et al.*, 1996; Watts y Dexter, 1998).

El aumento de la densidad del suelo incrementa el contacto entre las partículas del suelo. En estos casos, la resistencia del suelo es atribuible al efecto combinado del contenido hídrico y potencial mátrico sobre los puentes inter-partículas e inter-agregados, proceso conocido como estrés efectivo (Mullins y Panayiotopoulos, 1984). Del mismo modo, la disminución del contenido hídrico incrementa las conexiones entre las partículas. El estrés efectivo es utilizado como indicador de calidad física del suelo (Fabiola *et al.*, 2003; Whalley *et al.*, 2005) ya que indica como la matriz del suelo influye sobre la liberación y/o retención de agua hacia las plantas y en su crecimiento radicular.

En este sentido, la utilización de estos índices de calidad física de los suelos (Imhoff *et al.*, 2002; Whalley *et al.*, 2005) surge como alternativa y proporciona un enfoque totalmente nuevo y diferenciado para la evaluación estructural. A pesar de ser considerados excelentes índices (Watts y Dexter, 1998; Whalley *et al.*, 2005), en Argentina, pocos autores utilizaron estos índices para evaluar la condición física de suelos con texturas franco y franco-limosa (Miretti *et al.*, 2010). La mayoría de los estudios se realizaron en condiciones edáficas y climáticas diferentes a las del presente estudio (Watts y Dexter, 1998; Munkholm *et al.*, 2002; Imhoff *et*

al., 2002; Fabiola *et al.*, 2003; Tormena *et al.*, 2008a; Tormena *et al.*, 2008b). Por lo tanto, aún es necesario generar información para los suelos de la provincia de Santa Fe.

Es sabido desde hace mucho tiempo que el COS constituye el principal agente de formación y estabilización de las partículas minerales en agregados (Tisdall y Oades, 1982). La actividad radicular de las plantas y el aporte de residuos de cosecha incrementan el COS, favorecen la actividad microbial y la presencia de agentes transitorios y temporarios de agregación (Golchin *et al.*, 1994; Haynes y Beare, 1997; Six *et al.*, 2004) que contribuyen a la recuperación física de los suelos. Numerosos estudios documentaron el impacto del crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha sobre la agregación y otras propiedades físicas (Materchera *et al.*, 1994; Taboada *et al.*, 2004; De Gryze *et al.*, 2005; Deneff y Six, 2005; Cosentino *et al.*, 2006; Abiven *et al.*, 2007; Varela *et al.*, 2011). A pesar de los estudios pre-existentes, aún es escasa la información sobre el impacto del crecimiento de plantas y de la adición de residuos de cosecha sobre los diferentes mecanismos de ruptura de agregados y sobre indicadores de calidad física de suelos, *i.e.* resistencia ténsil de los agregados, friabilidad y estrés efectivo, en suelos de texturas contrastantes.

Los objetivos de este capítulo fueron: i) evaluar el efecto del crecimiento de plantas en combinación con la adición de diversas calidades, cantidades y ubicación de residuos de cosecha sobre diversas propiedades físicas indicadoras del grado de agregación del suelo, y ii) determinar la relación existente entre diversos agentes de agregación y las propiedades físicas evaluadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó sobre un Argiudol típico (serie Esperanza) y un Hapludol típico (serie Santa Isabel) localizados en el centro (31°26'8"S, 60°56'43"O) y sur (33°53'2"S, 61°44'58"O) de la provincia de Santa Fe, Argentina. La descripción de los suelos, clima, esquema de muestreo, diseño y tratamientos experimentales se presentan en el Capítulo 2 de esta Tesis.

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS DE SUELO

La estabilidad de los agregados fue determinada utilizando la metodología propuesta por Le Bissonnais (1996). Este método fue seleccionado porque tiene en cuenta los principales mecanismos de ruptura de agregados (estallido, ruptura mecánica y microfisuración) y permite comparar diferentes suelos o diferentes condiciones climáticas para un mismo suelo. Combina tres pre-tratamientos disruptivos con diferentes condiciones de velocidad de humedecimiento y energía: rápido humedecimiento (RH), ruptura mecánica (RM) y lento humedecimiento (LH). En cada serie de suelo, los pre-tratamientos fueron realizados por triplicado (n= 324) sobre agregados de 3-5 mm previamente secos a 40 °C durante 24 h.

Para el pre-tratamiento de RH, aproximadamente 5 g de agregados fueron rápidamente sumergidos en 50 mL de agua desmineralizada durante 10 min. En el pre-tratamiento de RM, los agregados fueron humedecidos en etanol durante 10 minutos. El etanol fue retirado y los agregados fueron inmersos en 200 mL de agua destilada en un erlenmeyer y agitado rápidamente 10 veces con movimientos semicirculares. Posteriormente, las muestras fueron mantenidas en reposo para permitir la sedimentación de las partículas y se removió el exceso de agua. En el pre-tratamiento de LH, 5 g de agregados fueron humedecidos capilarmente en una mesa de succión a -3 cm durante 30 min.

Después de cada pre-tratamiento, las muestras fueron transferidas a un tamiz de 0,05 mm y sumergidas en etanol durante cinco ciclos con el agitador de Feodoroff. Los agregados retenidos sobre el tamiz fueron secados a 40 °C y tamizados usando una columna de seis tamices (2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 y 0.05 mm) para obtener la distribución de tamaño de agregados. El diámetro medio ponderado (DMP) fue calculado como la suma de la masa retenida en cada tamiz multiplicado por la apertura de los tamices adyacentes, obteniéndose el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de rápido humedecimiento (DMP_{RH}), diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de ruptura mecánica (DMP_{RM}) y el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de lento humedecimiento (DMP_{LH}).

La resistencia ténsil de los agregados (RT) fue realizada según indican Dexter y Kroesbergen (1985) y Imhoff *et al.* (2002). El tamaño de los agregados fue obtenido por tamizado utilizándose tamices con una apertura de malla entre 12 y 19 mm. Para la medida de RT, cuarenta y cinco agregados fueron separados de cada muestra de suelo, totalizando 4860 test individuales (45 agregados x 3 repeticiones x 18 tratamientos x 2 suelos).

Un ensayo de tensión indirecto fue conducido para la determinación de la RT. Para ello, fue utilizado un equipamiento constituido por un motor de paso con una celda de carga de 20 kg que termina en una superficie plana que apoya sobre el agregado y aplica una fuerza a tasa constante de $0,3 \text{ mm s}^{-1}$ hasta la ruptura del agregado; es decir, hasta la formación de una fisura continua en el centro del agregado. Este conjunto está acoplado a un microcomputador para la adquisición y almacenamiento de los datos.

Los agregados fueron pesados individualmente antes de la realización de cada test. Cada agregado fue colocado en su posición más estable, entre las dos placas, siendo la inferior fija y la superior móvil. La placa móvil superior, unida a la celda de carga, es la responsable de la aplicación progresiva de la fuerza sobre el agregado. Después de cada medición, el conjunto de agregados que constituyen una repetición, fueron reunidos y secados en estufa a 105°C para determinar el contenido hídrico.

La RT fue calculada según Dexter y Kroesbergen (1985):

$$Y = 0,576 * \frac{P}{D^2} \quad (3.1)$$

donde 0,576 es una constante de proporcionalidad, resultante de la relación entre la carga compresiva aplicada y el estrés ténsil generado en el interior del agregado, P es la fuerza aplicada para la ruptura del agregado y D^2 es el diámetro efectivo de cada agregado (mm).

El diámetro efectivo de cada agregado (D) fue calculado según Watts y Dexter (1998):

$$D = D_m \left(\frac{M}{M_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$

siendo D_m el diámetro medio del agregado (mm), M la masa individual del agregado (g), y M_o la masa media de los agregados de la población (g). El diámetro medio de los agregados fue considerado igual a la media de los tamaños de los tamices [(19 + 12,5)/2] utilizados para seleccionar los agregados.

Para calcular la Friabilidad del suelo (F), fue utilizado el método de coeficiente de variación propuesto por Watts y Dexter (1998):

$$F = \frac{\sigma_Y}{Y} \pm \frac{\sigma_Y}{Y\sqrt{2n}} \quad (3.3)$$

donde σ_Y es el desvío estándar de los valores de resistencia ténsil medidos, Y es valor medio de resistencia ténsil obtenido y n es el número de repeticiones. El segundo término es el error estándar del coeficiente de variación. Este método tiene la ventaja que puede ser utiliza-

do en agregados de un solo tamaño y los resultados son fáciles de calcular (Watts y Dexter, 1998; Macks *et al.*, 1996).

Para la determinación del estrés efectivo (σ), en la parte superficial de cada una de las macetas se colectaron muestras no disturbadas con cilindros de 5 cm de altura x 5 cm de diámetro (5 cilindros por tratamiento). Las muestras fueron saturadas por elevación gradual de una lámina de agua, se pesaron para obtener el contenido hídrico en saturación (θ_s) y posteriormente se equilibraron en los siguientes potenciales mátricos (ψ): -0,002; 0,006 y -0,01 MPa en mesa de tensión y -0,03; -0,1 MPa por medio de presiones aplicadas en placas porosas (Klute y Hartge, 1986). Cuando las muestras llegaron al equilibrio fueron pesadas y en cada una se midió la resistencia a la penetración del suelo (RP) con penetrómetro electrónico, con cono de 60° de ángulo y 4 mm de diámetro basal. La velocidad de penetración fue de 1,0 cm min⁻¹ y la frecuencia de muestreo correspondió al registro de 1 valor de resistencia cada 0,6767 segundos, obteniéndose 266 lecturas en total. Las lecturas obtenidas entre 1 y 4 cm de profundidad de cada muestra se promediaron para obtener un único valor de RP. A continuación las muestras se secaron en estufa a 105 °C para determinar el contenido gravimétrico de agua y la densidad del suelo (Blake y Hartge, 1986). Con esta información se calculó el estrés efectivo para cada tratamiento en ambos suelos.

El estrés efectivo se estimó como el producto entre la saturación relativa y el potencial mátrico en valor absoluto (Fabiola *et al.*, 2003; Whalley *et al.*, 2005), como muestra para suelos no saturados la siguiente ecuación (Mullins y Panayiotopoulos, 1984):

$$\sigma = \theta_{sr} * |\psi_m| \quad (3.4)$$

donde: σ = estrés efectivo (kPa); θ_{sr} = saturación relativa (cociente entre el contenido volumétrico de agua en el potencial aplicado y el contenido volumétrico de agua en saturación: $\theta_{sr} = \theta/\theta_s$); $|\psi_m|$ es el potencial mátrico aplicado en valor absoluto (kPa).

La relación entre el σ y RP (kPa) (Vepraskas, 1984) se estableció ajustando el modelo lineal:

$$RP = a + b * \sigma \quad (3.5)$$

donde: σ = estrés efectivo (kPa), RP= resistencia a la penetración (kPa), a y b son los parámetros del modelo.

Los análisis estadísticos fueron realizados con el software INFOSTAT (Di Renzo *et al.*, 2013). Para determinar los efectos de los tratamientos sobre la estabilidad estructural, resistencia ténsil y friabilidad se realizó un análisis de varianza y la comparación de medias mediante el Test de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Para el estudio de las interacciones entre crecimiento de las plantas y adición de residuos sobre la estabilidad estructural se utilizaron contrastes ortogonales. Se realizó un análisis de correlaciones canónicas entre los agentes de agregación y los diferentes pre-tratamientos de estabilidad estructural. La asociación entre los valores de resistencia ténsil y los agentes de agregación se analizó a través del análisis de correlación lineal (coeficientes de correlación de Pearson) y análisis de regresión múltiple. La influencia del crecimiento de las plantas y adición de residuos de cosecha sobre los parámetros de la relación lineal entre estrés efectivo-RT se determinó a través de contrastes ortogonales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESTABILIDAD DE AGREGADOS

En la Tabla 3.1 y 3.2 se presentan los DMP de cada pre-tratamiento de la serie Santa Isabel y Esperanza, respectivamente, luego de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha. En la serie Santa Isabel, la estabilidad estructural disminuyó en el siguiente orden: DMP_{LH} (promedio 1,85 mm), $>DMP_{RM}$ (promedio 0,81 mm), $>DMP_{RH}$ (promedio 0,35 mm). Similar tendencia fue observada en la serie Esperanza en la cual los DMP promedio fueron 1,51; 0,79 y 0,32 mm después de los pre-tratamientos de LH, RM y RH, respectivamente. Dentro de cada serie los DMP fueron diferentes entre los pre-tratamientos. No se detectaron diferencias entre las series evaluadas para los pre-tratamientos de RH y RM, aunque el DMP_{LH} fue diferente entre los suelos. Estas variaciones se deben a las condiciones impuestas en la velocidad de humectación y en la energía aplicada a los agregados (Le Bissonnais, 1996). Estos rangos están en concordancia con los citados por Cosentino *et al.* (2006) y Maqubela *et al.* (2012) quienes utilizaron el mismo método en suelos franco limosos y franco arcillo limosos.

En ambas series, el pre-tratamiento de RH fue el mecanismo de ruptura más desestabilizador de la estructura que generó los menores los DMP, mientras que los agregados mostraron un comportamiento más estable frente a la ruptura mecánica (RM). En contraste, el LH involucra una débil energía disruptiva en relación al RH y permite el escape del aire con una menor destrucción de los agregados (Tabla 3.1 y 3.2).

Tabla 3.1. Diámetro medio ponderado de los agregados (DMP) de los pre-tratamientos de rápido humedecimiento (DMP_{RH}), ruptura mecánica (DMP_{RM}) y lento humedecimiento (DMP_{LH}) después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel.

Tratamientos	DMP_{RH}	DMP_{RM}	DMP_{LH}
	mm		
+pl -res	0,29±0,01	0,75±0,01	1,63±0,06
+pl trigo bajo inc	0,45±0,02	0,84±0,02	2,48±0,12
+pl trigo alto inc	0,50±0,01	0,92±0,01	2,64±0,09
+pl soja bajo inc	0,49±0,02	0,88±0,01	2,34±0,01
+pl soja alto inc	0,45±0,03	0,82±0,05	1,97±0,08
+pl trigo bajo sup	0,34±0,03	0,91±0,02	2,32±0,05
+pl trigo alto sup	0,35±0,01	0,98±0,02	2,60±0,12
+pl soja bajo sup	0,33±0,01	0,99±0,07	2,37±0,05
+pl soja alto sup	0,36±0,02	1,07±0,11	2,39±0,08
-pl -res	0,25±0,01	0,63±0,02	1,31±0,04
-pl trigo bajo inc	0,33±0,01	0,65±0,04	1,67±0,11
-pl trigo alto inc	0,36±0,01	0,64±0,01	2,14±0,03
-pl soja bajo inc	0,34±0,01	0,63±0,01	1,69±0,09
-pl soja alto inc	0,34±0,01	0,66±0,05	1,84±0,04
-pl trigo bajo sup	0,30±0,01	0,70±0,02	1,84±0,08
-pl trigo alto sup	0,23±0,04	0,81±0,02	2,02±0,08
-pl soja bajo sup	0,25±0,03	0,90±0,03	1,24±0,04
-pl soja alto sup	0,25±0,01	0,78±0,07	1,26±0,03

Valores expresados en mm. Valores medios \pm error estándar de la media (n=3). +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Tabla 3.2. Diámetro medio ponderado de los agregados (DMP) de los pre-tratamientos de rápido humedecimiento (DMP_{RH}), ruptura mecánica (DMP_{RM}) y lento humedecimiento (DMP_{LH}) después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Esperanza.

	DMP_{RH}	DMP_{RM}	DMP_{LH}
Tratamientos	mm		
+pl -res	0,27±0,02	0,64±0,03	1,49±0,01
+pl trigo bajo inc	0,36±0,05	0,74±0,03	1,99±0,07
+pl trigo alto inc	0,36±0,01	0,72±0,03	1,94±0,08
+pl soja bajo inc	0,38±0,02	0,94±0,03	1,86±0,09
+pl soja alto inc	0,39±0,02	0,79±0,02	1,92±0,04
+pl trigo bajo sup	0,30±0,01	1,05±0,06	1,15±0,05
+pl trigo alto sup	0,30±0,02	1,08±0,04	1,40±0,08
+pl soja bajo sup	0,31±0,02	0,92±0,03	1,71±0,04
+pl soja alto sup	0,33±0,02	1,19±0,04	1,92±0,02
-pl -res	0,20±0,02	0,58±0,02	1,07±0,01
-pl trigo bajo inc	0,32±0,01	0,74±0,02	1,22±0,04
-pl trigo alto inc	0,30±0,01	0,60±0,02	1,19±0,01
-pl soja bajo inc	0,30±0,01	0,64±0,05	1,25±0,03
-pl soja alto inc	0,35±0,04	0,61±0,03	1,39±0,03
-pl trigo bajo sup	0,34±0,02	0,75±0,02	1,15±0,10
-pl trigo alto sup	0,24±0,04	0,81±0,01	1,31±0,04
-pl soja bajo sup	0,25±0,05	0,75±0,03	1,14±0,04
-pl soja alto sup	0,22±0,03	0,78±0,01	1,10±0,01

Valores expresados en mm. Valores medios \pm error estándar de la media (n=3). +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Valores de DMP inferiores a 0,5 mm indican que los agregados estallan cuando son humedecidos rápidamente. Por consiguiente, los agregados de ambas series de suelo presentaron

estabilidad muy baja frente al estallido, de acuerdo con la clasificación propuesta por Le Bissonnais (1996) (Tabla 3.1 y 3.2). Pilatti *et al.* (2006) documentaron para suelos de la provincia de Santa Fe que el estallido fue el proceso dominante en reducir la agregación del suelo. Este mecanismo de ruptura también fue determinado por otros autores para suelos de textura franca y franca-limosa (Chenu *et al.*, 2000; Cosentino *et al.*, 2006 y Annabi *et al.*, 2011).

Por otra parte, el DMP_{RM} varió aproximadamente entre 0,63 y 1,07 mm en la serie Santa Isabel y entre 0,58 y 1,19 mm en la serie Esperanza. Los agregados presentaron desde una estabilidad media hasta un comportamiento inestable cuando fueron sometidos a la agitación mecánica (Le Bissonnais, 1996).

En el pre-tratamiento de LH se obtuvieron los mayores DMP, independientemente del suelo y tratamiento (Tabla 3.1 y 3.2). Estos resultados pueden deberse a que en ambas series predominan arcillas no expansibles y, por lo tanto, el proceso de hinchamiento diferencial de los coloides que induce la microfisuración de los agregados es limitado. Sin embargo, la serie Esperanza presentó DMP menores que la serie Santa Isabel (Tabla 3.1 y 3.2). Esto indica que este último suelo presenta menor estabilidad estructural frente a procesos disruptivos. Es probable que el mayor contenido de limo fino (casi 30%) y el reducido contenido de arena hayan condicionado negativamente los resultados. Suelos con estas características poseen reducida estabilidad estructural y resiliencia, lo que fue atribuido por Taboada *et al.* (2008) a la escasa o nula formación de microfisuras debido al predominio de una matriz que no presenta procesos de expansión-contracción y escaso esqueleto. Cosentino *et al.* (2006) y Annabi *et al.* (2011) también encontraron en suelos franco-limosos una limitada ruptura de agregados debido al hinchamiento diferencial de arcillas.

La adición de residuos de cosecha en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas tuvo un efecto positivo significativo sobre el DMP_{RH} y el incremento en el diámetro resultó similar en ambas series de suelo. El aporte de residuos en los tratamientos con crecimiento de plantas permitió un incremento de 0,10 mm en el DMP, mientras que en los tratamientos sin creci-

miento de plantas el incremento fue 0,06 mm. El efecto principal de las raíces fue diferente en cada serie de suelo. En la serie Esperanza el crecimiento de plantas tuvo un efecto significativo y permitió incrementar 0,05 mm el DMP, mientras que en la serie Santa Isabel el incremento fue superior (0,08 mm).

El efecto global de la adición de residuos de cosecha fue diferente entre las series de suelo. En la Tabla 3.3 se presentan los coeficientes de los diferentes contrastes ortogonales luego de la adición de residuos de cosecha en ambas series de suelo. Los resultados revelan que la presencia y la incorporación superficial de los residuos afectaron significativamente el DMP frente al fenómeno del estallido. Por otro lado, la cantidad y la calidad de residuos no afectaron significativamente el DMP. En líneas generales, la presencia de raíces y la adición de residuos disminuyeron principalmente en el suelo Santa Isabel la ruptura de agregados por efecto del estallido.

Tabla 3.3. Contrastes ortogonales del pre-tratamiento de rápido humedecimiento después de aplicar diferentes tratamientos de adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Contrastes	Serie Santa Isabel		Serie Esperanza	
	Coefficiente	Valor p	Coefficiente	Valor p
-res vs +res	0,09	<0,0001	0,08	<0,0001
soja vs trigo	-0,005	0,2987	0,003	0,5036
alta vs baja	0,001	0,8135	-0,004	0,3595
inc vs sup	0,05	<0,0001	0,03	<0,0001

En el pre-tratamiento de RM la interacción entre el crecimiento de plantas y la adición de residuos fue significativa y el resultado de ambos factores permitió incrementos en el DMP mayores en la serie Esperanza respecto de la serie Santa Isabel (0,21 vs 0,19 mm). La Tabla 3.4 muestra que la cohesión de los agregados mejoró, en ambas series de suelo, con la adición de residuos en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas. En ambas series, en los tra-

tamientos con y sin crecimiento de plantas no se encontraron diferencias entre tratamientos por efecto de la calidad y dosis de los residuos. En la serie Santa Isabel, se observó un efecto significativo por la posición de los residuos; en los tratamientos con crecimiento de plantas la ubicación superficial de los residuos tuvo un efecto superior sobre el DMP, en cambio en los tratamientos sin crecimiento de plantas se observa un comportamiento opuesto (mayores DMP con incorporación de residuos). En la serie Esperanza, el contraste entre los residuos ubicados superficialmente e incorporados también fue significativo, y en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas la presencia de residuos ubicados superficialmente permite obtener DMP mayores que los tratamientos con residuos incorporados.

Tabla 3.4. Contrastes ortogonales del pre-tratamiento de ruptura mecánica después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Contrastes	serie Santa Isabel		serie Esperanza	
	Coefficiente	Valor p	Coefficiente	Valor p
<i>+pl</i>				
+res vs -res	0,17	<0,0001	0,20	<0,0001
soja vs trigo	0,03	0,1547	0,06	0,0285
alta vs baja	0,04	0,0545	0,03	0,1456
inc vs sup	-0,12	<0,0001	-0,27	<0,0001
<i>-pl</i>				
+res vs -res	0,12	<0,0001	0,14	0,0005
soja vs trigo	0,04	0,0355	-0,03	0,2334
alta vs baja	5,0E ⁻⁴	0,9800	-0,02	0,3717
inc vs sup	0,2	<0,0001	-0,13	<0,0001

En ambas series de suelos, la cohesión en húmedo de los agregados mejoró con la presencia de sistemas radiculares y cuando los residuos se ubican superficialmente en el suelo. No obstante, los tratamientos con los residuos incorporados presentaron mayores DMP que sin adi-

ción de residuos. En consecuencia, los tratamientos sin cobertura (sin presencia de residuos) exponen a los suelos a una mayor vulnerabilidad frente al impacto de las gotas de lluvia respecto de los tratamientos que presentan aporte de residuos independientemente de su ubicación (Tabla 3.1 y 3.2). La mayor resistencia de los agregados a la ruptura mecánica se puede atribuir a la presencia de sustancias orgánicas como polisacáridos que aumentan la cohesión entre las partículas, como así también al efecto físico de enredo producido por las raíces e hifas fúngicas.

Rubio *et al.* (2012) documentaron para suelos franco arenosos que la mayor biomasa de residuos que permanece sobre la superficie del suelo, debido a la incorporación de cultivos de cobertura, absorbe la energía del impacto de la gota de lluvia y protege a los agregados frente a la ruptura mecánica. Por su parte, Varela *et al.* (2011) también evaluaron el efecto de los sistemas radicales sobre un suelo franco limoso y encontraron efectos significativos sobre la estabilidad estructural. Estos trabajos confirman que el incremento en el tiempo de ocupación del suelo con raíces activas, mediante la intensificación de las secuencias de cultivos, permite disminuir la ruptura de agregados y esa mejora estaría vinculada con la presencia de raíces vivas y por efecto de los residuos ubicados superficialmente (Taboada *et al.*, 2004; Rubio *et al.*, 2012).

El DMP de los agregados del pre-tratamiento de LH fue diferente entre las series de suelo por efecto de la interacción «crecimiento de plantas x residuos». El crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha favorecieron DMP superiores en la serie Santa Isabel respecto de la serie Esperanza (0,64 vs 0,45 mm) (Tabla 3.1 y 3.2).

En la serie Santa Isabel, en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas, la agregación mejoró significativamente con la adición de residuos de cosecha (0,76 y 0,41 mm) (Tabla 3.5). En relación con la calidad de los residuos, en los tratamientos con y sin crecimiento de plantas no se observaron diferencias entre tratamientos. En los tratamientos con crecimiento de plantas, los contrastes ortogonales entre dosis altas y bajas de residuos no mostraron diferencias,

aunque en los tratamientos sin crecimiento de plantas las dosis altas de residuos de cosecha favorecieron un incremento del DMP de 0,20 mm. Un comportamiento similar se observa en el contraste relacionado con la posición de los residuos. Los tratamientos sin crecimiento de plantas y con residuos incorporados presentaron DMP significativamente superiores que los tratamientos con residuos ubicados superficialmente (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Contrastes ortogonales del pre-tratamiento de lento humedecimiento después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Contrastes	serie Santa Isabel		serie Esperanza	
	Coefficiente	Valor p	Coefficiente	Valor p
<i>+pl</i>				
+res vs -res	0,76	<0,0001	0,46	<0,0001
soja vs trigo	-0,24	0,4714	0,21	<0,0001
alta vs baja	0,02	0,5936	0,09	0,0203
inc vs sup	-0,06	0,1525	0,36	<0,0001
<i>-pl</i>				
+res vs -res	0,41	<0,0001	0,15	0,0060
soja vs trigo	-0,41	<0,2941	8,8E ⁻⁴	0,9781
alta vs baja	0,20	0,0002	0,06	0,0688
inc vs sup	0,25	<0,0001	0,06	0,0188

En la serie Esperanza, también se observan diferencias significativas entre el tratamiento sin residuos y el promedio de los tratamientos que tuvieron aporte de residuos. En los tratamientos con crecimiento de plantas se encontraron diferencias significativas en el DMP debido a la calidad de los residuos mientras que este efecto no se encontró en los tratamientos sin crecimiento de plantas. La dosis de los residuos no tuvo efecto sobre el DMP (Tabla 3.5). Respecto a la ubicación de los residuos, en los tratamientos con crecimiento de plantas, se obtuvieron DMP superiores (0,36 mm) cuando los residuos se incorporaron en el suelo que cuando se mantuvieron en superficie. Un efecto contrario se manifestó en los tratamientos sin creci-

miento de plantas, en los cuales la ubicación no afectó significativamente el DMP de los agregados.

Estos resultados demuestran que la actividad radicular y la adición de residuos de cosecha disminuyen la ruptura por microfisuración de los agregados, especialmente en el suelo Santa Isabel. El menor efecto de estos factores sobre el suelo serie Esperanza y por consiguiente la menor estabilidad estructural frente a este proceso disruptivo determinaría la necesidad de realización de estudios a largo plazo (*i.e.* más de un ciclo de cultivo) así como también ampliar los estudios sobre los efectos de los mecanismos bióticos de agregación.

RELACIÓN ENTRE LOS AGENTES DE AGREGACIÓN Y LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL

La relación entre los distintos pre-tratamientos de estabilidad estructural y los agentes de agregación (COT, COP, CHag, CHac, CHt, PSRG, PSRG-FE) en ambas series de suelo fue evaluada mediante análisis de correlaciones canónicas (Tablas 3.6 y 3.7).

La Tabla 3.6 muestra que sólo la primera correlación canónica fue significativa y explicó el 87% de la variabilidad entre los dos grupos de variables en la serie Santa Isabel. La concentración de CHag y CHac fueron las variables más relacionadas con el DMP del pre-tratamiento de RH, mientras que el COT y CHt tuvieron menor influencia. Respecto a las variables vinculadas con la actividad fúngica, el contenido de PSRG-FE mostró la mayor relación con los DMP de los diferentes pre-tratamientos.

Tabla 3.6. Análisis de correlación canónica entre los agentes de agregación y los distintos pre-tratamientos de estabilidad estructural en la serie Santa Isabel.

Variable canónica	1	2	3
R	0,93	0,68	0,47
R ²	0,87	0,75	0,35
Lambda	93,73	44,28	20,73
p-valor	3,6E ⁻¹¹	0,14	0,28
Agentes de agregación			
COT	0,01	-0,05	0,31
COP	0,16	0,18	0,02
CHag	0,28	-0,44	0,53
CHac	0,43	0,70	-1,35
CHt	0,02	0,86	0,17
PSRG-FE	0,71	-1,28	-0,44
PSRG	0,25	0,27	1,13
DMP de los pre-tratamientos de estabilidad estructural			
RH	0,62	0,73	-0,50
RM	0,32	-0,86	-1,05
LH	0,34	-0,33	1,43

COT, carbono orgánico total; COP, carbono orgánico particulado; CHag, carbohidratos solubles en agua caliente; CHac, carbohidratos solubles en ácido diluido; CHt, carbohidratos totales; PSRG-FE, proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble; PSRG, proteínas del suelo relacionadas con la glomalina; rápido humedecimiento (RH), ruptura mecánica (RM), lento humedecimiento (LH).

En la serie Esperanza la primera correlación canónica explicó el 84% de la variabilidad entre los grupos de variables. El COP, los CHac y la FE-PSRG fueron las variables más relacionadas con el DMP del pre-tratamiento de RH. Un efecto similar, aunque de menor magnitud, se observa sobre los pre-tratamientos de RM y LH (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Análisis de correlación canónica entre los agentes de agregación y los distintos pre-tratamientos de estabilidad estructural en la serie Esperanza.

Variable canónica	1	2	3
R	0,87	0,59	0,47
R ²	0,84	0,35	0,23
Lambda	83,40	20,31	7,68
p-valor	2,2E ⁻⁰⁹	0,07	0,17
Agentes de agregación			
COT	-0,29	-1,08	-0,48
COP	0,53	0,53	-1,02
CHag	-0,22	-0,59	0,12
CHac	0,31	-0,02	1,28
CHt	-0,55	-0,42	0,23
PSRG-FE	0,78	0,31	0,17
PSRG	0,32	0,34	0,01
DMP de los pre-tratamientos de estabilidad estructural			
RH	0,82	0,66	-0,06
RM	0,21	-0,65	1,19
LH	0,18	-0,42	-1,26

COT, carbono orgánico total; COP, carbono orgánico particulado; CHag, carbohidratos solubles en agua caliente; CHac dil, carbohidratos solubles en ácido diluido; CHt, carbohidratos totales; FE-PSRG, proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble; PSRG, proteínas del suelo relacionadas con la glomalina; rápido humedecimiento (RH), ruptura mecánica (RM), lento humedecimiento (LH).

Estos resultados muestran que las fracciones orgánicas rápidamente biodegradables fueron las que más condicionaron la estabilidad estructural, coincidiendo con resultados encontrados en suelos de similar textura (Cosentino *et al.*, 2006; Abiven *et al.*, 2007; Maqubela *et al.*, 2012). Diversos estudios han demostrado que la estabilidad de los agregados se encuentra positivamente correlacionada con el COT (Tisdall y Oades, 1982), mientras que otros indican que está más fuertemente correlacionada con el contenido de carbohidratos extraíbles con agua y/o totales (Degens, 1997; Haynes, 2005; Lui *et al.*, 2005). Estas sustancias actúan principal-

mente sobre dos de los tres mecanismos que causan ruptura de los agregados: el estallido y la microfisuración. Este efecto se atribuye a incrementos en la cohesión de los agregados del suelo (Chenu y Guérif, 1991; Degens, 1997). Los CHag y CHac representan una parte de la reserva lábil del COS y actúan como agentes de unión activos en la agregación en períodos de tiempo relativamente cortos (Haynes, 2005 y Martins *et al.*, 2009), lo que también fue corroborado en este estudio ya que los efectos se observaron en un ciclo de cultivo.

Otro factor importante relacionado con la influencia de los sistemas radiculares y el efecto de los residuos sobre la estabilidad de los agregados es el COP. Este parámetro presenta una asociación positiva con la disminución de la desagregación especialmente por estallido en el suelo serie Esperanza y, en menor medida, en la serie Santa Isabel (Tabla 3.6 y 3.7). Esta reducción en la desagregación puede ser atribuida a sus propiedades hidrofóbicas (Chenu *et al.*, 2000; Hallett *et al.*, 2001). Goebel *et al.* (2005) documentaron que juega un rol substancial en el desarrollo de la repelencia al agua de los agregados y de este modo favorece incrementos en su estabilidad. Los resultados alcanzados son consistentes con el trabajo realizado por Zaher *et al.* (2005) que indica que la adición de materia orgánica al suelo reduce el estallido de los agregados. Estos autores, establecieron que el comportamiento se debe a un aumento de la cohesión y por la disminución de la entrada de agua en el interior del agregado debido un aumento de la hidrofobicidad y de la rugosidad del espacio poroso del agregado. Por su parte, Aoyama *et al.* (1999) informaron que la aplicación de enmiendas de ganado vacuno en un suelo franco limoso incrementó los contenidos de COP y favoreció la formación de macroagregados resistentes al estallido.

Sin embargo, Golchin *et al.* (1997) concluyeron que la formación y la estabilización de los agregados alrededor del COP son transitorias ya que esta fracción es rápidamente descompuesta y fragmentada por la población microbial del suelo. Esta descomposición favorece la producción de hifas fúngicas y polisacáridos microbiales que contribuyen fuertemente en la agregación del suelo (Haynes y Francis, 1993; Tisdall, 1994). Es por ello que resulta necesaria la incorporación constante de materia orgánica, a través de la actividad radicular y de los resi-

duos de cosecha, para mantener un alto nivel de actividad microbiana y de producción de agentes de agregación que contribuyan a la estabilización de los agregados.

Además de las fracciones orgánicas lábiles del suelo, como los carbohidratos y el COP, la actividad fúngica también favorece incrementos en la estabilidad estructural, tal como indican Wright y Upadhyaya (1998) y Rillig (2004). Las PSRG-FE resultó la variable fúngica que mayor influencia tuvo sobre los DMP en los diferentes pre-tratamientos, mientras que las PSRG presentaron una leve asociación (Tabla 3.6 y 3.7).

La actividad fúngica, evaluada por medio de la biomasa, longitud de las hifas fúngicas y concentración de ergosterol, condiciona la estabilidad de los agregados (Cosentino *et al.*, 2006; Abiven *et al.*, 2007; Annabi *et al.*, 2007). La abundante producción de glomalina por los HMA, de naturaleza hidrofóbica y recalcitrante, contribuyen a que los agregados sean estables (Wright y Upadhyaya, 1998; Rillig, 2005). Estas sustancias reducen el estallido, al alterar la tasa de humedecimiento de los agregados, y consecuentemente incrementan la estabilidad estructural (Guggenberger *et al.*, 1999), lo cual concuerda con las observaciones de este estudio. Las FE-PSRG, al acumularse sobre las partículas de los agregados, parecen formar una película protectora que reduce el movimiento del agua dentro de la estructura del agregado y su posterior ruptura (Miller y Jastrow, 2000).

La presencia de raíces activas, residuos de cosecha, y la actividad biológica que se desarrolla asociada a estos componentes son claves para mejorar la formación y estabilización de los agregados. El COP, las PSRG-FE y los carbohidratos, parecen ser las sustancias determinantes de estos procesos, especialmente en suelos limosos con escaso contenido de arena. Es por ello que para mejorar la calidad estructural de suelos franco-limosos es necesario establecer un alto índice de utilización de los suelos con rotaciones que produzcan altos volúmenes de residuos y raíces activas ya que estos mecanismos bióticos de agregación son los más importantes en estos suelos.

RESISTENCIA TÉNSIL DE LOS AGREGADOS Y FRIABILIDAD DEL SUELO

Las estadísticas descriptivas de los valores de RT y F correspondientes a las series de suelo Santa Isabel y Esperanza se presentan en la Tabla 3.8. Los coeficientes de variación de la RT fueron similares o inferiores a los reportados para otros suelos (Imhoff *et al.*, 2000; Tormena *et al.*, 2008a; Guimarães *et al.*, 2009; Bavoso *et al.*, 2010). Imhoff *et al.* (2002) establecieron que la forma de los agregados es uno de los principales factores que influyen la RT. En este estudio los agregados presentaron desde formas esféricas hasta alargadas, lo que podría justificar la variación encontrada; no obstante, para las mediciones fueron seleccionados los agregados más esféricos.

Los valores de RT y F fueron sometidos a un test de normalidad. En la serie Santa Isabel y Esperanza, la RT ($W= 0,936$ $p<0,001$; $W= 0,965$ $p<0,001$) y la F ($W= 0,962$ $p<0,01$; $W= 0,953$ $p<0,001$) ajustan a una distribución normal según el test de Shapiro-Wilk. En relación a la RT, estos resultados concuerdan con los obtenidos por Dexter y Watts (2000) y Guimarães *et al.* (2009). Sin embargo, diversos autores reportaron distribuciones logarítmicas para la RT (Perfect *et al.*, 1995; Imhoff *et al.*, 2002; Blanco-Canqui *et al.*, 2005).

El contenido hídrico del suelo es uno de los principales factores que influyen la RT (Ley *et al.*, 1989; Causarano, 1993; Perfect *et al.*, 1995). El valor medio de humedad de los agregados de la serie Santa Isabel y Esperanza fue $0,026$ y $0,027$ $g\ g^{-1}$. En ambas series no fueron constatadas diferencias en el contenido hídrico de los agregados entre los diferentes tratamientos, por lo tanto la variación de la RT y F solamente refleja el efecto de los tratamientos.

Tabla 3.8. Estadística descriptiva para las variables resistencia ténsil de los agregados y friabilidad del suelo (n: 2430) después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Suelo	Santa Isabel				Esperanza			
	RT (kPa)		F		RT (kPa)		F	
Tratamientos	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
+pl –res	49,2	23,9	0,32	24,5	77,1	27,0	0,32	13,6
+pl trigo bajo inc	40,9	32,8	0,36	22,2	72,6	25,3	0,32	14,9
+pl trigo alto inc	42,9	29,0	0,35	12,2	64,3	32,6	0,32	15,3
+pl soja bajo inc	50,0	28,4	0,33	10,8	70,0	26,6	0,32	13,9
+pl soja alto inc	45,9	21,2	0,36	18,7	75,3	23,0	0,35	15,9
+pl trigo bajo sup	55,5	28,1	0,28	18,1	72,9	36,1	0,36	17,4
+pl trigo alto sup	54,9	33,3	0,35	10,7	63,6	20,6	0,32	17,0
+pl soja bajo sup	52,2	20,1	0,31	9,8	70,9	27,6	0,35	10,8
+pl soja alto sup	54,4	28,8	0,37	27,3	74,4	21,1	0,37	16,3
-pl –res	36,6	29,1	0,32	15,6	42,7	24,7	0,39	14,2
-pl trigo bajo inc	25,2	25,9	0,49	17,5	52,6	11,2	0,32	9,7
-pl trigo alto inc	37,6	22,1	0,38	13,9	45,7	16,9	0,34	9,6
-pl soja bajo inc	21,7	22,9	0,41	19,2	54,7	13,1	0,33	10,9
-pl soja alto inc	25,2	34,2	0,34	21,5	49,3	17,5	0,30	16,3
-pl trigo bajo sup	31,1	26,2	0,30	13,8	52,2	27,0	0,33	9,1
-pl trigo alto sup	34,1	18,1	0,35	10,6	58,6	22,9	0,34	16,4
-pl soja bajo sup	33,9	21,1	0,28	16,4	50,8	23,9	0,36	21,4
-pl soja alto sup	27,4	30,5	0,28	14,4	60,5	23,4	0,30	13,3

+pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

La RT promedio fue mayor en el suelo serie Esperanza que en la serie Santa Isabel, siendo 61,1 y 39,9 kPa respectivamente. El contenido de arcilla dispersa y el limo son factores que influyen la RT (Kay y Angers, 1999). Ley *et al.* (1993) documentaron, para suelos tropicales, que estas fracciones parecerían actuar como agentes agregantes que favorecen incrementos de la RT. Por ello, el mayor contenido de arcilla y limo en la serie Esperanza (240 y 710 g kg⁻¹) respecto de la serie Santa Isabel (160 y 430 g kg⁻¹) podrían ser causantes de los mayores valores de RT. La presencia de una mayor proporción de partículas primarias grandes (> 53 µm) en la serie Santa Isabel y en consecuencia la menor cantidad de puntos de contacto interparticular, (*e.i.* falta de cohesión entre los granos de arena dentro de los agregados) tiende a producir menores valores de RT. Diversos autores señalan que el mayor contenido de arcilla conduce a la formación de mayores puentes de las arcillas entre las partículas dentro del agregado lo que incrementa la RT (Kemper *et al.*, 1987; Kay y Dexter, 1992). En concordancia con los resultados de este trabajo, otros estudios también encontraron una relación positiva entre el contenido de arcilla y la RT (Guérif, 1990; Materechera *et al.*, 1992; Lehrs *et al.*, 2012). Tormena *et al.* (2008b) en Latosolos (Oxisoles) provenientes de Brasil encontraron en suelos que presentaban mayores contenidos de arcilla (870 g kg⁻¹) valores superiores de RT (85-90 kPa). Imhoff *et al.* (2002) estudiaron el efecto del contenido de limo+arcilla y concluyeron que es uno de los factores intrínsecos del suelo que influye fuertemente la RT. Asimismo, los autores encontraron que el efecto del limo+arcilla sobre la RT depende de la fracción orgánica de los suelos estudiados.

En la serie Santa Isabel no hubo interacción significativa «crecimiento de plantas x residuos» sobre la RT. Los tratamientos con crecimiento de plantas mostraron valores más altos respecto de aquellos que no presentaban crecimiento de plantas (Fig. 3.1 A). Los residuos de cosecha no tuvieron efecto significativo sobre la RT (Fig. 3.1 B) y tampoco hubo efecto de la calidad, dosis y ubicación de los residuos (Fig. 3.2).

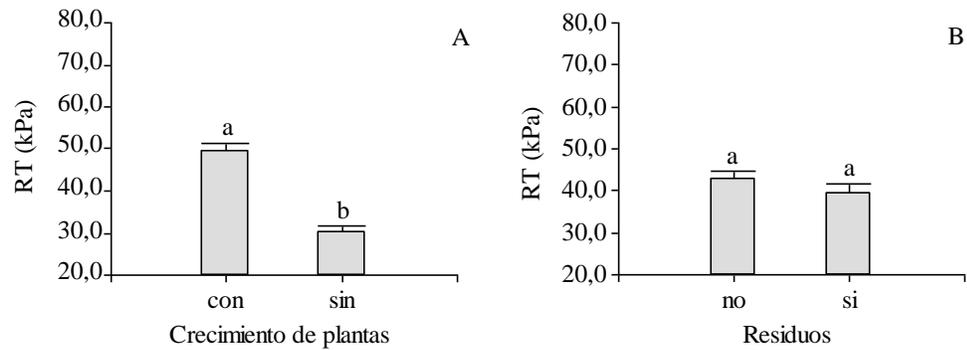


Fig. 3.1. Valor promedio de resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) en la serie Santa Isabel por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

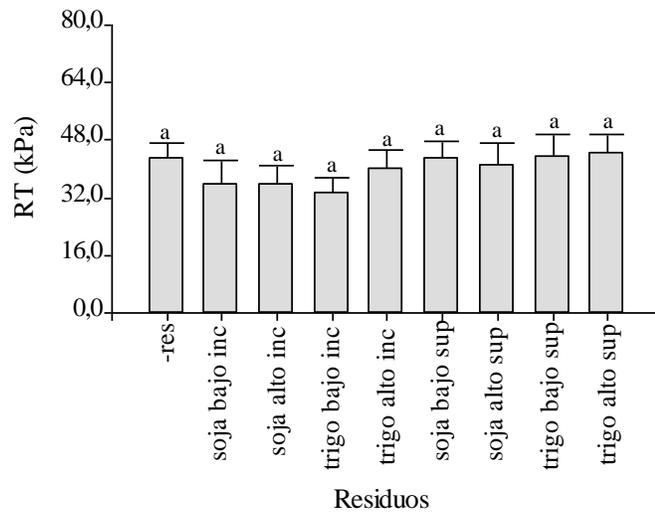


Fig. 3.2. Valores promedio de resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) en la serie Santa Isabel por efecto de la adición de residuos de cosecha (calidad, dosis y ubicación). Letras distintas indican diferencias entre tratamientos (Test de Tukey, $\alpha = 0,05$).

Similarmente, en la serie Esperanza la interacción entre crecimiento de plantas y residuos no fue significativa. En los tratamientos con crecimiento de plantas los agregados fueron más

duros (mayor RT) que aquellos sin crecimiento de plantas. La RT fue 39% mayor en los tratamientos con presencia de raíces (Fig. 3.3 A). La adición de residuos de cosecha no afectó la RT (Fig. 3.3 B). La calidad, la dosis y la ubicación de los residuos de cosecha adicionados al suelo no produjeron cambios en la RT (Fig. 3.4).

En ambos casos, se detectó que el crecimiento de plantas tuvo un marcado efecto sobre la RT, mientras que la adición de residuos no mostró efectos significativos. Esto coincide con lo reportado por Tisdall y Oades (1982) quienes indican que los exudados radiculares tienden a contribuir más rápidamente en la agregación y en consecuencia sobre la RT, que aquellos producidos durante la mineralización de la celulosa o de los residuos de las plantas.

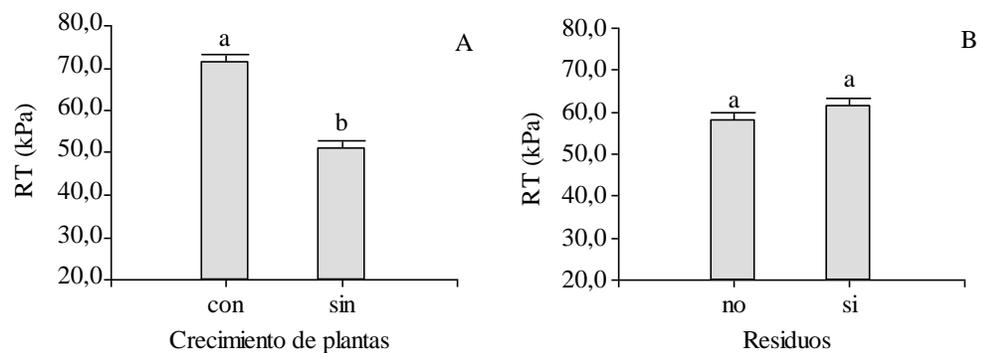


Fig. 3.3. Valor promedio de resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) en la serie Esperanza por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

Las plantas tuvieron efectos físicos y químicos sobre la RT. Los mayores valores de RT en los tratamientos con crecimiento de plantas pueden estar asociados a variaciones en la intensidad y en la frecuencia de los ciclos de humedecimiento y secado que producen las raíces en el suelo (Tormena *et al.*, 2008a). La absorción de agua por las plantas causa un secado localizado del suelo en la zona de producción de mucilagos, que promueve la unión de los exudados radiculares sobre superficies coloidales (Reid y Goss, 1982). Además genera un incremento de la

cohesión y de la resistencia del suelo como resultado de un aumento de los puntos de contacto y de las fuerzas de capilaridad (Kemper y Rosenau, 1984; Horn y Dexter, 1989). Materechera *et al.* (1992) reportaron para un suelo franco arenoso que la presencia de plantas y los cambios en el régimen hídrico del suelo incrementaron la formación y la resistencia de agregados respecto de los suelos sin vegetación. Además argumentaron que el incremento puede deberse a un efecto combinado de la acción mecánica de las raíces y por la contribución de los exudados orgánicos radiculares y de los microorganismos. Czarnes *et al.* (2000) encontraron que el secado del suelo y los exudados producidos durante el crecimiento de un cultivo de maíz funcionaron como fuerzas cohesivas que incrementaron la resistencia de los agregados. La resistencia resultó mayor en los agregados que se encontraban próximos al sistema radicular que en el resto del suelo.

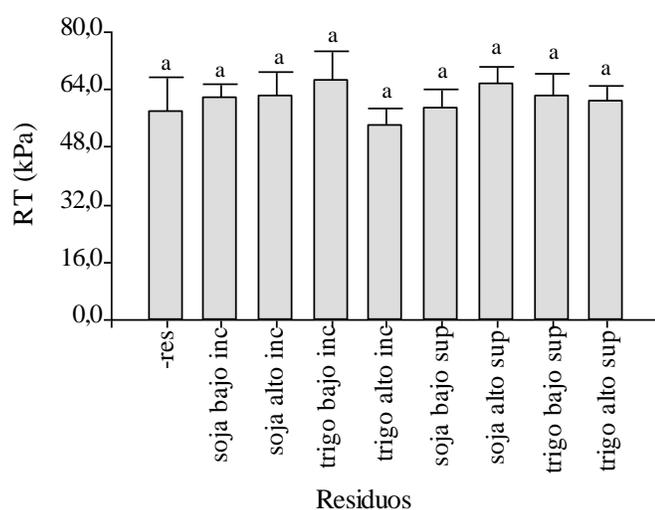


Fig. 3.4. Valores promedio de resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) en la serie Esperanza por efecto de la adición de residuos de cosecha (calidad, dosis y ubicación). Letras distintas indican diferencias entre tratamientos (Test de Tukey, $\alpha = 0,05$).

Tormena *et al.* (2008a), en suelos de diferente textura y clima a los del presente estudio, verificaron que la mayor actividad y diversidad radicular de las rotaciones de cultivos respecto de las secuencia trigo-soja generan agregados más estables. Similarmente, Munkholm *et al.*

(2001) reportaron, en un suelo franco arenoso, agregados más fuertes en suelos cultivados orgánicamente con una rotación de cultivos diversificada que en suelos cultivados con predominio de cultivos anuales sin aporte de enmiendas. Estos autores concluyeron que los mecanismos de enredo (hifas fúngicas y raíces) y de enlace o unión (polisacáridos) producidos por la elevada actividad biológica (Degens, 1997) desempeñaron un rol clave en el incremento de la resistencia.

A diferencia de los resultados encontrados en este estudio, Blanco-Canqui y Lal, (2007), en un ensayo de larga duración desarrollado sobre un suelo franco limoso verificaron que la aplicación anual de diferentes dosis de residuos de trigo produjo un incremento en la RT. El incremento fue atribuido a los componentes orgánicos derivados de los residuos, i.e. ácidos húmicos y polisacáridos, que incrementaron la cohesión de las partículas entre y dentro de los agregados. Blanco-Canqui y Lal, (2008) observaron en el mismo experimento que la remoción continua de residuos de cosecha produjo una menor RT atribuido a una reducción de los agentes orgánicos derivados de residuos y de los exudados y excreciones provenientes de los macro y microorganismos del suelo.

Con relación a la F, no fueron detectadas diferencias entre las series de suelo (Santa Isabel= 0,35; Esperanza= 0,34) (Fig. 3.5). Para la clasificación de cada suelo y tratamiento en relación a la F, fue adoptado el método del coeficiente de variación propuesto por Imhoff *et al.* (2002) y la F de cada serie de suelo (Fig. 3.5) y de los diferentes tratamientos (Tabla 3.8) pueden ser clasificados como “friable”. Este estado asegura condiciones físicas adecuadas para un buen contacto suelo-semilla durante la siembra. Según Macks *et al.* (1996), en sistemas de siembra directa, la condición de suelo friable implica que el suelo requiere de un movimiento mínimo para producir una adecuada cama de siembra de pequeños agregados que proveen condiciones óptimas para la germinación y establecimiento de plantas.

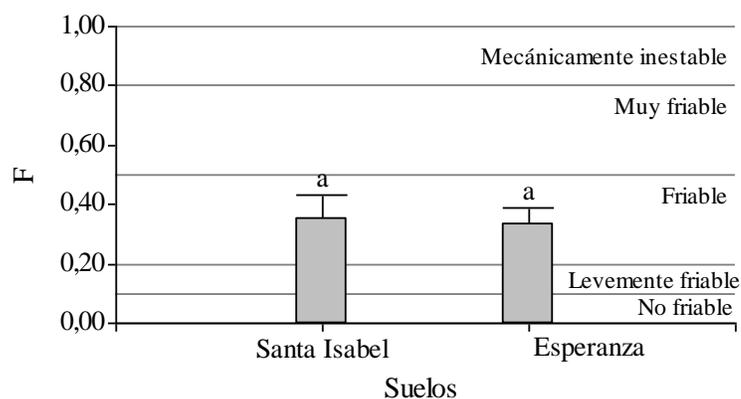


Fig. 3.5. Valor promedio de friabilidad (F) en la serie Santa Isabel y Esperanza. Líneas horizontales indican los rangos de clasificación de friabilidad según Imhoff *et al.* (2002). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

En cada serie de suelo tampoco se detectaron efectos significativos debido al crecimiento de plantas y adición de residuos (Fig. 3.6 y 3.7). Es decir que la F, a diferencia de la RT, resultó un indicador menos sensible para detectar los efectos de los distintos tratamientos. A pesar de que se registraron mayores valores de RT en determinados tratamientos, este comportamiento no estuvo asociado a la esperada variación de F.

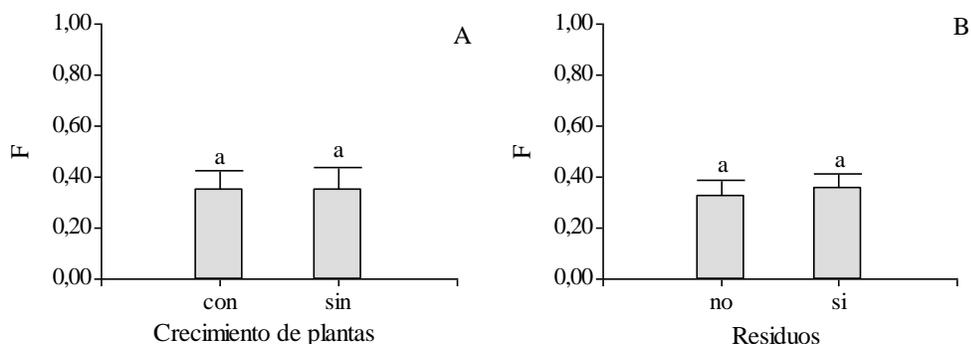


Fig. 3.6. Valor promedio de friabilidad (F) en la serie Santa Isabel por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

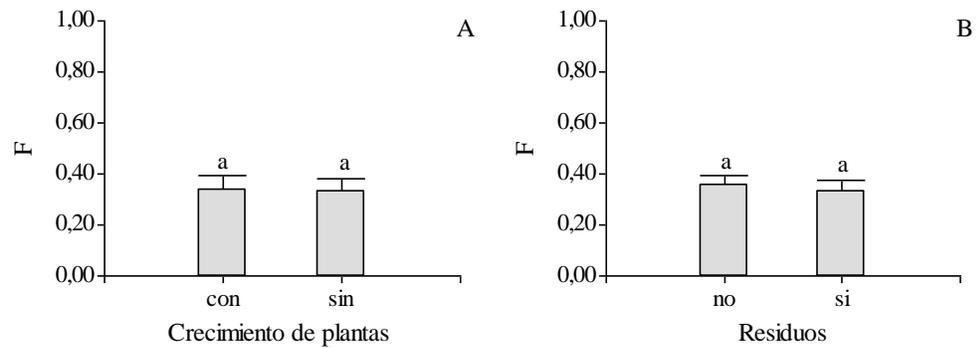


Fig. 3.7. Valor promedio de friabilidad (F) en la serie Esperanza por efecto del crecimiento de plantas (A) y adición de residuos de cosecha (B). Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

RELACIÓN ENTRE LOS AGENTES DE AGREGACIÓN Y LA RESISTENCIA TÉNSIL DE LOS AGREGADOS

El análisis de correlación lineal entre los diferentes agentes de agregación en los macro y microagregados y los valores de RT del suelo serie Santa Isabel y Esperanza se detalla en la Tabla 3.9. Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas aunque moderadas a débiles entre los agentes de agregación y los valores de RT de ambas series de suelo. Las variables relacionadas con la actividad fúngica (PSRG y PRRG-FE) presentaron correlación positiva moderada con ambas series de suelo, aunque las relaciones disminuyeron en la serie Esperanza. El COT presentó una relación superior con la RT de la serie Santa Isabel y menor en la serie Esperanza. En cambio, la relación entre COP y RT manifestó un comportamiento opuesto. Los CHag mostraron relaciones débiles con la RT de la serie Esperanza y Santa Isabel, siendo en este último caso no significativas. En general, los CHac y CHt presentaron correlación positiva y moderada con la RT de ambas series de suelo.

Tabla 3.9. Coeficientes de correlación entre los agentes de agregación y la resistencia ténsil del suelo serie Santa Isabel y Esperanza.

Agentes de agregación	Resistencia ténsil	
	Serie Santa Isabel	Serie Esperanza
COT	0,51	0,43
COP	0,20	0,51
CHag Ma	0,10 ^{NS}	0,19 ^{NS}
CHag Mi	0,38 ^{NS}	0,27
CHac Ma	0,43	0,46
CHac Mi	0,48	0,50
CHt Ma	0,52	0,43
CHt Mi	0,18	0,54
PSRG Ma	0,58	0,43
PSRG Mi	0,39	0,25
PSRG-FE Ma	0,56	0,50
PSRG-FE Mi	0,54	0,36

^{NS} = no significativo $p \leq 0,001$. COT, carbono orgánico total; COP, carbono orgánico particulado; CHag Ma, carbohidratos solubles en agua caliente en los macroagregados; CHag Mi, carbohidratos solubles en agua caliente en los microagregados; CHac Ma, carbohidratos solubles en ácido diluído en los macroagregados; CHac Mi, carbohidratos solubles en ácido diluído en los microagregados; CHt Ma, carbohidratos totales en los macroagregados; CHt Mi, carbohidratos totales en los microagregados; PSRG-FE Ma, proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble en los macroagregados; PSRG-FE Mi, proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble en los microagregados; PSRG Ma, proteínas del suelo relacionadas con la glomalina en los macroagregados; PSRG Mi, proteínas del suelo relacionadas con la glomalina en los microagregados.

En la Tabla 3.10 se presentan los modelos de predicción de la RT a partir de los agentes de agregación correspondientes a la serie Santa Isabel y Esperanza. La RT en la serie Santa Isabel presentó una relación lineal positiva con los valores de $PSRG_{Ma}$ y CHt_{Ma} , lo que demuestra que estos agentes están involucrados en el proceso de agregación e intervienen a través de los mecanismos de pegado y enredo de las partículas del suelo (30 y 46 % respectivamente) (Tisdall y Oades, 1982; Degens, 1997). A su vez, los coeficientes de correlación entre la RT y estos agentes indican que son importantes promotores de la agregación (Tabla 3.9).

Tabla 3.10. Modelos de regresión para la estimación de la resistencia ténsil de los agregados en función de los agentes de agregación de la serie Santa Isabel y Esperanza.

Suelo	Modelo	R ² aj.	P
Serie Santa Isabel	RT = -150,81 + 0,04 CHt _{Ma} + 36,35 PSRG _{Ma}	0,64	<0,0001
Esperanza	RT = -38,54 + 72,95 PSRG-FE _{Ma} + 5,20 COP	0,48	0,0004

RT es resistencia ténsil de los agregados (kPa), CHt_{Ma} es la concentración de carbohidratos totales del suelo en los macroagregados (mg C kg suelo⁻¹), PSRG_{Ma} es el contenido de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina en los macroagregados (mg g⁻¹ suelo), PSRG-FE_{Ma} es el contenido proteínas del suelo relacionadas a la glomalina fácilmente extraíbles en los macroagregados (mg g⁻¹ suelo) y COP es el contenido de carbono orgánico particulado (g kg suelo⁻¹).

En la serie Esperanza, las PSRG-FE_{Ma} fue la variable que más fuertemente influyó sobre la RT de los agregados y por consiguiente sobre la agregación del suelo (R² parcial= 54%). Mientras que el COP mostró un efecto más débil y explica el 19% de la variación de la RT (Tabla 3.10). El proceso de agregación, en este suelo, estuvo más vinculado con el efecto combinado de enredo de las hifas fúngicas y de las raíces de los cultivos que con el efecto agregante del COP. El COS está asociado a incrementos de la RT, dado que actúa como agente agregante de las partículas minerales y estabiliza los agregados del suelo y como núcleo para la formación de nuevos agregados (Bartoli *et al.*, 1992; Casuarano, 1993; Imhoff *et al.*, 2000). En coincidencia con este estudio, Guérif, (1990); Watts y Dexter (1997); Blanco-Canqui *et al.* (2005); Tormena *et al.* (2008b) y Abid y Lal (2009) encontraron correlaciones débiles o negativas entre estas dos variables. Estas respuestas contradictorias sugieren que la influencia del COT sobre la RT es variable y depende de la interacción con la textura del suelo (Imhoff *et al.*, 2000), con su grado de humificación (Ekwue, 1990; Zhang, 1994) y con el manejo del suelo (Blanco-Canqui *et al.*, 2005).

Dexter *et al.* (2008) establecieron una relación entre el contenido de arcilla y de COT ($n = \text{Contenido de arcilla}/\text{COT}$). Si el valor de esta relación se ubica por encima de 10, la arcilla del suelo no se encuentra “saturada” con COT y es esperable una influencia sobre las propiedades físicas del suelo. En el suelo limoso, el valor de n fue de 15,7 [(contenido de arcilla = 24) / (COT = 1,53) = 15,7]. El modelo de regresión permite confirmar que, dada la instaura-

ción de carbono de las arcillas, hubo un efecto directo del carbono sobre propiedades físicas del suelo, como la RT. Estos autores no especifican acerca de los efectos de la calidad de COT, y en este estudio fue referido al COP.

En el área estudiada la información cuantitativa sobre los valores de RT es inexistente. La mayoría de estos estudios se han conducido en diferentes condiciones edafoclimáticas a las aquí estudiadas incluyendo diferentes texturas y mineralogías, así como también diferentes sistemas de producción y de cultivos. A su vez, la literatura muestra la relación entre la RT y otras propiedades químicas y físicas de suelo, tales como COS, contenido de óxidos, tipo de textura (Zhang, 1994; Imhoff *et al.*, 2002; Munkholm y Kay, 2002; Lehrs *et al.*, 2012) y no con diferentes agentes orgánicos como polisacáridos y glomalina que contribuyen marcadamente en el proceso de agregación.

La relación entre los diferentes agentes de agregación y la RT permitieron realizar estimaciones aceptables de dicha propiedad a partir de modelos de regresión en cada una de las series de suelo. En este contexto, dada la capacidad predictiva de estos modelos, resulta interesante la utilización de estos modelos de regresión para la estimación de la RT en suelos con características texturales similares a las del presente estudio.

Los resultados obtenidos permiten establecer que en suelos con textura franca y/o limosa la adopción de sistemas de manejo que incluyan sistemas radiculares activos y una constante producción de agentes de agregación, permitirán asegurar una mayor estabilidad del sistema poroso del suelo ante distintos tipos de estrés aplicado en el suelo e, indirectamente, brindar una mejor calidad estructural y física del suelo para las plantas (Tormena *et al.*, 2008b). Los valores mayores de RT implican que la cama de siembra estará formada por agregados de mayor tamaño, en lugar de a una amplia distribución de tamaño de agregados, que resultan beneficiosos para optimizar las condiciones físicas de suelo adyacentes a las semillas y raíces. Por consiguiente, el mantenimiento de una estructura porosa en los suelos asegura a las plantas el

aporte de cantidades adecuadas de nutrimentos, agua y aire además de presentar baja resistencia mecánica para que las raíces puedan explorar el mayor volumen de suelo.

ESTRES EFECTIVO

Los valores promedios de RP , θ y σ correspondientes a las series de suelo Santa Isabel y Esperanza se presentan en la Tabla 3.11. Las diferentes propiedades físicas no mostraron diferencias significativas por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha.

El contenido hídrico del suelo a determinado valor de potencial mátrico puede variar en función de la textura del suelo, tenor de materia orgánica y grado de compactación del suelo. Para determinar el efecto combinado de estos factores surge el indicador denominado estrés efectivo (σ) propuesto por Mullins y Panayiotopoulos (1984). Además, estos autores señalaron que cualquier factor que altere σ (*e.i.* densificación del suelo, sustancias aglutinantes) afectará indirectamente la resistencia mecánica del suelo, ya que esta propiedad es función de la densidad y de la humedad del suelo.

En la Tabla 3.12 se muestran los coeficientes “a” y “b” (ecuación 3.5) de las ecuaciones de ajuste entre RP y σ para cada uno de los tratamientos de la serie de suelo Santa Isabel y Esperanza. La mayoría de los tratamientos mostraron una relación lineal positiva entre $RP - \sigma$ ya que los coeficientes resultaron significativos. Otros estudios también documentaron una correlación lineal y positiva entre ambas variables (Fabiola *et al.*, 2003; Whalley *et al.*, 2005; Imhoff *et al.*, 2014; Mazola *et al.*, 2014).

Tabla 3.11. Valores promedio de resistencia a la penetración (RP, MPa), contenido hídrico (θ , $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$), estrés efectivo (σ , kPa) para diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Tratamientos	Santa Isabel			Esperanza		
	RP	θ	σ	RP	θ	σ
+pl –res	1,58	0,31	13,5	2,08	0,33	16,59
+pl trigo bajo inc	1,61	0,32	14,22	1,34	0,31	16,03
+pl trigo alto inc	1,53	0,31	12,85	1,30	0,32	15,59
+pl soja bajo inc	1,45	0,33	14,28	1,32	0,32	15,44
+pl soja alto inc	1,42	0,30	13,98	1,52	0,31	14,31
+pl trigo bajo sup	1,91	0,33	16,18	1,94	0,34	17,24
+pl trigo alto sup	1,68	0,32	15,47	1,63	0,34	17,61
+pl soja bajo sup	2,04	0,33	14,54	1,86	0,33	15,51
+pl soja alto sup	1,60	0,30	13,06	1,78	0,34	15,77
-pl –res	1,61	0,33	15,72	1,16	0,33	13,86
-pl trigo bajo inc	1,55	0,32	15,04	1,12	0,31	15,51
-pl trigo alto inc	1,42	0,32	15,15	1,09	0,32	12,52
-pl soja bajo inc	1,53	0,33	12,77	1,21	0,32	13,87
-pl soja alto inc	1,62	0,32	13,40	1,37	0,31	13,77
-pl trigo bajo sup	1,57	0,33	14,75	1,37	0,34	17,05
-pl trigo alto sup	1,53	0,35	17,76	1,40	0,34	18,32
-pl soja bajo sup	1,38	0,34	15,86	1,59	0,33	16,60
-pl soja alto sup	1,40	0,35	15,58	1,62	0,33	17,53

+pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

Tabla 3.12. Coeficientes “a” y “b” de las ecuaciones de ajuste entre resistencia a la penetración (RP) y estrés efectivo (σ) para diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Tratamientos	Santa Isabel		Esperanza	
	coeficiente “a”	coeficiente “b”	coeficiente “a”	coeficiente “b”
+pl –res	0,711*	0,02*	1,174*	0,03
+pl trigo bajo inc	0,614*	0,04*	0,645*	0,02
+pl trigo alto inc	0,855*	0,02*	0,784*	0,01
+pl soja bajo inc	0,812*	0,03	0,528*	0,02*
+pl soja alto inc	0,642*	0,02	0,667*	0,01
+pl trigo bajo sup	1,275*	0,03*	0,908*	0,03*
+pl trigo alto sup	0,846*	0,01	1,134*	0,002
+pl soja bajo sup	1,085*	0,02	0,859*	0,04*
+pl soja alto sup	0,390	0,01	0,874*	0,03*
-pl –res	1,321*	0,05*	0,797*	0,03*
-pl trigo bajo inc	0,712*	0,05*	0,267	0,03*
-pl trigo alto inc	0,766*	0,03*	0,209	0,04*
-pl soja bajo inc	0,369	0,03*	0,437*	0,001
-pl soja alto inc	0,527*	0,01	0,305*	0,001
-pl trigo bajo sup	0,783*	0,02	0,653*	0,02
-pl trigo alto sup	0,956*	0,04*	0,922*	0,001
-pl soja bajo sup	0,803*	0,05*	0,813*	0,01
-pl soja alto sup	0,881*	0,07*	0,843*	0,02*

Valores seguidos por asterisco indican que el parámetro es significativo ($\alpha = 0,05$). +pl: con crecimiento de plantas de trigo; -pl: sin crecimiento de plantas de trigo; +res: con adición de residuos; -res: sin adición de residuos; trigo y soja: calidades de residuos; alto y bajo: dosis de residuos; inc: residuos incorporados en el suelo; sup: residuos ubicados en la superficie del suelo.

El coeficiente “a” (ordenada al origen) representa el efecto de cohesión entre las partículas del suelo producida principalmente por agentes agregantes de tipo orgánico y químico, mientras que el coeficiente “b” (pendiente) es explicado por el efecto de fricción entre partículas y

el efecto de las fuerzas actuantes en la capilaridad, las cuales se incrementan con la densificación del suelo (Vepraskas, 1984).

En la serie Santa Isabel, no hubo diferencias entre tratamientos en los valores de “a” debido al crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha. Por el contrario, las diferencias angulares (coeficiente “b”) fueron explicadas por el crecimiento de plantas (Tabla 3.13). Este comportamiento puede atribuirse a que en ausencia de sistemas radicales activos diversos mecanismos, tales como penetración radicular, producción de exudados y cambios en el régimen hídrico, que fomentan la agregación del suelo no se producen, lo que genera la formación de poros capilares pequeños y el incremento del contacto entre las partículas (Haynes y Beare, 1997; Six *et al.*, 2004). Esto determina la formación de mayor número de meniscos que mantienen más fuertemente unidas las partículas cuando el suelo está seco y por otro lado una mayor fricción entre ellas que dificulta su desplazamiento cuando el suelo se seca aumentando la resistencia mecánica (Miretti *et al.*, 2010).

Tabla 3.13. Contrastes ortogonales de los coeficientes “a” y el “b” después de aplicar diferentes tratamientos de crecimiento de plantas y adición de residuos (calidad, dosis y ubicación) en la serie Santa Isabel y Esperanza.

Contrastes	Serie Santa Isabel		Serie Esperanza	
	coeficiente “a”	coeficiente “b”	coeficiente “a”	coeficiente “b”
-pl vs + pl	0,013	0,015*	-0,258*	0,004
-res vs +res	-0,246	-0,003	-0,308	-0,011
soja vs trigo	0,161	0,003	0,002	0,004
alta vs baja	0,073	0,006	-0,079	0,009
inc vs sup	0,216	0,003	0,395	0,004

Valores seguidos por asterisco indican que el contraste resultó significativo ($\alpha = 0,05$).

El incremento en la RP con el aumento del σ es mayor en los tratamientos sin crecimiento de plantas (Fig. 3.8). A pesar de las diferencias angulares, la mayoría de los valores de RP

permanecieron por debajo del umbral crítico (2 MPa) en todo el rango de σ medido, indicando que a medida que disminuye el contenido hídrico del suelo, la resistencia que opone su matriz a la deformación no se torna restrictiva para el crecimiento de las raíces en suelos de textura franca. Sin embargo, en los tratamientos sin crecimiento de plantas el valor crítico de RP se supera con σ próximos a 20 kPa en condiciones de humedad adecuada (Fig. 3.8), lo que probablemente provocará reducción en el desarrollo de las plantas.

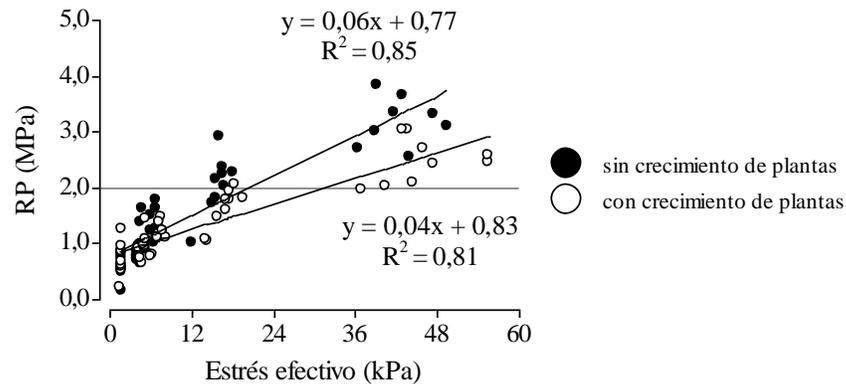


Fig. 3.8. Resistencia a la penetración (RP, MPa) en función del estrés efectivo (σ , kPa) para tratamientos con y sin crecimiento de plantas en la serie Santa Isabel ($y=RP$; $x = \sigma$). La línea horizontal representa el umbral crítico de resistencia a la penetración (2 MPa).

En la serie Esperanza, el crecimiento de las plantas produjo un aumento significativo en los valores de “a”. Por otro lado, el crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha no produjeron cambios significativos del coeficiente “b” (Tabla 3.13 y Fig. 3.9). Esto demuestra que los sistemas radicales incorporan materia orgánica lábil, favorecen la liberación de exudados y estimulan la biomasa microbiana que contribuyen a la cohesión de las partículas en suelos con altos contenidos de limo. El aporte de materia orgánica en este suelo no modificó las fuerzas de fricción entre partículas-penetrómetro (o raíz) y de las fuerzas de adhesión entre partículas-agua (efecto menisco). En contraste con estos resultados, Miretti *et al.* (2010) en sectores con manchones de alfalfa y áreas normales en suelos franco limosos no documentaron

diferencias en el coeficiente “a”. Ambas áreas presentaban similares contenidos de carbono orgánico y textura y por ello atribuyeron la falta de diferencias en este coeficiente.

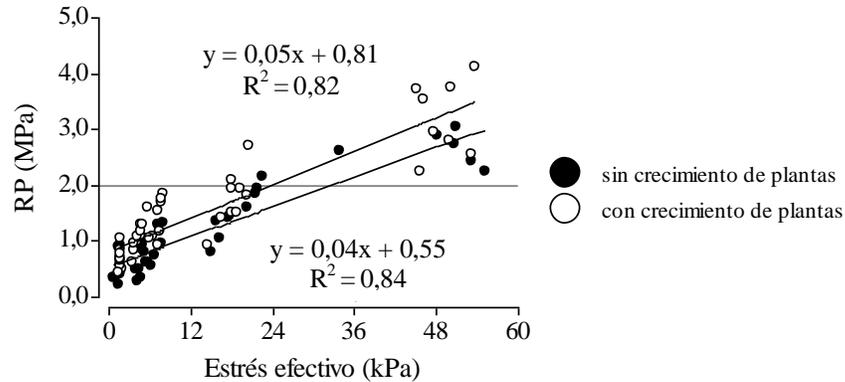


Fig. 3.9. Resistencia a la penetración (RP, MPa) en función del estrés efectivo (σ , kPa) para tratamientos con y sin crecimiento de plantas en la serie Esperanza ($y=RP$; $x = \sigma$). La línea horizontal representa el umbral crítico de resistencia a la penetración (2 MPa).

Imhoff *et al.* (2014) reportaron, en suelos similares a los del presente estudio, la utilidad de σ como indicador de calidad de suelo cuando el mismo se asocia a los valores medidos de RP. Estos autores determinaron que la aplicación de efluentes líquidos de tambo en dosis elevadas tuvo un efecto positivo sobre la calidad física del suelo al disminuir la densidad, resistencia mecánica y estrés efectivo del suelo. Estos resultados también fueron corroborados por Mazola *et al.* (2014) al estudiar el efecto de enmiendas orgánicas (nocheros) e inorgánicas (aplicación de carbonato de calcio) sobre estas propiedades físicas en suelos de la pampa llana santafesina.

CONCLUSIONES

El crecimiento de las plantas y la adición de residuos de cosecha causaron cambios significativos en las propiedades físicas del suelo franco y franco limoso. La magnitud del impacto varió entre los suelos debido a sus características texturales y contenido de carbono orgánico inicial. La actividad radical y la presencia de residuos de cosecha fueron esenciales en la reducción de los diferentes mecanismos de desagregación, principalmente en el suelo limoso. La menor estabilidad estructural se asocia principalmente a una menor cantidad de agentes orgánicos de agregación en los suelos sin la presencia de plantas y/o residuos de cosecha. Los polisacáridos y la actividad fúngica asociada a la producción de proteínas del tipo de las glomalinas fueron relevantes en la reducción de la desagregación del suelo, principalmente del fenómeno de estallido. Los resultados sugieren que es necesario maximizar la presencia radicular y un suministro constante de residuos de cosecha para mantener una adecuada cantidad de agentes orgánicos de agregación requeridos para la formación jerárquica de agregados.

Por otra parte, este estudio generó información sobre los valores de RT y F para suelos de clima templado, con diferentes texturas y similar mineralogía. La textura del suelo y la presencia de los sistemas radicales de las plantas, a través de diversos mecanismos químicos y físicos, influenciaron fuertemente la RT. La F fue menos sensible y en ambas series fueron clasificadas como friables independientemente de los tratamientos aplicados. Los valores más elevados de RT, resultante de la mayor actividad de las raíces del cultivo de trigo, generan una mayor estabilidad del sistema poroso frente a las diversas clases de estrés que pueda sufrir el suelo e, indirectamente, favorecer el crecimiento de las plantas debido a una mejor condición física del suelo. En este sentido, la intensificación de las rotaciones de cultivos de los suelos manejados en sistemas de siembra directa, respecto de barbechos desnudos prolongados, es una práctica recomendable para mantener la calidad estructural y mejorar el manejo físico de estos suelos. Esto sugiere que la RT es una propiedad sensible para estimar la respuesta del suelo ante cambios en su uso y puede ser utilizada como un indicador adecuado de la calidad estructural del suelo. Su determinación no sólo es importante para conocer el estado estructu-

ral del suelo sino también la implicancia de las prácticas de manejo. Además este estudio permitió determinar que los valores de RT, en el corto plazo, están asociados fuertemente con la naturaleza de los agentes orgánicos de unión de agregados del suelo.

En ambas series de suelo, el estrés efectivo explicó la mayor parte de la variabilidad de la resistencia a la penetración del suelo. El estrés efectivo mostró ser un indicador sensible para detectar diferencias relacionadas con el crecimiento de plantas, no así con la adición de residuos de cosecha independientemente de su calidad, dosis y ubicación. En ambas series de suelo, con contenidos de humedad adecuados, la matriz del suelo no opone restricciones importantes en la retención y liberación de agua para el crecimiento radical de las plantas. Sin embargo el crecimiento de plantas tuvo un efecto positivo sobre la calidad física del suelo al favorecer la presencia de sustancias agregantes y la disminución de las fuerzas de contacto entre las partículas del suelo. Por ello, la presencia de sistemas radicales activos constituye una herramienta para el manejo sustentable de los sistemas agrícolas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abid M. and Lal R. 2009. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage Research* 103: 364-372.
- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A. and Leterme P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during the decomposition of organic material. *European Journal of Soil Science* 58: 239-247.
- Álvarez C.R., Taboada M.A., Gutierrez Boem F.H., Bono A., Fernandez P.L. y Prystupa P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the rolling pampa region of Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1242-1250.
- Amézketa E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14: 83-151.
- Annabi M., Houot S., Francou C., Poitrenaud M. and Le Bissonnais Y. 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal* 71: 413-423.
- Annabi M., Le Bissonnais Y., Le Villio-Poitrenaud M. and Houot S. 2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 144: 382-389.
- Aoyama M., Angers D.A. and N'Dayegamiye A. 1999. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Canadian Journal of Soil Science* 79: 295-302.
- Barbosa A., Taboada M.A. Rodriguez M.B. y Cosentino D.J. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada (Argentina). *Ciencia del Suelo* 15: 81-86.
- Bartoli F., Burtin G. and Guérf J. 1992. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water-stability. *Geoderma* 54: 259-274.
- Bavoso M.A., Giarola N.F., Tormena C.A. and Pauletti V. 2010. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 227-234.
- Blake G.R. and Hartge K.H. 1986. Bulk density. En: *Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Methods*. Klute, A. (ed.). Soil Science Society of America, Madison, USA, pp. 363-375.
- Blanco-Canqui H., Lal R., Owens L.B., Post W.M. and Izaurralde R.C. 2005. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1472-1481.
- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2007. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil and Tillage Research* 95: 240-254.
- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2008. Corn stover removal impacts on micro-scale soil physical properties. *Geoderma* 145: 335-346.

- Causarano H. 1993. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil and Tillage Research* 28: 15-25.
- Chenu C. and Guérif J. 1991. Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Science Society of America Journal* 55: 1076-1080.
- Chenu C., Le Bissonnais Y. and Arrouays D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64: 479-1486.
- Cosentino D., Chenu C. and 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.
- Czarnes S., Hallett P.D., Bengough G. and Young I.M. 2000. Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science* 51: 435-443.
- De Gryze S., Six J., Brits C. and Merckx R. 2005. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 55-66.
- Degens B.P. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Australian Journal of Soil Research* 35: 431-459.
- Denef K. and Six J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal of Soil Science* 56: 469-479.
- Dexter A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research* 11: 199-238.
- Dexter A.R. and Kroesbergen B. 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research* 31: 139-147.
- Dexter A.R. and Watts C. 2000. Tensile strength and friability. En: *Soil and environmental analysis: physical methods*. Smith, K. and Mullins, C., (eds.). Marcel Dekker, New York, USA, pp. 401-430.
- Dexter A.R., Richard G., Arrouays D., Czyz E.A., Jolivet C. and Duval O. 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144: 620-627.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C.W. 2013. *InfoStat, versión 2013*, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Ekwue E.I. 1990. Organic-matter effects on soil strength properties. *Soil and Tillage Research* 16: 289-297.
- Fabiola N., Giarola B., Silva A.P., Imhoff S. and Dexter A.R. 2003. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma* 113: 95-108.
- 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: 129-139.
- Goebel M., Bachmann J., Woche S.K. and Fischer W.R. 2005. Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter. *Geoderma* 128: 80-93.
- Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O. and Clarke P. 1994. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C P/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research* 32: 285-309.

- Golchin A., Baldock J.A. and Oades J.M. 1997. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. En: Soil processes and the carbon cycle. Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F. and Stewart, B.A., (eds.). CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 245-266.
- Guérif J. 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil and Tillage Research* 16: 167-178.
- Guggenberger G., Frey S.D., Six J., Paustian K. and Elliott E.T. 1999. Bacterial and fungal cell-wall residues in conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1188-1198.
- Guimarães R.M., Tormena C.A., Alves S.J., Fidalski J. and Blainski E. 2009. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Scientia Agricola* 66: 499-505.
- Hallett P.D., Ritz K. and Wheatley R.E. 2001. Microbial derived water repellency in golf course soil. *International Turfgrass Society* 9: 518-524.
- Haynes R.J. and Francis G.S. 1993. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *Journal Soil Science* 44: 665-675.
- Haynes R.J. and Beare M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1647-1653.
- Haynes R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An Overview. *Advances in Agronomy* 85: 221-268.
- Horn R. and Dexter A.R. 1989. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil and Tillage Research* 13: 253-266.
- Imhoff S. 2000. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos. Tesis Doctorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Brasil, 104 pp.
- Imhoff S., Silva, A.P. and Dexter A. 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1656-1661.
- Imhoff S., Ghiberto P., Grioni A. and Gay J.P. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the flat Pampas of Argentina. *Geoderma* 158: 95-108.
- Imhoff S., Tomatis S. Fernandez P. y Ghiberto P. 2014. Relacion estrés efectivo-resistencia mecánica en suelos abonados con efluentes líquidos de tambo. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas, Bahía Blanca, Argentina.
- Kay B.D. 1998. Soil structure and organic carbon: a review. En: Soil processes and the carbon cycle. Lal R., Kimble J.M., Follett R.F. and Stewart B.A., (eds.), Boca Raton, CRC Press, Florida, USA, pp. 169-197.
- Kay B.D. and Dexter A.R. 1992. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. *Australian Journal of Soil Research* 30: 297-310.
- Kay B.D. and Angers D.A. 1999. Soil structure. En: Handbook of soil science. Summer, M.E. (ed.). CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 229-276.

- Kemper W. and Rosenau R. 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal* 48: 1001-1006.
- Kemper W.D., Rosenau R.C. and Dexter A.R. 1987. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. *Soil Science Society of America Journal* 51: 860-867.
- Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437.
- Lehrsch G.A., Sojka R.E. and Koehn A.C. 2012. Surfactant effects on soil aggregate tensile strength. *Geoderma* 189-190: 199-206.
- Ley G.J., Mullins C.E. and Lal R. 1989. Hard-setting behavior of some structurally weak tropical soils. *Soil and Tillage Research* 13: 365-381.
- Ley G.J., Mullins C.E. and Lal R. 1993. Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. *Soil and Tillage Research* 28: 1-13.
- Liu A., Ma B. and Bomke A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of America* 69: 2041-2048.
- Macks S.P., Murphy B.W., Cresswell H.P. and Koen T.B. 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Australian Journal of Soil Research* 34: 343-360.
- Maqubela M.P., Muchaonyerwa P. and Mnkeni P.N. 2012. Inoculation effects of two south African cyanobacteria strains on aggregate stability of a silt loam soil. *African Journal of Biotechnology* 11: 10726-10735.
- Martins M., Corá J., Jorge R. and Marcelo A. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil and Tillage Research* 104: 22-29.
- Masola M.J., Imhoff S., Carrizo M.E., Alesso C.A. y Gambaudo S. Evolución de propiedades físicas con la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas, Bahía Blanca, Argentina.
- Materechera S.A., Dexter A.R. and Alston A.M. 1992. Formation of aggregates by plant roots in homogenized soils. *Plant Soil* 142: 69-79.
- Materechera S.A., Kirby J.M., Alston A.M. and Dexter A.R. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant and Soil* 160: 57-66.
- Micucci F. and Taboada M. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 86: 152-162.
- Miller R.M. and Jastrow J.D. 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure. En: *Arbuscular mycorrhizas: physiology and function*. Kapulnik, Y. and Douds, D.D. Jr, (eds.). Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp 3-18.
- Miretti M.C., Imhoff S., Silva A.P. and Lavado S.R. 2010. Soil structure degradation in patches of alfalfa fields in Santa Fe. *Scientia Agricola* 67: 604-610.
- Miretti M.C., Pilatti M.A., Lavado S.R. y Imhoff S. 2012. Historia de uso del suelo y contenido de micronutrientes en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Ciencia del Suelo* 30: 67-73.

- Mullins C.E. and Panayiotopoulos K.P. 1984. The strength of unsaturated mixture of sand and kaolin and the concept of effective stress. *Journal of Soil Science* 35: 459-468.
- Munkholm L.J. and Kay B.D. 2002. Effect of water regime on aggregate tensile strength, rupture energy, and friability. *Soil Science Society of America Journal* 66: 702-709.
- Munkholm L.J., Schjønning P. and Petersen C.T. 2001. Soil mechanical behaviour of sandy loams in a temperate climate: case-studies on long-term effects of fertilization and crop rotation. *Soil Use and Management* 17: 269-277.
- Munkholm L.J., Schjønning P. and Kay B.D. 2002. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil and Tillage Research* 64: 125-135.
- Novelli L.E. 2013. Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de carbono en agregados. Tesis Doc-torado. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 127 pp.
- Pecorari C., Guerif J. y Stengel P. 1990. Fitólitos en los suelos pampeanos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo* 8: 135-141.
- Perfect E., Kay B.D. and Silva E.P. 1995. Influence of soil properties on the statistical characterization of dry aggregate strength. *Soil Science Society of America Journal* 59: 532-537.
- Pilatti M.A., Imhoff S., Ghiberto P. and Marano R. 2006. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Reid J.B. and Goss M.J. 1982. Interactions between soil drying due to plant water use and decreases in aggregate stability caused by maize roots. *Journal of Soil Science* 33: 47-53.
- Rillig M. 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters* 7: 740-754.
- Rillig M. 2005. A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency?. *Pedobiologia* 49: 395-399.
- Rubio G., Mosca C., Varela M.F., Scianca C. y Taboada M.A. 2012. Estructura de suelos arenosos bajo cultivos de cobertura. *Memoria Técnica INTA 2011-2012*: 43-47.
- Sasal M.C., Andriulo A. and Taboada M.A. 2006. Soil porosity characteristics on water dynamics under direct drilling in Argiudolls of the Argentinean Rolling Pampas. *Soil and Tillage Research* 87: 9-18.
- Six J., Elliott E.T. and Paustian K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 2099-2103.
- Six J., Bossuyt H., De Gryze S. and Deneff K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7-31.
- Taboada M.A., Cosentino D.J., Micucci F.G. and Lavado R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research* 49: 57-63.
- Taboada M., Barbosa O., Rodríguez M. and Cosentino D. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.

- Taboada M.A., Barbosa O.A. and Cosentino D.J. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loamy soils. *Journal of Soil Science* 173: 130-142.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science* 62: 141-163.
- Tisdall J.M. 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil* 159: 115-121.
- Tormena C., Fidalski J. and Rossi W. 2008 a. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 33-42.
- Tormena C.A., Bavorso M.A., Fidalski J., Imhoff S. and Silva A.P. 2008 b. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 943-952.
- Varela M., Fernandez P., Rubio G. y Taboada M. 2011. Cultivos de cobertura: efectos sobre la macroporosidad y la estabilidad estructural de un suelo franco-limoso. *Ciencia del Suelo* 29: 99-106.
- Vepraskas M.J. 1984. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Science Society American Journal* 48: 1220-1225.
- Watts C.W. and Dexter A.R. 1997. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. *Soil and Tillage Research* 42: 253-275.
- Watts C.W. and Dexter A.R. 1998. Soil Friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science* 49: 73-84.
- Whalley W.R., Leeds-Harrison P.B., Clark L.J. and Gowing D.J. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 84: 18-27.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.
- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *American Society of Agronomy* 28: 337-351.
- Zaher H., Caron J. and Ouaki B. 2005. Modeling aggregate internal pressure evolution following immersion to quantify mechanisms of structural stability. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1-12.
- Zhang H. 1994. Organic matter incorporation affects on mechanical properties of soil aggregates. *Soil and Tillage Research* 31: 263-175.

DINÁMICA DE LOS AGENTES DE AGREGACIÓN Y PROPIEDADES EDÁFICAS EN SUELOS DE TEXTURAS CONTRASTANTES

INTRODUCCIÓN

El estado estructural de un suelo debería proveer a las plantas cantidades adecuadas de aire y agua, y al mismo tiempo favorecer un correcto contacto raíz/suelo para asegurar la absorción de agua y nutrientes, y presentar baja resistencia mecánica para que las raíces puedan explorar el mayor volumen de suelo (Letey, 1985). El manejo inadecuado de las secuencias de cultivo y la utilización de sistemas de labranza tradicionales ha originado una disminución de la calidad estructural de los suelos de la provincia de Santa Fe. Esta disminución está generalmente asociada con variaciones en el contenido de COS (Pilatti *et al.*, 1988; Pilatti *et al.*, 2006; Carrizo *et al.*, 2011). Tisdall y Oades (1982) indican que los agentes orgánicos de agregación que promueven la estabilidad de los agregados se clasifican en transitorios, temporarios y persistentes. Los sistemas de manejo y el tipo de labranza influyen sobre el crecimiento de las raíces de las plantas, sobre las hifas fúngicas y en las tasas de oxidación del COS (Tisdall y Oades, 1982; Oades, 1984), con lo cual la macroagregación del suelo puede variar estacionalmente. En cambio, la estabilidad de los microagregados depende de agentes de unión persistentes y por lo tanto está relacionado con las características del suelo siendo menos variable en el tiempo (Tisdall y Oades, 1982).

La adición de carbono orgánico contribuye a variaciones intra-anales de la agregación del suelo (Monnier, 1956). Las secuencias de cultivos afectan la dinámica de agregación de manera diferencial, al presentar variación en la cantidad y calidad de residuos de cosecha y en el tiempo de ocupación del suelo con raíces activas. La presencia de sistemas radicales y la adición de residuos de cosecha favorecen el aporte de COS, la producción de exudados radiculares, estimulan la actividad microbial y la asociación con las hifas fúngicas vinculados con la agregación del suelo (Tisdall y Oades, 1982; Miller y Jastrow, 1990; Degens, 1997; Jastrow 1998).

Los agregados del suelo pueden responder de manera diferente a la presencia de sistemas radicales y la adición de residuos de cosecha debido a que los mecanismos de desarrollo y de ciclado de estas unidades elementales difieren del resto del suelo (Horn, 1990). Los agregados del suelo tienden a tener mayor resistencia y densidad que el suelo debido a que las fuerzas de cohesión y de fricción son más altas (Munkholm y Kay, 2002; Blanco-Canqui *et al.*, 2005). Por ello, la evaluación de propiedades físicas de los agregados como su estabilidad y resistencia puede proporcionar información útil y permitiría comprender el impacto del aporte de carbono en el corto plazo sobre diferentes suelos.

La dinámica temporal de la agregación ha sido documentada previamente y las evaluaciones se han focalizado en relación a los sistemas de labranza, tipo de cultivos utilizados, efecto de ciclos de humedecimiento y secado (Perfect *et al.*, 1990; Denef *et al.*, 2001; Cosentino *et al.*, 2006; Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008). Sin embargo, los cambios que experimentan en el corto plazo los agentes de agregación y propiedades físicas, vinculadas con la agregación del suelo, derivados del efecto de sistemas radicales y de la adición de carbono orgánico, a través de residuos de cosecha, en suelos con texturas y contenidos de carbono contrastantes no ha sido analizado previamente. En los suelos de la provincia de Santa Fe el COS tiene una importancia clave, como principal agente de agregación, y el conocimiento de las prácticas de manejo que afectan la dinámica temporal de los agentes de agregación y su influencia sobre propiedades físicas indicadoras de la calidad del suelo, contribuirá a la selección de prácticas de ma-

nejo que tiendan a incrementar y mantener a través del tiempo la actividad y concentración de agentes de agregación.

El objetivo de este capítulo fue determinar la evolución temporal de distintas fracciones de carbono, concentración de carbohidratos y glomalina, así como también en los indicadores de calidad de suelo, como estabilidad de agregados y resistencia ténsil, en suelos con contenido de carbono y textura contrastantes debido a los efectos derivados del crecimiento de plantas y a la adición y ubicación de diferentes dosis de residuos de cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó sobre un Argiudol típico (serie Esperanza) y un Hapludol típico (serie Santa Isabel) localizados en el centro (31°26'8"S, 60°56'43"O) y sur (33°53'2"S, 61°44'58"O) de la provincia de Santa Fe, Argentina. La descripción de los suelos, clima y esquema de muestreo se presentan en el Capítulo 2 de esta Tesis.

DISEÑO Y TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES

El diseño y de las condiciones experimentales fueron similares a las planteadas en el Capítulo 2 de esta Tesis. En este experimento se llevaron a cabo por triplicado los siguientes tratamientos: (i) crecimiento de plantas (con y sin crecimiento de cultivo de trigo); (ii) adición de residuos de cosecha de trigo (con y sin adición de residuos) y (iii) ubicación de residuos (superficial vs incorporado) (Tabla 4.1). El tratamiento -pl -res se denomina control.

Tabla 4.1. Resumen de los diferentes tratamientos del ensayo experimental.

Tratamientos	Descripción de los tratamientos
-pl -res	sin crecimiento de plantas, sin adición de residuos de cosecha
+ pl -res	con crecimiento de plantas, sin adición de residuos de cosecha
-pl +res inc	sin crecimiento de plantas, con residuos incorporados
-pl +res sup	sin crecimiento de plantas, con residuos en la superficie
+pl +res inc	con crecimiento de plantas, con residuos incorporados
+pl +res sup	con crecimiento de plantas, con residuos en la superficie

Las determinaciones en todos los tratamientos se realizaron en los diferentes momentos del ciclo del cultivo de trigo: i) inicio del experimento: momento de la siembra, ii) 77 días: cuando las plantas alcanzaron el máximo crecimiento radicular, iii) 121 días: cuando la mayoría de todas las plantas comenzaron la senescencia para evitar una significativa descomposición radi-

cular y iv) 177 días: cuando las plantas presentaron un estado de senescencia total. El procedimiento de colecta y procesamiento de las muestras, en cada uno de los momentos, se detalla en el Capítulo 2 de esta Tesis.

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS Y FÍSICOS DE SUELO

El carbono orgánico total (COT) fue estimado por triplicado a partir del carbono fácilmente oxidable con un factor de recuperación de 0,77 (IRAM-SAGPyA 29571-2, 2007). El fraccionamiento del carbono orgánico particulado (COP) se llevó a cabo mediante el método descrito por Irizar *et al.* (2010) y la cuantificación se realizó según IRAM-SAGPyA 29571-2, (2007). El contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CHag) fue determinado por el procedimiento ácido sulfúrico-fenol (Dubois *et al.*, 1956). Las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíble (PSRG-FE) fueron extraídas usando el procedimiento descrito por Wright y Upadhyaya (1996). El detalle metodológico de cada una de las determinaciones se presenta en la sección Materiales y Métodos en el Capítulo 2 de esta Tesis. La estabilidad de los agregados fue determinada utilizando la metodología propuesta por Le Bissonnais (1996) y la resistencia ténsil de los agregados (RT) fue realizada según indican Dexter y Kroesbergen (1985) e Imhoff *et al.* (2002). El procedimiento de cada una de las determinaciones se presenta en la sección Materiales y Métodos en el Capítulo 3 de esta Tesis.

Para el análisis de los datos fue utilizado el software INFOSTAT (Di Renzo *et al.*, 2013). Los efectos del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha se evaluaron mediante ANOVA con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. En los casos donde se detectaron diferencias se realizó prueba de comparación múltiple de Tukey con el mismo nivel de significancia. Se efectuó un análisis de componentes principales para evaluar la relación entre los agentes de agregación y los DMP de cada pre-tratamiento de estabilidad estructural. A través de diagramas de dispersión se estableció la relación entre los agentes de agregación y la RT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EVOLUCIÓN DE LOS AGENTES DE AGREGACIÓN

El contenido de COT no presentó interacción significativa entre los tratamientos y los diferentes momentos de muestreo. En la serie Santa Isabel y Esperanza la evaluación del COT no mostró diferencias entre los distintos momentos de muestreo ni por efecto de los tratamientos (Fig. 4.1 y 4.2).

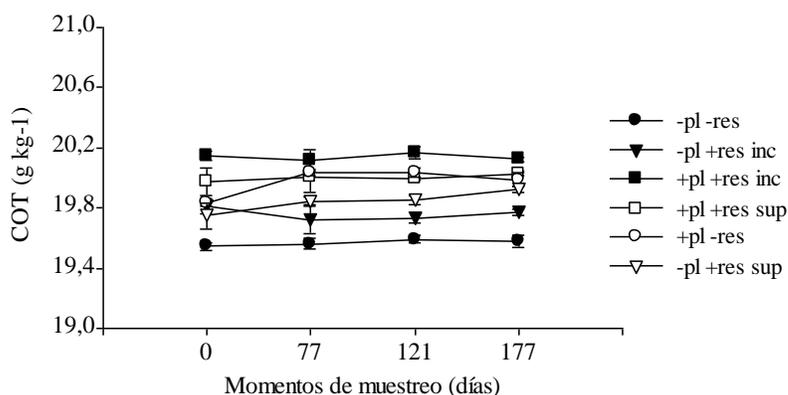


Fig. 4.1. Evolución del carbono orgánico total (COT, g kg^{-1}) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media.

El contenido de COP presentó interacción entre los tratamientos y los diferentes momentos de muestreo. En contraste con lo observado en el COT, el contenido de COP mostró fluctuaciones temporales significativas por el crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en el corto plazo (Fig. 4.3 y 4.4).

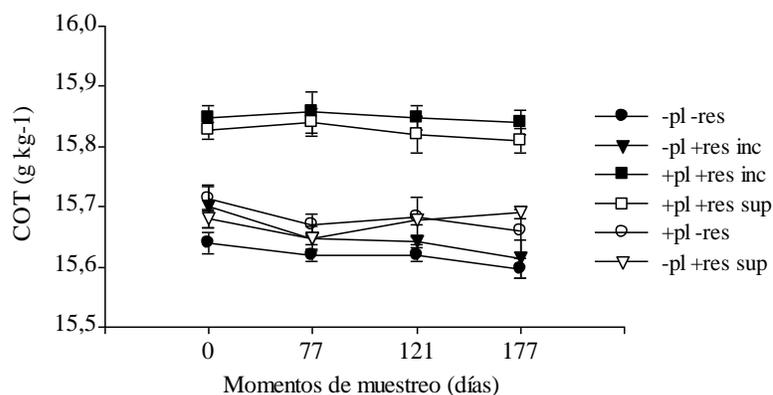


Fig. 4.2. Evolución del carbono orgánico total (COT, g kg^{-1}) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.

En la serie Santa Isabel, el COP se diferenció significativamente del control debido al crecimiento de plantas y adición de residuos (+pl -res; +pl +res inc; +pl +res sup), aunque no mostró cambios en los tratamientos que recibieron sólo adición de residuos (Fig. 4.3). Los tratamientos con crecimiento de plantas y la adición de residuos (+pl +res inc, +pl +res sup) mostraron un incremento significativo luego de 77 días de iniciado el experimento ($5,9$ y $4,8 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente), y disminuyeron al final del experimento ($4,2$ y $4,3 \text{ g kg}^{-1}$). En cambio, en los tratamientos que incluyen sólo la adición de residuos se mantuvieron estables durante los primeros 77 días (-pl +res inc: $3,5 \text{ g kg}^{-1}$, -pl +res sup: $3,6 \text{ g kg}^{-1}$) y hasta el final del experimento (177 días: -pl +res inc: $3,1 \text{ g kg}^{-1}$, -pl +res sup: $3,4 \text{ g kg}^{-1}$). Al finalizar el experimento (día 177), el aporte de carbono realizado por los tratamientos que incluyen crecimiento de plantas más residuos de cosecha permitieron alcanzar los mayores niveles de COP respecto del resto de los tratamientos.

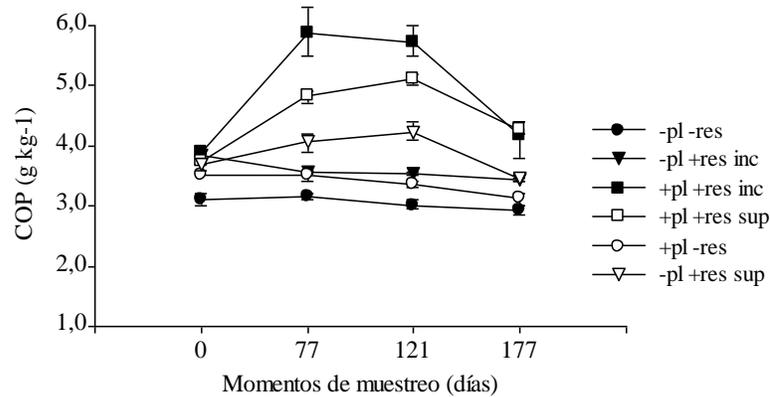


Fig. 4.3. Evolución del carbono orgánico particulado (COP, g kg^{-1}) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media.

En la serie Esperanza, todos los tratamientos aumentaron significativamente el contenido de COP desde el inicio del experimento hasta el día 77, excepto el tratamiento $-pl +res sup$. El COP se mantuvo constante desde el día 77 hasta el final de experimento en aquellos tratamientos que no incluyeron la incorporación de los residuos en el suelo (Fig. 4.4).

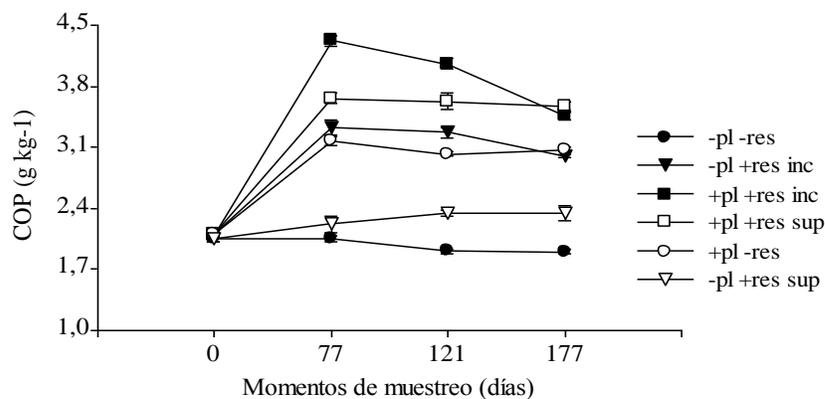


Fig. 4.4. Evolución del carbono orgánico particulado (COP, g kg^{-1}) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.

La disminución ocurrida desde el día 77 hasta el final del experimento en los tratamientos +pl +res inc y -pl +res inc fue de 20 y 34% respectivamente. Esta disminución se puede atribuir al mayor contacto de los residuos con el suelo y a la mayor exposición al ataque microbial. De manera similar a la serie Santa Isabel, al finalizar el experimento, la mayor concentración de COP se mantuvo en los tratamientos que incluyen crecimiento de plantas y residuos de cosecha (Fig. 4.4).

En ambas series de suelo el contenido de CHag presentó interacción entre los tratamientos y los diferentes momentos de muestreo. La concentración de CHag creció significativamente por el crecimiento de plantas y/o adición de residuos de cosecha desde el momento inicial hasta el día 77 del experimento (Fig. 4.5 y 4.6). En el día 77 se observa una mayor concentración cuando los residuos se incorporan al suelo respecto de los que se ubican superficialmente. Al finalizar el experimento (día 177) los tratamientos con crecimiento de plantas y adición de residuos (+pl +res sup, +pl +res inc) mostraron las mayores concentraciones de CHag respecto del control y disminuyeron en forma no significativa desde el día 77 hasta el día 177. Todas las concentraciones de CHag de los tratamientos al finalizar el ensayo resultaron significativamente superiores al tratamiento control.

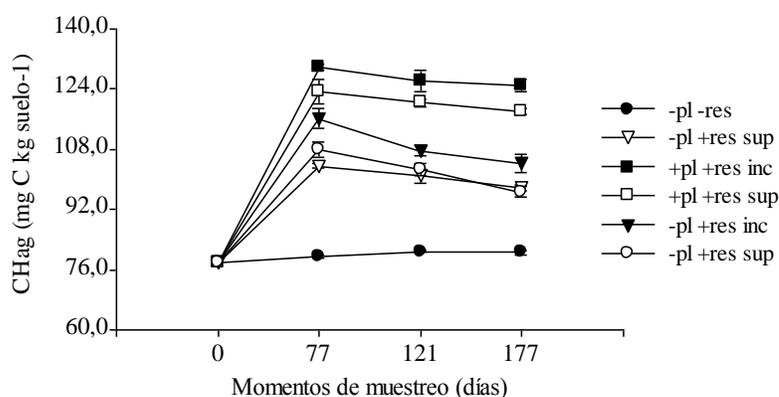


Fig. 4.5. Evolución del contenido de carbohidratos solubles en agua (CHag, mg C kg⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media.

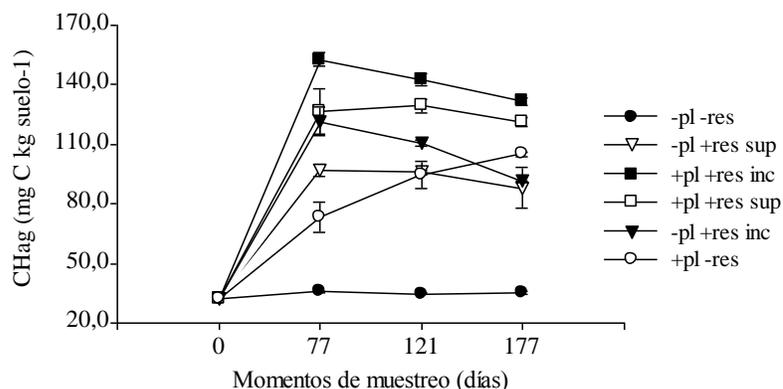


Fig. 4.6. Evolución del contenido de carbohidratos solubles en agua (CHag, mg C kg⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.

En la serie Santa Isabel, el contenido de CHag desde el día 77 hasta la finalización del experimento no se modificó cuando los rastrojos se ubicaron superficialmente (103,6 a 97,8 mg C kg suelo⁻¹), mientras que disminuyeron significativamente cuando se incorporaron al suelo (116,1 a 104,3 mg C kg suelo⁻¹), aunque los contenidos al finalizar el experimento no fueron estadísticamente distintos. Los CHag disminuyeron significativamente desde el día 77 hasta el final del experimento en el tratamiento +pl -res (108,0 a 96,6 mg C kg suelo⁻¹) (Fig. 4.5).

La evolución de los CHag en la serie Esperanza mostró un comportamiento similar al de la serie Santa Isabel. No hubo una variación significativa en la concentración de CHag cuando los rastrojos se ubicaron en superficie (96,7 a 88,0 mg C kg suelo⁻¹), por el contrario con la incorporación de los residuos al suelo la concentración disminuyó marcadamente (121,5 a 91,4 mg C kg suelo⁻¹), no obstante al final del experimento las concentraciones no difieren significativamente entre sí. El crecimiento de plantas incrementó significativamente la producción de polisacáridos desde el día 77 hasta el día 177 (73,2 a 105,0 mg C kg suelo⁻¹) (Fig. 4.6).

El contenido de PSRG y PSRG-FE presentó interacción entre los tratamientos y los diferentes momentos de muestreo en cada una de las series de suelo. En ambas series, el crecimiento

de plantas y/o la adición de residuos provocaron aumentos significativos en la concentración de PSRG durante los primeros 77 días de incubación respecto del control (-pl -res) (Fig. 4.7 y 4.8). Los tratamientos con crecimiento de plantas y con adición de residuos incorporados o superficiales no mostraron diferencias entre sí en ningún momento del experimento y la concentración permaneció constante hasta el final del experimento (Fig. 4.7 y 4.8). Además, la concentración de PSRG en los tratamientos con crecimiento de plantas, con adición de residuos incorporados o superficiales difirieron del resto de los tratamientos en todos los momentos de muestreo (Fig. 4.7 y 4.8). En la serie Santa Isabel estos tratamientos presentaron escasa variación en la concentración de PSRG hasta el final del experimento (Fig. 4.7). Mientras que en la serie Esperanza el tratamiento con crecimiento de plantas (+pl -res) aumentó significativamente (día 77: 2,5 mg g suelo⁻¹, día 177: 2,7 mg g suelo⁻¹) (Fig. 4.8).

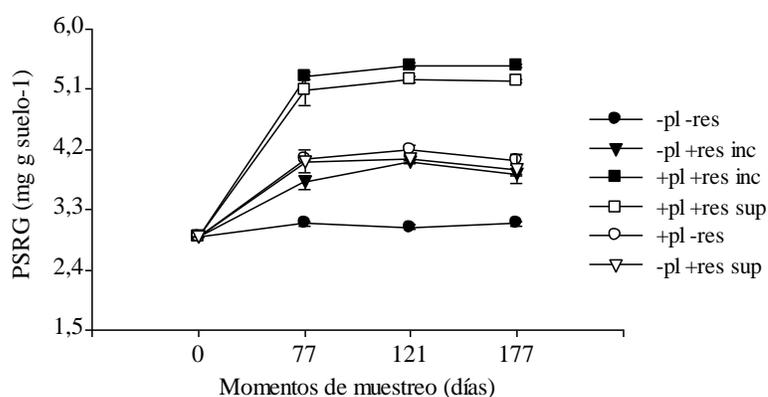


Fig. 4.7. Evolución del contenido de proteínas del suelo relacionadas a la glomalina (PSRG, mg g suelo⁻¹) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media.

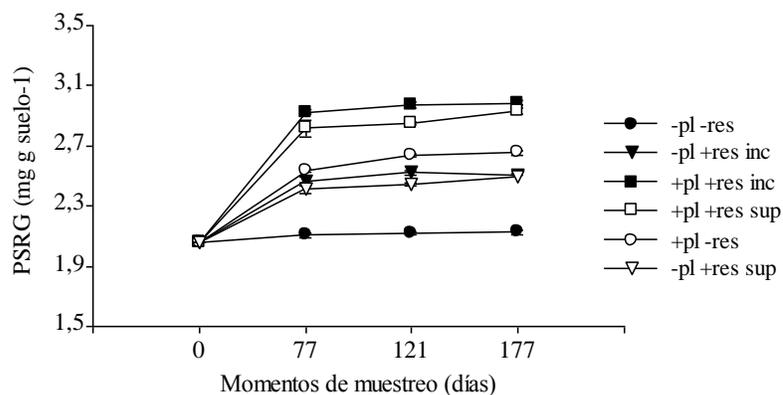


Fig. 4.8. Evolución del contenido de proteínas del suelo relacionadas a la glomalina (PSRG, mg g suelo^{-1}) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.

En la serie Santa Isabel, la concentración de PSRG no varió significativamente desde el día 77 hasta el día 177 (Fig. 4.7). Por el contrario, la evolución en la serie Esperanza fue diferente, no obstante las concentraciones finales no difirieron (Fig. 4.8).

El crecimiento de plantas y/o la adición de residuos favoreció la producción de mayores concentraciones de FE-PSRG en la serie Santa Isabel respecto del tratamiento control durante los primeros 77 días del experimento. Los tratamientos +pl +res sup y +pl +res inc tuvieron las concentraciones de PSRG más altas, las cuales se mantuvieron constantes hasta el final del experimento (Fig. 4.9). Sin embargo, en el día 177 el tratamiento +pl +res sup tuvo una concentración significativamente menor ($0,58 \text{ mg g suelo}^{-1}$) respecto de +pl +res inc ($0,63 \text{ mg g suelo}^{-1}$). En el día 77, la concentración de PSRG no difirió en los tratamientos con crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha. Sin embargo, al final del experimento el tratamiento -pl +res sup mostró una disminución de la concentración ($0,46 \text{ mg g suelo}^{-1}$) mientras que el resto de los tratamientos permaneció sin cambios significativos.

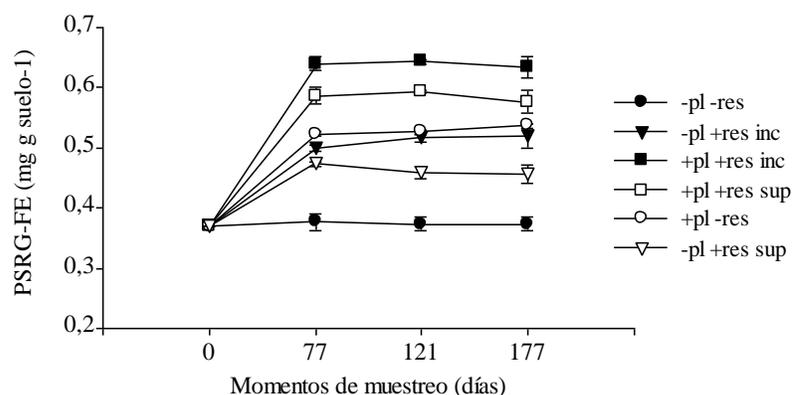


Fig. 4.9. Evolución del contenido de proteínas del suelo relacionadas a la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE, mg g suelo^{-1}) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel. Las barras indican el error estándar de la media.

En la serie Esperanza, la concentración de PSRG-FE creció significativamente por el crecimiento de plantas y/o adición de residuos de cosecha desde el momento inicial hasta el día 77 del experimento. En el día 77 el tratamiento $-pl +res sup$ mostró la menor producción de FE-PSRG ($0,32 \text{ mg g suelo}^{-1}$) y en el resto de los tratamientos las concentraciones resultaron similares. En el tratamiento $+pl -res$ y $-pl +res inc$ las concentraciones disminuyeron significativamente desde el día 77 hasta el final del experimento, mientras que en el resto permanecieron sin cambios (Fig. 4.10).

Al final del experimento todos los tratamientos presentaron mayores concentraciones de PRSG-FE que el control y difirieron entre los tratamientos. El tratamiento $+pl +res inc$ presentó concentraciones significativamente mayores ($0,38 \text{ mg g suelo}^{-1}$) respecto de los tratamientos con presencia de plantas ($0,33 \text{ mg g suelo}^{-1}$) o con adición de residuos (inc: $0,33 \text{ mg g suelo}^{-1}$; sup: $0,31 \text{ mg g suelo}^{-1}$).

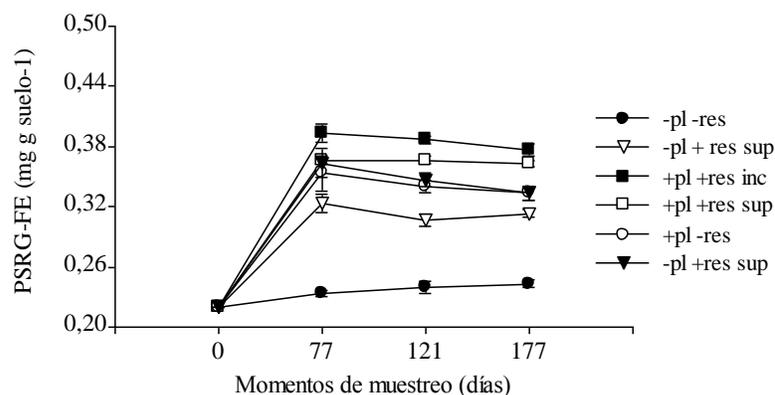


Fig. 4.10. Evolución del contenido de proteínas del suelo relacionadas a la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE, mg g suelo^{-1}) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.

Los resultados indican que el COT, en ambas series de suelo, tuvo escasa variabilidad temporal en el almacenamiento de carbono debido al crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha. Esto demuestra que este parámetro no constituye un indicador adecuado de la dinámica del carbono en el corto plazo, ya que los cambios en esta variable se manifiestan en experimentos de larga duración (Haynes, 2005). En concordancia con los resultados alcanzados, otros estudios han reportado que los cambios en el manejo del suelo (*e.i.* presencia o ausencia de raíces de cultivos- adición de residuos) se producen más rápidamente en las fracciones lábiles que en el COT (Gregorich y Janzen, 1996; Campbell *et al.*, 1999). Angers y Caron (1998) encontraron incrementos en el COP por la presencia de cultivos de gramíneas y leguminosas respecto a situaciones de barbecho (sin cultivos). Otros autores también documentaron que la fertilización del suelo permite incrementar los rendimientos de los cultivos, favoreciendo la entrada de residuos al suelo y con ello el aumento de las fracciones lábiles como el COP (Gregorich *et al.*, 1997). Por ello, dada su sensibilidad esta variable ha sido objeto de estudio en numerosas investigaciones relacionadas con la agregación del suelo y con el

almacenamiento de carbono (Puget *et al.*, 1999; Balesdent *et al.*, 2000; Puget y Drinkwater, 2001).

La producción de CHag, derivados de las plantas y actividad microbial, en ambas series de suelo se modificó en el tiempo por el crecimiento de plantas y/o adición de residuos de cosecha. Esto demuestra que este agente de agregación presenta una variabilidad temporal más pronunciada que el COT, por lo que resulta adecuada y sensible para detectar cambios en la dinámica de la COS en el corto plazo debido al uso del suelo (Kuo *et al.*, 1997; Puget *et al.*, 1999). Esta fracción demostró que hubo una fuerte descomposición de los materiales orgánicos durante los primeros días ya que la producción de CHag se incrementó marcadamente. Luego del incremento inicial, la cantidad de CHag en suelo se mantuvo constante a pesar que la actividad de descomposición disminuyó marcadamente. Esto sugiere que esta fracción puede permanecer en el suelo por largos períodos (Abiven *et al.*, 2007). Diversos estudios también documentaron que la incorporación de residuos orgánicos estimula la actividad biológica del suelo con la subsecuente producción de agentes de unión orgánicos como polisacáridos (Haynes y Beare, 1997; Martens, 2000; Cosentino *et al.*, 2006) que contribuyen en la agregación del suelo (Abiven *et al.*, 2007).

De manera similar, la producción de glomalina en estos suelos es producida en concentraciones elevadas y varía temporalmente en los tratamientos con crecimiento de plantas y con la incorporación de los residuos al suelo. Estas fracciones también tuvieron incrementos pronunciados durante los primeros días del experimento. Estos incrementos estuvieron estrechamente relacionados con el crecimiento radical de las plantas. Rillig *et al.* (2003) encontraron mayor concentración de PSRG en los suelos que tuvieron especies arbóreas o pastos respecto de los suelos que se encontraban sin vegetación. West *et al.* (2005) mencionan que la aplicación de enmiendas orgánicas en el suelo mejoró la actividad de los micelios de los hongos y la producción de PSRG.

EVOLUCIÓN DE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL Y RELACIÓN CON LOS AGENTES DE AGREGACIÓN

En la serie Santa Isabel se detectaron diferencias en los DMP de los diferentes pre-tratamientos por efecto de tratamientos y momentos de muestreo aunque no hubo interacción entre los factores. En el pre-tratamiento de RH, el crecimiento de plantas y/o la adición de residuos de cosecha incrementaron la estabilidad de los agregados respecto del control. Los tratamientos que tuvieron crecimiento de plantas o crecimiento de plantas y residuos de cosecha lograron mayor resistencia a la ruptura por estallido, diferenciándose significativamente de los tratamientos que recibieron sólo residuos de cosecha (Fig. 4.11 A). En relación a los momentos de muestreo hubo un incremento significativo de la agregación luego de 121 días de iniciado el ensayo la cual se mantuvo hasta el final del experimento (Fig. 4.11 B).

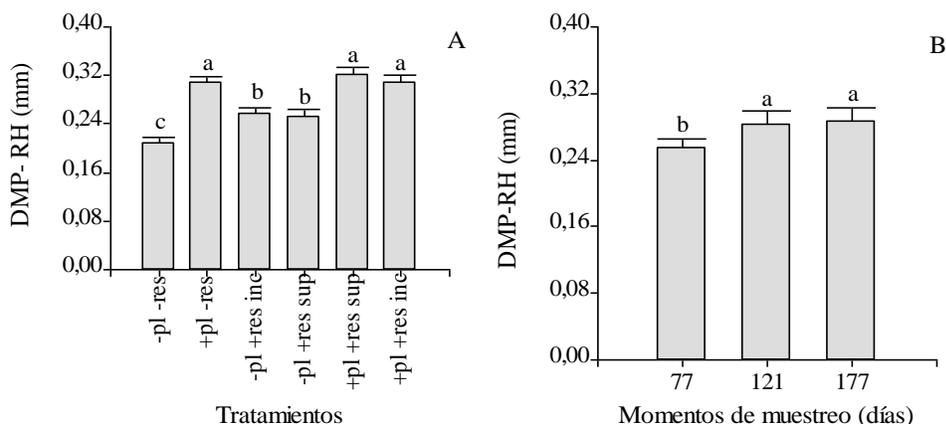


Fig. 4.11. Diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de rápido humedecimiento (DMP_{RH} , mm) por efecto de diferentes tratamientos (A) y distintos momentos de muestreo (B) en la serie Santa Isabel. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

En el pre-tratamiento de RM (Fig. 4.12 A) los tratamientos con crecimiento de plantas y residuos de cosecha presentaron los mayores DMP (+pl +res inc: 0,74 mm; +pl +res sup: 0,75

mm), diferenciándose del control (0,49 mm), aunque no de los tratamientos +pl –res (0,70 mm) y –pl +res sup (0,71 mm). El DMP presentó escasa variación a lo largo del ensayo experimental obteniéndose mayores valores en los últimos momentos de muestreo (Fig. 4.12 B).

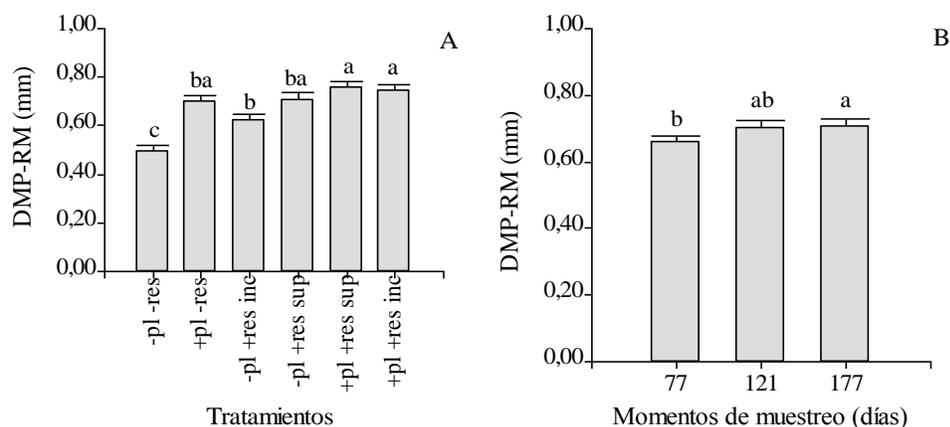


Fig.4.12. Diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de ruptura mecánica (DMP_{RM}, mm) por efecto de diferentes tratamientos (A) y distintos momentos de muestreo (B) en la serie Santa Isabel. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

En el pre-tratamiento de LH, se registraron mayores DMP en los tratamientos que tuvieron crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en comparación con los que tuvieron crecimiento de plantas o sólo adición de residuos y el control (Fig. 4.13 A). A los 121 y 177 días de iniciado el ensayo experimental se registraron mayores DMP en comparación con el día 77 (Fig. 4.13 B).

En la serie Esperanza el DMP del pre-tratamiento de RH y RM presentó interacción entre los tratamientos y momentos de muestreo. En el pre-tratamiento de RH hubo mayores DMP en los tratamientos que tuvieron crecimiento de plantas y/o adición de residuos de cosecha en comparación con el control en los diferentes momentos de muestreo (Fig. 4.14). Los DMP se mantuvieron constantes desde el día 77 hasta el día 121 y luego mostraron un incremento significativo en todos los tratamientos. Al final del experimento los DMP de todos tratamientos no difirieron entre sí y fueron superiores al control.

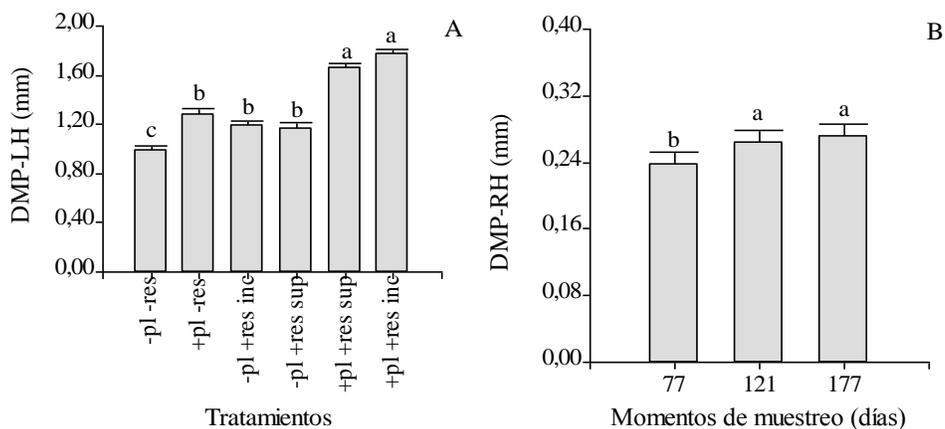


Fig. 4.13. Diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de lento humedecimiento (DMP_{LH} , mm) por efecto de diferentes tratamientos (A) y distintos momentos de muestreo (B) en la serie Santa Isabel. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

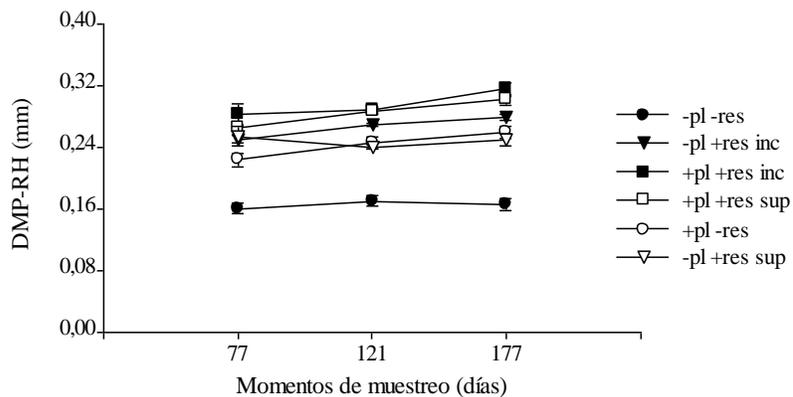


Fig. 4.14. Evolución del diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de rápido humedecimiento (DMP_{RH} , mm) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.

La RM de agregados fue inferior en los tratamientos con crecimiento de plantas y con adición de residuos incorporados o superficiales o sólo presencia de plantas en todos los

momentos de muestreo (Fig. 4.15). El DMP en los tratamientos con adición de residuos incorporados o superficiales no difirió del control en el día 77 del experimento, sin embargo en los tratamientos con residuos de cosecha la estabilidad de los agregados se mantuvo por mayor período de tiempo en comparación con el control (Fig. 4.15).

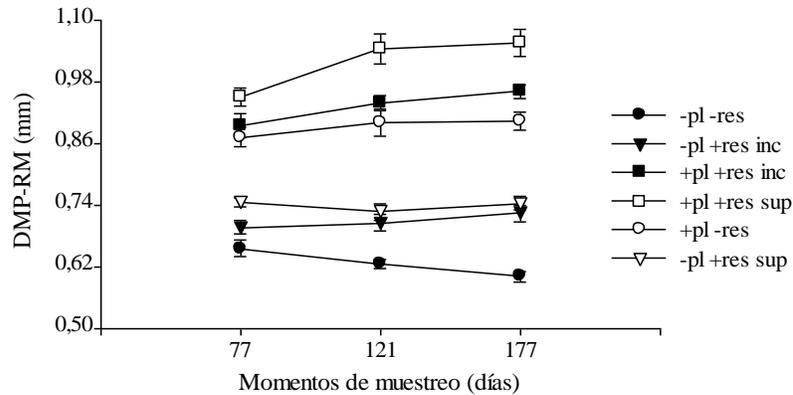


Fig. 4.15. Evolución del diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de ruptura mecánica (DMP_{RM} , mm) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.

A diferencia de los pre-tratamientos anteriores, en el LH no hubo interacción entre tratamientos y momentos de muestreo. El crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha incorporados presentaron los mayores DMP (1,92 mm), diferenciándose significativamente del resto de los tratamientos. El crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha en forma separada tuvieron un efecto significativamente inferior sobre el DMP respecto del efecto combinado de estos factores (Fig. 4.16 A). Al evaluar los DMP durante los 177 días del experimento no se detectaron diferencias entre los momentos de muestreo (Fig. 4.16 B).

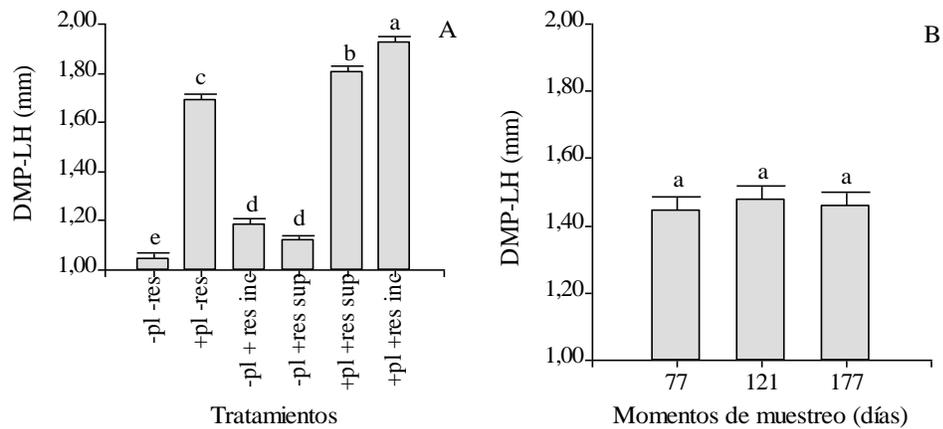


Fig. 4.16. Diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de lento humedecimiento (DMP_{LH} , mm) por efecto de diferentes tratamientos (A) y distintos momentos de muestreo (B) en la serie Esperanza. Letras diferentes indican diferencias significativas (Test Tukey, $\alpha = 0,05$).

La adición de carbono, a través del crecimiento de las plantas y adición de residuos de cosecha, incrementó la agregación en ambas series de suelo. La adición de residuos y el crecimiento de las plantas en forma separada tuvieron una influencia menor sobre la estabilidad de los agregados, aunque superior respecto de la situación control. En la serie Esperanza, la estabilidad estructural tuvo un comportamiento variable en relación a la ubicación de los residuos de cosecha, mientras que en la serie Santa Isabel no influenció la estabilidad de los agregados. Por lo tanto, la ubicación de los residuos de cosecha parece tener poco efecto sobre la agregación del suelo luego de 177 días de experimento en los suelos con menor contenido de limo.

Un análisis de componentes principales fue utilizado para estudiar la relación entre el crecimiento de plantas, residuos de cosecha, los agentes de agregación y los diferentes pre-tratamientos de estabilidad de agregados en ambas series de suelo (Fig. 4.17). La primer componente (CP1) permite diferenciar los tratamientos con crecimiento de plantas de aquellos que sólo recibieron residuos de cosecha, por tanto la mayor variabilidad en la estabilidad de agregados se explica con estas variables. Los DMP de los diferentes pre-tratamientos estuvieron más asociados al crecimiento de plantas + adición de residuos de cosecha. La segunda compo-

nente (CP 2) explica en baja proporción la variabilidad de los diferentes agentes de agregación sobre los DMP dado que la proyección de las variables sobre el eje de abscisas es similar. Aunque el DMP_{RH} está más relacionado a los contenidos de PSRG- FE y COP mientras que el DMP_{RM} y DMP_{LH} al contenido de COT.

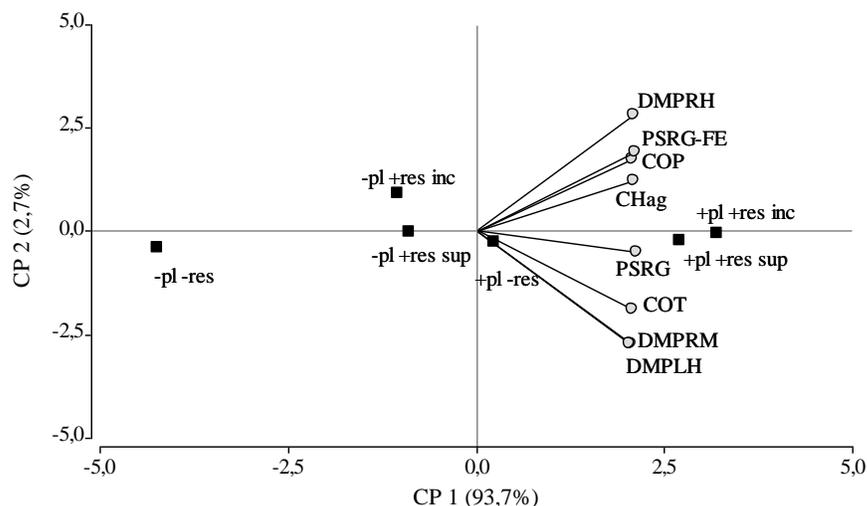


Fig. 4.17. Componentes principales para la relación agentes de agregación-diámetro medio ponderado de los pre-tratamientos de rápido humedecimiento (DMP_{RH}), ruptura mecánica (DMP_{RM}) y lento humedecimiento (DMP_{LH}) de la serie Esperanza y Santa Isabel.

En este estudio el aporte de material orgánico, a través de las raíces y los residuos de cosecha, esta relacionado con el DMP de los diferentes pre-tratamientos lo cual demuestra que tiene un rol clave en la formación de agregados (Fig. 4.17). Además la adición de material orgánico estimuló la biomasa y actividad microbial del suelo con la subsiguiente producción de carbohidratos y glomalina que también tuvieron relación con el DMP (Fig. 4.17). Estos resultados concuerdan con lo reportado en diversos estudios (Haynes *et al.*, 1991; Degens, 1997; Cosentino *et al.*, 2006). Los mayores valores de agregación se logran con la adición de residuos y presencia de sistemas radicales activos ya que mantienen a través del tiempo altas tasas de actividad biológica que favorecen la producción de agentes de pegado y de enredo de las partículas del suelo.

El efecto en el corto plazo de las plantas y de los residuos de cosecha sobre la estabilidad de los agregados ha sido documentado por otros autores (Martens, 2000; Deneff *et al.*, 2002; Lui *et al.*, 2005; Cosentino *et al.*, 2006; Abiven *et al.*, 2007). Lui *et al.* (2005) encontraron que la estabilidad de los agregados fue mayor luego de ocho semanas en suelos que tuvieron actividad radical de diferentes cultivos de cobertura respecto a suelos en barbecho y esos incrementos estuvieron relacionados con la concentración de polisacáridos. Deneff *et al.* (2002) encontraron luego de 42 días de actividad radicular un incremento en la cantidad de macroagregados estables. Luego de 63 días de incubación, Cosentino *et al.* (2006) demostraron que la adición de residuos de maíz en combinación con ciclos de humedecimiento y secado estimuló la actividad microbiana e incrementó la estabilidad de los agregados. Por el contrario, Materechera *et al.* (1994) encontraron, que en el corto plazo, el crecimiento radicular estimula la fragmentación del suelo al crear zonas de fallas, lo que hace que el suelo sea más mullido.

EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA TÉNSIL DE LOS AGREGADOS Y RELACIÓN CON LOS AGENTES DE AGREGACIÓN

La RT presentó interacción entre los tratamientos y los diferentes momentos de muestreo en cada una de las series de suelo. En la serie Santa Isabel, en el día 77 no se observaron diferencias en la RT entre los diferentes tratamientos. Los tratamientos que tuvieron crecimiento de plantas, a los 121 días de iniciado el experimento, mostraron un incremento significativo de la RT el cual se mantuvo hasta el final del experimento. En contraste, los tratamientos que tuvieron sólo adición de residuos y el control (-pl -res) permanecieron sin cambios desde el día 77 hasta el final del experimento registrando valores inferiores (Fig. 4.18).

En la serie Esperanza, los tratamientos con crecimiento de plantas presentaron, en todos los momentos de muestreo, valores superiores de RT respecto de aquellos tratamientos que sólo tuvieron adición de residuos de cosecha. La RT permaneció constante desde el día 77 hasta el final del experimento en todos los tratamientos. Al final del experimento, los tratamientos con crecimiento de plantas tuvieron mayor RT (+pl -res: 67,9; +pl +res inc: 72,7; +pl +res sup:

79,7 kPa) que los tratamientos con residuos de cosecha y el control (-pl +res sup: 46,7; -pl +res inc: 44,2; -pl -res: 55,1 kPa) (Fig. 4.19).

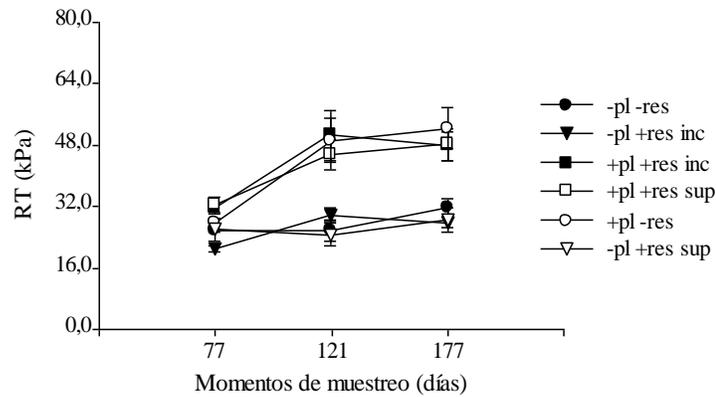


Fig. 4.18. Evolución de la resistencia ténsil (RT, kPa) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Santa Isabel.

Las barras indican el error estándar de la media.

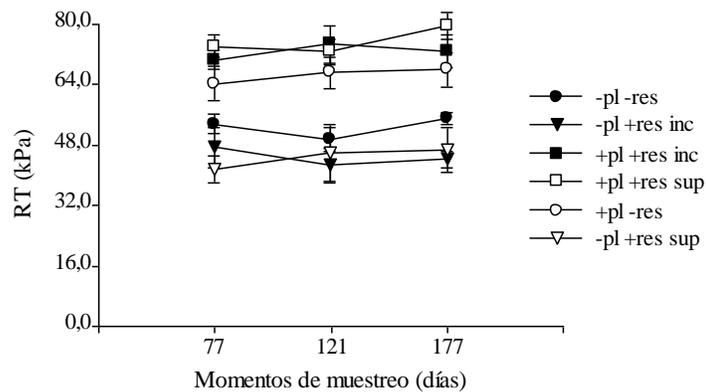


Fig. 4.19. Evolución de la resistencia ténsil (RT, kPa) por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en distintos momentos de muestreo en la serie Esperanza. Las barras indican el error estándar de la media.

Las investigaciones realizadas hasta el momento sobre los cambios de la RT a través del tiempo por efecto del crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha son escasas. Por ello este estudio permite conocer el grado de influencia de estos factores sobre la RT. En ambas series de suelo el crecimiento de plantas con o sin adición de residuos tuvo un efecto significativo sobre la RT. Los tratamientos que tuvieron sólo adición de residuos de cosecha, independientemente de su ubicación, no tuvieron influencia significativa sobre la RT a través del tiempo. En el período analizado los sistemas radicales tuvieron mayor contribución sobre la RT que los residuos de cosecha. Una de las razones de la ausencia de efectos positivos de los residuos de cosecha sobre la RT podría ser que el período experimental fue demasiado corto para detectar diferencias a través de esta variable o el efecto de los sistemas radicales podría haber enmascarado dicho efecto. En un ensayo de larga duración, Blanco-Canqui y Lal (2008) reportaron que la cobertura del suelo con residuos de cosecha de maíz promueve la formación de agregados fuertes y cohesivos. Estos mayores valores de RT se deben a la presencia de compuestos orgánicos tales como polisacáridos que reaccionan con las partículas de arcilla incrementando la unión entre las partículas y actuado como agentes de cementación durante el secado (Zhang, 1994).

La influencia del crecimiento de plantas sobre la agregación, y en consecuencia sobre la RT, podría estar relacionada con la liberación de exudados orgánicos solubles, con la estimulación de la actividad microbial por las secreciones radicales que promueven el enredo de las partículas por las hifas fúngicas y con efectos físicos de las raíces sobre las partículas del suelo (Tisdall y Oades, 1979; Oades y Waters, 1991; Jastrow *et al.*, 1998; Amézketa, 1999). En este estudio, en ambas series de suelo, se observa que la actividad fúngica parece ser uno de los principales agentes que afectan la RT debido a la correlación significativa encontrada entre las PRSG, PSRG-FE y la RT (Fig. 4.20 D y E). A pesar que los residuos de cosecha, en el corto plazo, no tuvieron un efecto significativo sobre la RT, en la serie Esperanza los valores de carbono (*e.i.* COT y COP) se relacionaron con la RT (Fig. 4.20 A y B). En comparación con el resto de los agentes de agregación, los CHag mostraron una menor asociación con los valores de RT (Fig. 4.20 C).

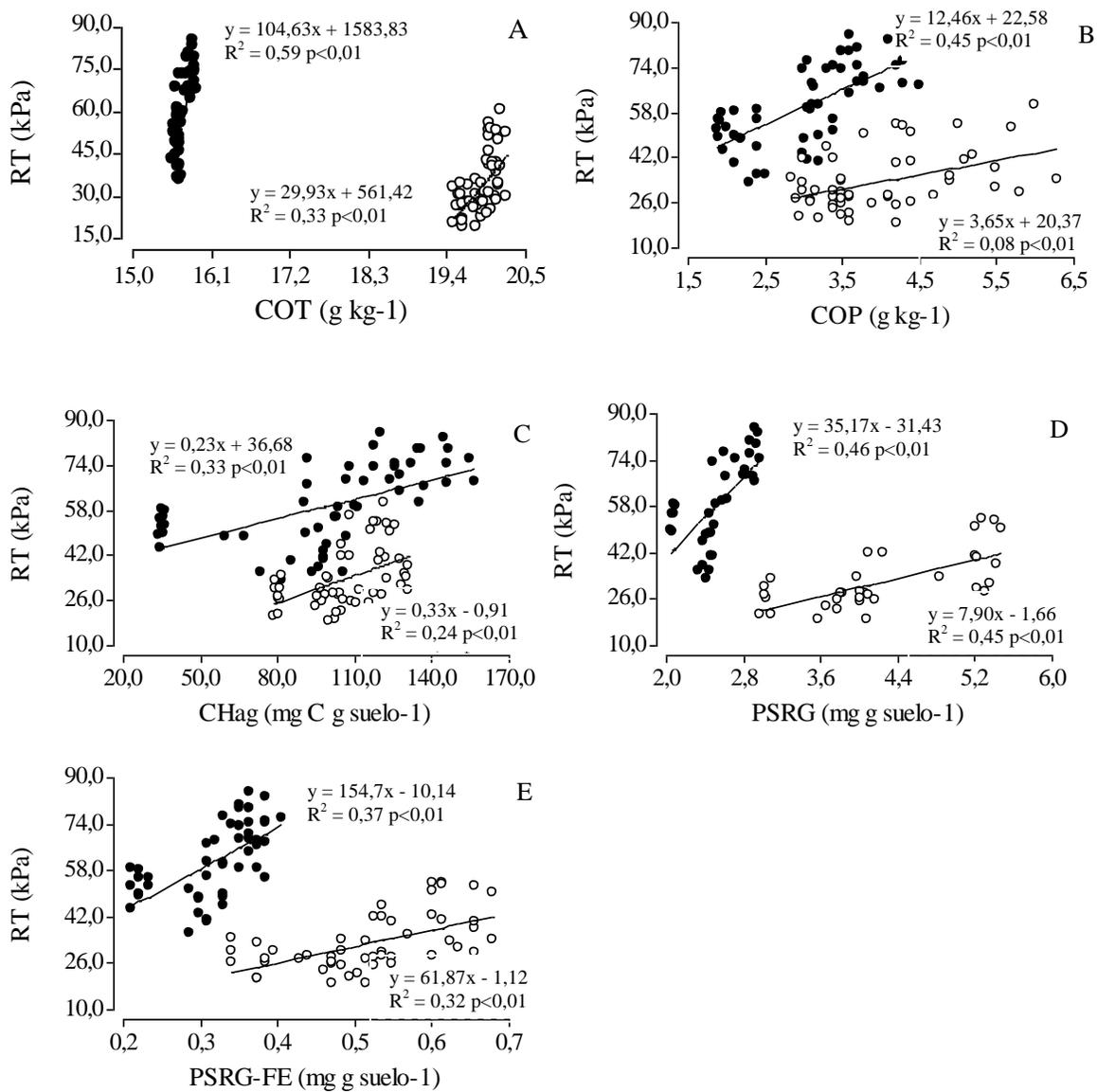


Fig. 4.20. Relación entre el carbono orgánico total del suelo (COT, g kg⁻¹) (A), carbono orgánico particulado (COP, g kg⁻¹) (B), carbohidratos solubles en agua caliente (CHag, mg C g suelo⁻¹) (C), proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG, mg g suelo⁻¹) (D) y proteínas del suelo relacionadas con la glomalina fácilmente extraíbles (PSRG-FE, mg g suelo⁻¹) (E) y la resistencia ténsil de los agregados (RT, kPa) durante el período experimental. Los círculos blancos corresponden a la serie Santa Isabel. Los círculos negros corresponden a la serie Esperanza.

La falta de actividad radical genera una menor producción de agentes de agregación y menor RT por un menor desarrollo de las raíces y actividad de los microorganismos del suelo. Oades (1984) concluyó que la práctica de barbecho constituye una de las prácticas de manejo más perjudiciales para la estructura del suelo porque la proporción de macroagregados estables al agua disminuye debido a la ausencia de un sistema de raíces activo. Por ello, este estudio demuestra que el uso de sistemas de manejo que maximicen la presencia plantas y minimicen los períodos de barbecho, en el corto plazo, conduce a un incremento de la agregación del suelo en estos sistemas agrícolas.

CONCLUSIONES

El crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha promovieron, en el corto plazo, la producción de agentes de agregación en ambas series de suelo. La concentración de carbohidratos y la glomalina presentaron una respuesta inmediata con la presencia de plantas y residuos de cosecha. Los cambios en el COP y, fundamentalmente, en el COT fueron menos marcados. La incorporación superficial de los residuos de cosecha permitió obtener una mayor concentración de carbohidratos y glomalina durante el experimento, sin embargo al final del experimento las concentraciones no difirieron por la ubicación de los residuos.

La dinámica de la agregación, en el corto plazo, estuvo asociada fuertemente con el crecimiento de plantas y adición de residuos de cosecha en ambas series de suelo. La liberación de agentes de agregación derivados de la adición de carbono a través del crecimiento de las plantas y de la adición de residuos de cosecha permitió mejorar la estructura a través de una mayor estabilidad de los agregados. Esto sugiere que los sistemas radicales activos y los residuos de cosecha pueden ser utilizados como mejoradores orgánicos para promover el mantenimiento de la actividad biológica del suelo y los agentes de agregación y así mejorar la calidad estructural de estos suelos.

Durante el experimento se demostró que en ambas series de suelo el crecimiento de plantas fue más importante que los residuos de cosecha sobre la RT, contrariamente a la hipótesis planteada. La concentración de glomalina y los efectos físicos y químicos de las raíces pueden explicar estos incrementos. Futuras investigaciones deberían desarrollarse para evaluar, en períodos más largos, los efectos de los residuos de cosecha sobre la RT y determinar la influencia en el tiempo de los diferentes agentes de agregación.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A. and Leterme P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during the decomposition of organic material. *European Journal of Soil Science* 58: 239-247.
- Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Gracia R. and López M.V. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145: 390-396.
- Amézketa E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14: 83-151.
- Angers D.A. and Caron J. 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry* 45: 55-72.
- Balesdent J., Chenu C. and Balabane M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53: 215-230.
- Blanco-Canqui H., Lal R., Owens L.B., Post W.M. and Izaurralde R.C. 2005. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1472-1481.
- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2008. Corn stover removal impacts on micro-scale soil physical properties. *Geoderma* 145: 335-346.
- Campbell C.A., Biederbeck V., Wen G., Zentner R., Schoenau J. and Hahn D. 1999. Seasonal trends in selected soil biochemical attributes: effects of crop rotation in the semiarid prairie. *Canadian Journal of Soil Science* 79: 73-84.
- Carrizo M.E., Pilatti M.A., Alesso C.A. y Imhoff S. 2011. Atributos químicos de suelos Argeudoles cultivados y no cultivados del Departamento Las Colonias (Santa Fe). *Ciencia del Suelo* 29: 173-179.
- Cosentino D., Chenu C. and 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.
- Degens B.P. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Australian Journal of Soil Research* 35: 431-459.
- Denef K., Six J., Bossuyt H., Frey S.D., Elliott E.T., Merckx R. and Paustian K. 2001. Influence of dry –wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1599-1611.
- Denef K., Six J., Merckx R. and Paustian K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant and Soil* 246: 185-200.
- Dexter A.R. and Kroesbergen B. 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research* 31: 139-147.

- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C.W. 2013. InfoStat, versión 2013, Grupo InfoStat, - FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. and Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugar and related substances. *Analytical Chemistry* 28: 350-356.
- Gregorich E.G. and Janzen H.H. 1996. Storage of soil carbon in the light fraction and macro-organic matter. In: *Structure and soil organic matter storage in agricultural soils*. R. Carter R. and Steward B.A. (eds), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 167-190.
- Gregorich E.G., Carter M.R., Doran J.W., Pankhurst C.E. and Dwyer L.M. 1997. Biological attributes of soil quality. En: *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Gregorich E.G. and Carter M.R., (eds.), Elsevier, Amsterdam, pp. 81-113.
- Haynes R.J., Swift R.S. and Stephen R.C. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil and Tillage Research* 19: 77-87.
- Haynes R.J. and Beare M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1647-1653.
- Haynes R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An Overview. *Advances in Agronomy* 85: 221-268.
- Horn R. 1990. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil and Tillage Research* 17: 265-289.
- Imhoff S., Silva, A.P. and Dexter A. 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1656-1661.
- IRAM-SAGPYA 29571-2. 2007. Calidad ambiental. Calidad del suelo. Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 2 - Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla sulfocrómica en suelos. 14 pp.
- Irizar A., Andriulo A., Cosentino D. y Améndola C. 2010. Comparación de dos métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo. *Ciencia del Suelo* 28: 115-121.
- Jastrow J.D., Miller R.M. and Lussenhop J. 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 905-916.
- Kuo S., Sainju U.M. and Jellum E.J. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Science Society of America Journal* 61: 145-152.
- Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437.
- Letey J. 1985. Relationship between soil properties and crop production. *Advances in Soil Science* 1: 273-294.
- Liu A., Ma B. and Bomke A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of America* 69: 2041-2048.
- Martens D.A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 361-369.
- Materechera S.A., Kirby J.M., Alston A.M. and Dexter A.R. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant and Soil* 160: 57-66.

- Miller R.M. and Jastrow J.D. 1990. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology and Biochemistry*. 22: 579-584.
- Monnier G. 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques* 16: 327-400.
- Munkholm L.J. and Kay B.D. 2002. Effect of water regime on aggregate tensile strength, rupture energy, and friability. *Soil Science Society of America Journal* 66: 702-709.
- Oades J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76: 319-337.
- Oades J.M. and Waters A.G. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research* 29: 815-828.
- Perfect E., Kay B.D., van Loon W.K., Sheard R.W. and Pojasok T. 1990. Factors influencing soil structural stability within a growing season. *Soil Science Society of America Journal* 54: 173-179.
- Pilatti M.A., de Orellana J.A., Priano L.J., Felli O.M. y Grenon D.A. 1988. Incidencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas en un Argiudol en el sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 6: 19-29.
- Pilatti M.A., Imhoff S., Ghiberto P. and Marano R. 2006. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Puget P., Angers D.A. and Chenu C. 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 55-63.
- Puget P. and Drinkwater L. 2001. Short-term dynamics of root-and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Science Society of America Journal* 65: 771-779.
- Rillig M., Ramsey P.W., Morris S. and Paul E.A. 2003. Glomalin, an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein, responds to soil-use change. *Plant Soil* 253: 293-299.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1979. Stabilization of soil aggregates by the roots systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research* 17: 429-441.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science* 62: 141-163.
- West S.B., Caesar-Tonthat T.C., Wright S.F. and Williams J.D. 2005. Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil. *Soil Science* 84: 154-167.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. 1996. Extraction of and abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Soil Science* 161: 575-586.
- Zhang H. 1994. Organic matter incorporation affects on mechanical properties of soil aggregates. *Soil and Tillage Research* 31: 263-175.

CONCLUSIONES GENERALES

Las características y el funcionamiento estructural son aspectos clave en la sustentabilidad ambiental de los agrosistemas. La siembra directa constituye una práctica que permite mantener la calidad edáfica al evitar procesos de degradación asociados con la labranza de los suelos. Sin embargo, en la provincia de Santa Fe a pesar de la gran adopción de esta práctica los suelos manifiestan degradación de sus propiedades químicas y físicas. Por un lado, las características texturales y mineralógicas determinan la problemática de manejar estos suelos, con importantes contenidos de limo, bajo siembra directa continúa y, por otro, la simplificación de las secuencias de cultivos y los prolongados períodos de barbecho invernal generaron la necesidad de estudiar alternativas para lograr la regeneración estructural de los suelos cultivados en siembra directa.

Diversas investigaciones previas documentaron el efecto de los mecanismos biológicos de agregación y de los ciclos de humedecimiento y secado producidos por plantas y/o clima sobre la regeneración de la estructura de suelos limosos. La mayor parte de la información reportada evalúa principalmente la acción de los sistemas radicales y el impacto de diferentes cantidades y calidades de residuos de cosecha en forma separada sobre la agregación y sobre los agentes de agregación del suelo. A pesar de ello, no ha sido estudiado el impacto de estos factores en forma conjunta sobre la producción de agentes de agregación, así como los principales mecanismos de ruptura de agregados, y su influencia sobre diferentes indicadores físicos de calidad estructural en suelos con altos contenidos de limo y cantidades variables de arcilla cultivados en sistemas de siembra directa.

Esta tesis demostró que el aporte de carbono a través del crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha, independientemente de su calidad, dosis y ubicación, condicionan la presencia de agentes de agregación en ambas series de suelo. El grado de influencia del crecimiento de plantas y residuos de cosecha fue variable sobre los diferentes agentes de agregación y sobre los suelos. Los suelos presentaron un comportamiento diferencial en la cantidad de agentes agregantes, siendo mayor la concentración en el suelo con textura franca y mayor contenido de carbono. En efecto, esto permite aceptar la hipótesis 1 que sostiene que *“la mayor producción de agentes de agregación se logra mediante la combinación del crecimiento de plantas y la incorporación al suelo de cantidades elevadas de residuos de cosecha, independientemente de su calidad en suelos con elevado contenido de limo y arcillas no expansibles”*.

La reducción de los diferentes mecanismos de desagregación estuvo fuertemente relacionada al crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha, principalmente en el suelo limoso. Se demostró que existe una alta dependencia entre la estabilidad estructural y la presencia de agentes orgánicos de agregación en ambos suelos. Otro aporte novedoso de la tesis, el cual no ha sido previamente documentado, es el impacto de la textura del suelo y del crecimiento de plantas sobre la resistencia ténsil de los agregados. La actividad de las raíces generó una mayor estabilidad del sistema poroso (*e.i.* mayor resistencia) lo cual favorece el anclaje de las plantas debido a una mejor condición física del suelo. Esta tesis también demostró que la resistencia ténsil esta asociada con la naturaleza de los agentes orgánicos de agregación del suelo. Además de estudiar propiedades de los agregados se demostró que el crecimiento de las plantas tuvo mayor efecto que los residuos de cosecha sobre el estrés efectivo y sorprendentemente, en contenidos de humedad adecuados, la matriz del suelo de ambos suelos no opone restricciones importantes en la retención y liberación de agua para el crecimiento radical de las plantas. Esto permite aceptar parcialmente la hipótesis 2 de esta tesis que propone que *“el crecimiento de plantas y los residuos de cosecha incorporados al suelo, a través de la producción de los agentes bióticos y abióticos, mejoran la calidad física del suelo medida a través de la*

estabilidad y resistencia de los agregados y el estrés efectivo en suelos con contenidos de carbono y textura contrastante”.

Esta tesis también permitió estudiar la dinámica en el corto plazo de los agentes de agregación y de indicadores de calidad estructural en suelos de textura contrastante. La presencia de plantas y adición de residuos de cosecha tuvieron un fuerte impacto sobre los agentes de agregación, aunque la capacidad de detección de dichos cambios fue variable según cada agente de agregación utilizado. Hubo mejoras en la estabilidad de los agregados en ambos suelos por la mayor presencia de agentes de agregación derivados de la actividad radical y residuos de cosecha mientras que la resistencia de los agregados en el corto plazo estuvo relacionada sólo con el crecimiento de plantas. Estos resultados permiten aceptar parcialmente la hipótesis 3 de esta tesis que propone que *“el máximo contenido de los agentes de agregación, resultado del crecimiento de plantas y de la incorporación de residuos, coincide con el momento de máximo crecimiento radicular y dicho efecto se mantiene luego de la senescencia del cultivo. Este patrón se traduce en las propiedades dependientes de los agentes de agregación, como la estabilidad y resistencia de los agregados”.*

Dada la importancia del adecuado estado estructural de los suelos y en especial en los actuales sistemas agrícolas, los resultados alcanzados en esta tesis permiten confirmar que las prácticas de manejo que conducen a la presencia de prolongados períodos de barbechos y un escaso aporte de residuos en las secuencias de cultivos conducen a la reducción de los agentes de agregación y en consecuencia disminuyen las posibilidades de recuperación del estado estructural del suelo. Asimismo, se destaca que propiedades químicas tales como carbono orgánico particulado, diferentes fracciones de carbohidratos y proteínas del suelo relacionadas a la glomalina resultaron los indicadores más sensibles para monitorear los cambios en la producción de agentes de agregación en el corto plazo. La evaluación de la estabilidad de los agregados fue el indicador físico más sensible para detectar cambios en la regeneración la estructura en ambas series de suelo.

A partir de los estudios realizados en esta tesis se proponen posibles líneas de investigación que se generaron a partir de los descubrimientos realizados:

1- Estudiar el efecto del crecimiento de plantas y la adición de residuos de cosecha en condiciones de campo para analizar la relación entre la variabilidad climática y el estado edáfico durante períodos de estudio que incluyan varios ciclos de cultivo, de modo que los resultados alcanzados puedan ser generalizados a los sistemas productivos de la región en estudio.

2- Generar información local sobre el efecto de la intensificación de los sistemas de producción con la inclusión de los cultivos de cobertura. En relación a esta temática es interesante cuantificar el impacto sobre la dinámica de carbono, los agentes de agregación e indicadores de calidad edáfica ya que las experiencias de otras zonas son escasas. La implementación de estas prácticas en estos tipos de suelo aparece como una alternativa interesante para mantener la fertilidad física de los suelos y poder recuperarla en aquellas situaciones degradadas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abid M. and Lal R. 2009. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage Research* 103: 364-372.
- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A. and Leterme P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during the decomposition of organic material. *European Journal of Soil Science* 58: 239-247.
- Álvarez C.R., Taboada M.A., Gutierrez Boem F.H., Bono A., Fernandez P.L. y Prystupa P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the rolling pampa region of Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1242-1250.
- Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Gracia R. and López M.V. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145: 390-396.
- Amézketa E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14: 83-151.
- Angers D.A. and Caron J. 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry* 45: 55-72.
- Angers D.A., Recous S. and Aita C. 1997. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ¹³C ¹⁵N-labelled wheat straw in situ. *European Journal of Soil Science* 48: 295-300.
- Annabi M., Houot S., Francou C., Poitrenaud M. and Le Bissonnais Y. 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal* 71: 413-423.
- Annabi M., Le Bissonnais Y., Le Villio-Poitrenaud M. and Houot S. 2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 144: 382-389.
- Aoyama M., Angers D.A. and N'Dayegamiye A. 1999. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Canadian Journal of Soil Science* 79: 295-302.
- Balesdent J., Chenu C. and Balabane M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53: 215-230.
- Ball B.C., Cheshire M.V., Robertson E.A.G. and Hunter E.A. 1996. Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long-term experiment. *Soil and Tillage Research* 39: 143-160.

- Barbosa A., Taboada M.A. Rodriguez M.B. y Cosentino D.J. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulda (Argentina). *Ciencia del Suelo* 15: 81-86.
- Bartoli F., Burtin G. and Guérif J. 1992. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water-stability. *Geoderma* 54: 259-274.
- Bavoso M.A., Giarola N.F., Tormena C.A. and Pauletti V. 2010. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 227-234.
- Beare M.H., Hendrix P.F. and Coleman D.C. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 777-786.
- Bedini S., Pellegrino E., Avio L., Pellegrini S., Bazzoffi P., Argese E. and Giovannetti, M. 2009. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1491-1496.
- Bengough A.G., Mc Kenzie B.M., Hallett P.D. and Valentine T.A. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62: 59-68.
- Blake G.R. and Hartge K.H. 1986. Bulk density. En: *Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Methods*. Klute, A., (ed.). Soil Science Society of America, Madison, USA, pp. 363-375.
- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2007. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil and Tillage Research* 95: 240-254.
- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2008. Corn stover removal impacts on micro-scale soil physical properties. *Geoderma* 145: 335-346.
- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2009. Corn stover removal for expanded uses reduces soil fertility and structural stability. *Soil Science Society of America Journal* 73: 418-426.
- Blanco-Canqui H., Lal R., Owens L.B., Post W.M. and Izaurrealde R.C. 2005. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1472-1481.
- Blanco-Canqui H., Lal R., Post W.M., Izaurrealde R.C. and Owens L.B. 2006. Corn stover impacts on near-surface soil properties of no-till corn in Ohio. *Soil and Tillage Research* 92: 144-155.
- Bonel B., Morrás H.J.M. y Bisaro V. 2005. Modificaciones en la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* 23:1-12.
- Bossuyt H., Denef K., Six J., Frey S.D., Merckx R. and Paustian K. 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology* 16: 195-208.
- Bossuyt H., Six J. and Hendrix P.F. 2004. Rapid incorporation of carbon from fresh residues into newly formed stable microaggregates within earthworm casts. *European Journal of Soil Science* 55: 393-401.

- Braunack M.V. and Dexter A.R. 1989. Soil aggregation in the seedbed: a review. I. Properties of aggregates and beds of aggregates. *Soil and Tillage Research* 14: 259-279.
- Bronick C.J. and Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Cambardella C.A. and Elliott E.T. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56: 777-783.
- Campbell C.A., Biederbeck V., Wen G., Zentner R., Schoenau J. and Hahn D. 1999. Seasonal trends in selected soil biochemical attributes: effects of crop rotation in the semiarid prairie. *Canadian Journal of Soil Science* 79: 73-84.
- Carrizo M.E., Pilatti M.A., Alesso C.A. y Imhoff S. 2011. Atributos químicos de suelos Argiudoles cultivados y no cultivados del Departamento Las Colonias (Santa Fe). *Ciencia del Suelo* 29: 173-179.
- Carter M.R. 2006. Crop rotation and farming systems: temperate zone. En: *Encyclopedia of Soil Science*. Lal, R., (ed.). Taylor & Francis Group, Madison, New York, pp. 362-364.
- Causarano H. 1993. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil and Tillage Research* 28: 15-25.
- Caviglia O. and Andrade F. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas. Capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3: 1-8.
- Chan K.Y. and Mullins C.E. 1994. Slaking characteristics of some Australian and British soils. *European Journal of Soil Science* 45: 273-283.
- Chan K.Y. and Heenan D.P. 1996. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. *Soil and Tillage Research* 37: 113-125.
- Chenu C. 1993. Clay-or sand- polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure. *Geoderma* 56: 143-156.
- Chenu C. and Cosentino D. 2007. Microbial regulation of soil structural dynamics. En: *Architecture and Biology of Soils: Life in Inner Space*. Ritz, K. and Young, M.I., (ed.). CABI Publishing, Cambridge, MA, USA, pp. 37-71.
- Chenu C. and Guérif J. 1991. Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Science Society of America Journal* 55: 1076-1080.
- Chenu C., Le Bissonnais Y. and Arrouays D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64: 479-1486.
- Cheshire M.V. 1979. Nature and origin of carbohydrates in soils. Academic Press, London, pp. 216.
- Cheshire M.V., Christensen B.T. and Sorensen L.H. 1990. Labelled and native sugars in particle-size fractions from soils incubated with ¹⁴C straw for 6 to 18 years. *Journal of Soil Science* 41: 29-39.
- Cosentino D., Chenu C. and 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.
- Cosentino D.J. 2006. Contribution des matieres organiques à la stabilite de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques a court terme. Tesis Doctorado. Institut National Agronomique Paris- Grignon, Paris, Francia, 186 pp.

- Cosentino D.J. y Pecorari C. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.
- Curaqueo G., Barea J.M., Acevedo E., Rubio R., Cornejo P. and Borie F. 2011. Effects of different tillage system on arbuscular mycorrhizal fungal propagules and physical properties in a Mediterranean agroecosystem in central Chile. *Soil and Tillage Research* 113: 11-18.
- Czarnes, S., Hallett P.D., Bengough G. and Young I.M. 2000. Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science* 51: 435-443.
- De Gryze S., Six J., Brits C. and Merckx R. 2005. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 55-66.
- Degens B.P. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Australian Journal of Soil Research* 35: 431-459.
- Denef K. and Six J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal of Soil Science* 56: 469-479.
- Denef K., Six J., Bossuyt H., Frey S.D., Elliott E.T., Merckx R. and Paustian K. 2001. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1599-1611.
- Denef K., Six J., Merckx R. and Paustian K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant and Soil* 246: 185-200.
- Dexter A.R. 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research* 20:87-100.
- Dexter A.R. and Kroesbergen B. 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research* 31: 139-147.
- Dexter A.R. and Watts C. 2000. Tensile strength and friability. En: *Soil and environmental analysis: physical methods*. Smith, K. and Mullins, C., (eds.). Marcel Dekker, New York, USA, pp. 401-430.
- Dexter A.R., Richard G., Arrouays D., Czyz E.A., Jolivet C. and Duval O. 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144: 620-627.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C.W. 2013. InfoStat, versión 2013, Grupo InfoStat, - FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Díaz Zorita M., Perfect E. and Grove J.H. 2002. Disruptive methods for assessing soil aggregation: A review. *Soil and Tillage Research* 64: 3-22.
- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. and Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugar and related substances. *Analytical Chemistry* 28: 350-356.
- Edwards A.P. and Bremner J.M. 1967. Dispersion of soil particles by sonic vibration. *Journal of Soil Science* 18: 47-63.

- Ekwue E.I. 1990. Organic-matter effects on soil strength properties. *Soil and Tillage Research* 16: 289-297.
- Elliott E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soil. *Soil Science Society of America Journal* 50: 627-633.
- Emerson W.W. 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research* 5: 47-57.
- Emran M., Gispert M. and Pardini G. 2012. Patterns of soil organic carbon, glomalin, and structural stability in Mediterranean abandoned terraced lands. *European Journal of Soil Science* 63: 637-649.
- Fabiola N., Giarola B., Silva A.P., Imhoff S. and Dexter A.R. 2003. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma* 113: 95-108.
- Ferreras L., Magra G., Besson P., Kovalevski E. y García F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25: 159-172.
- Franzluebbers A.J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research* 66: 197-205.
- 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: 129-139.
- Galantini J.A. 2008. Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. En: Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de Argentina. Galantini, J.A., (ed.). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, pp. 19-39.
- Gale W.J., Cambardella C.A. and Bailey T.B. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Science Society of America Journal* 64: 201-207.
- García F.O., Ambroggio M. and Trucco V. 2000. No-tillage in the Pampas of Argentina: A success story. *Better Crops International* 14: 24-27.
- Gee G.W. and Or D. 2002. Particle-Size Analysis. En: *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Dane, J.H. and Topp, G.C., (eds). Soil Science Society of America, Madison, USA, pp 255-293.
- Goebel M., Bachmann J., Woche S.K. and Fischer W.R. 2005. Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter. *Geoderma* 128: 80-93.
- Golchin A., Baldock J.A. and Oades J.M. 1997. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. En: *Soil processes and the carbon cycle*. Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F. and Stewart, B.A., (eds.). CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 245-266.
- Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O. and Clarke P. 1994. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C P/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research* 32: 285-309.
- Gregorich E.G., Carter M.R., Angers D.A., Monreal C.M. and Ellert B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74: 367-385.
- Gregorich E.G. and Janzen H.H. 1996. Storage of soil carbon in the light fraction and macro-organic matter. En: *Structure and soil organic matter storage in agricultural soils*. Carter, R. and Stewart, B.A., (eds). CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 167-190.

- Gregorich E.G., Carter M.R., Doran J.W., Pankhurst C.E. and Dwyer L.M. 1997. Biological attributes of soil quality. En: Soil quality for crop production and ecosystem health. Gregorich, E.G. and Carter, M.R., (eds.). Elsevier, Amsterdam, pp. 81-113.
- Grumberg B., Conforto G., Rovea A., Boxler M., March G.J., Luna C., Meriles J. y Vargas Gil S. 2010. La glomalina y su relación con la productividad del cultivo de maíz. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 47: 23-25.
- Guérif J. 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil and Tillage Research* 16: 167-178.
- Guggenberger G., Frey S.D., Six J., Paustian K. and Elliott E.T. 1999. Bacterial and fungal cell-wall residues in conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1188-1198.
- Guimarães R.M., Tormena C.A., Alves S.J., Fidalski J. and Blainski E. 2009. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Scientia Agricola* 66: 499-505.
- Hall A.J., Rebella C.M., Ghersa C.M. and Culot J.P. 1992. Field-crop systems of the Pampas. En: *Field Crop Ecosystems Series: Ecosystems of the World*. Pearson, C.J., (ed.). Elsevier Scientific, New York, pp. 413-450.
- Hallett P.D. and Young I.M. 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science* 50: 35-40.
- Hallett P.D., Ritz K. and Wheatley R.E. 2001. Microbial derived water repellency in golf course soil. *International Turfgrass Society* 9: 518-524.
- Haynes R.J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 211-219.
- Haynes R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An Overview. *Advances in Agronomy* 85: 221-268.
- Haynes R.J. and Beare M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1647-1653.
- Haynes R.J. and Francis G.S. 1993. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *Journal Soil Science* 44: 665-675.
- Haynes R.J. and Swift R.S. 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *Journal of Soil Science* 41: 73-83.
- Haynes R.J., Swift R.S. and Stephen R.C. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil and Tillage Research* 19: 77-87.
- Hoagland D. and Arnon D. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiments Station. Circular* 347: 1-32.
- Horn R. 1990. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil and Tillage Research* 17: 265-289.
- Horn R. and Dexter A.R. 1989. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil and Tillage Research* 13: 253-266.
- Imhoff S. 2000. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos. Tesis Doctorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Brasil, 104 pp.

- Imhoff S., Ghiberto P., Grioni A. and Gay J.P. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the flat Pampas of Argentina. *Geoderma* 158: 95-108.
- Imhoff S., Silva A.P. and Dexter A. 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1656-1661.
- Imhoff S., Tomatis S. Fernandez P. y Ghiberto P. 2014. Relacion estrés efectivo-resistencia mecánica en suelos abonados con efluentes líquidos de tambo. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas, Bahía Blanca, Argentina.
- INTA. 1983. Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3360-20. Arroyo Seco-San Nicolás de los Arroyos. INTA-MAG. Provincia de Santa Fe, Buenos Aires.
- INTA-SAGyP. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Estudios para la implementación de la reforma impositiva agropecuaria, Proyecto PNDU, Argentina 85/019. Área Edafológica, Buenos Aires, Argentina. Tomos I y II. pp. 667.
- IRAM-SAGPYA 29571-2. 2007. Calidad ambiental. Calidad del suelo. Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 2 - Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla sulfocrómica en suelos. 14 pp.
- Irizar A., Andriulo A., Cosentino D. y Améndola C. 2010. Comparación de dos métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo. *Ciencia del Suelo* 28: 115-121.
- Janzen H.H., Campbell C.A., Brandt S.A., Lafond G.P. and Townley-Smith L. 1992. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal* 56: 1799-1806.
- Jastrow J.D. 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 28: 665-676.
- Jastrow J.D., Miller R.M. and Lussenhop J. 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 905-916.
- Jolivet C., Angers D.A., Chantigny M.H., Andreux F. and Arrouays D. 2006. Carbohydrate dynamics in particle-size fractions of sandy spodosols following forest conversion to maize cropping. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 2834-2842.
- Kay B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science* 12: 1-41.
- Kay B.D. 1998. Soil structure and organic carbon: a review. En: *Soil processes and the carbon cycle*. Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F. and Stewart, B.A., (eds.). Boca Raton, CRC Press, Florida, USA, pp. 169-197.
- Kay B.D. and Angers D.A. 1999. Soil structure. En: *Handbook of soil science*. Summer, M.E., (ed.). CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 229-276.
- Kay B.D. and Dexter A.R. 1992. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. *Australian Journal of Soil Research* 30: 297-310.
- Kemper W. and Rosenau R. 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal* 48: 1001-1006.

- Kemper W.D., Rosenau R.C. and Dexter A.R. 1987. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. *Soil Science Society of America Journal* 51: 860-867.
- Kuo S., Sainju U.M. and Jellum E.J. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Science Society of America Journal* 61: 145-152.
- Lal R. 1993. Soil degradation, soil quality and soil resilience. *Soil and Tillage Research* 29: 1-8.
- Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437.
- Lehrsch G.A., Sojka R.E. and Koehn A.C. 2012. Surfactant effects on soil aggregate tensile strength. *Geoderma* 189-190: 199-206.
- Letey J. 1985. Relationship between soil properties and crop production. *Advances in Soil Science* 1: 273-294.
- Ley G.J., Mullins C.E. and Lal R. 1989. Hard-setting behavior of some structurally weak tropical soils. *Soil and Tillage Research* 13: 365-381.
- Ley G.J., Mullins C.E. and Lal R. 1993. Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. *Soil and Tillage Research* 28: 1-13.
- Liu A., Ma B. and Bomke A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of America* 69: 2041-2048.
- Lovelock C.E., Wright S.F., Clark D.A. and Ruess R.W. 2004a. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. *Journal of Ecology* 92: 278-287.
- Lovelock C.E., Wright S.F. and Nichols K.A. 2004b. Using glomalin as an indicator for arbuscular mycorrhizal hyphal growth: an example from a tropical rain forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 36: 1009-1012.
- Lowe L.E. 1993. Total and labile polysaccharide analysis of soils. En: *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Carter, M.R., (ed.). CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 373-376.
- Lynch J.M. and Bragg E. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Advances Soil Science* 2: 134-170.
- Macks S.P., Murphy B.W., Cresswell H.P. and Koen T.B. 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Australian Journal of Soil Research* 34: 343-360.
- Maqubela M.P., Muchaonyerwa P. and Mnkeni P.N. 2012. Inoculation effects of two south African cyanobacteria strains on aggregate stability of a silt loam soil. *African Journal of Biotechnology* 11: 10726-10735.
- Martens D.A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 361-369.
- Martins M., Corá J., Jorge R. and Marcelo A. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil and Tillage Research* 104: 22-29.
- Masola M.J., Imhoff S., Carrizo M.E., Alesso C.A. y Gambaudo S. Evolución de propiedades físicas con la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas, Bahía Blanca, Argentina.

- Materechera S.A., Dexter A.R. and Alston A.M. 1992. Formation of aggregates by plant roots in homogenized soils. *Plant Soil* 142: 69-79.
- Materechera S.A., Kirby J.M., Alston A.M. and Dexter A.R. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant and Soil* 160: 57-66.
- Matson P.A., Parton W.J., Power A.G. and Swift M.J. 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Soil Science* 277: 504-509.
- Michelena R.O., Irurtia C.B., Vavruska F.A., Mon R. y Pittaluga A. 1989. Degradación de suelos del Norte de la Región Pampeana. *Publicación Técnica* 6. INTA.
- Micucci F. and Taboada M. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 86: 152-162.
- Micucci F.G. 2006. Aptitud física de suelos de Pampa Ondulada para ser manejados con siembra directa continúa. Tesis Magister. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 127 pp.
- Miller R.M. and Jastrow J.D. 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure. En: *Arbuscular mycorrhizas: physiology and function*. Kapulnik, Y. and Douds, D.D. Jr, (eds.). Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp 3-18.
- Miretti M.C., Imhoff S., Silva A.P. and Lavado S.R. 2010. Soil structure degradation in patches of alfalfa fields in Santa Fe. *Scientia Agrícola* 67: 604-610.
- Miretti M.C., Pilatti M.A., Lavado S.R. y Imhoff S. 2012. Historia de uso del suelo y contenido de micronutrientes en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Ciencia del Suelo* 30: 67-73.
- Monnier G. 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques* 16: 327-400.
- Mosconi F., Priano L., Moscatelli G., Salazar J.L., Gutierrez T. y Caceres L. 1981. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. INTA-MAG, pp. 246.
- Mullins C.E. and Panayiotopoulos K.P. 1984. The strength of unsaturated mixture of sand and kaolin and the concept of effective stress. *Journal of Soil Science* 35: 459-468.
- Mulumba L.N. and Lal R. 2008. Mulching effects on select soil properties. *Soil and Tillage Research* 98: 106-111.
- Munkholm L.J. and Kay B.D. 2002. Effect of water regime on aggregate tensile strength, rupture energy, and friability. *Soil Science Society of America Journal* 66: 702-709.
- Munkholm L.J., Schjønning P. and Kay B.D. 2002. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil and Tillage Research* 64: 125-135.
- Munkholm L.J., Schjønning P. and Petersen C.T. 2001. Soil mechanical behaviour of sandy loams in a temperate climate: case-studies on long-term effects of fertilization and crop rotation. *Soil Use and Management* 17: 269-277.
- Novelli L.E. 2013. Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. Tesis Doctorado. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 127 pp.
- Oades J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76: 319-337.

- Oades J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Oades J.M. and Waters A.G. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research* 29: 815-828.
- Pecorari C., Guerif J. y Stengel P. 1990. Fitólitos en los suelos pampeanos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo* 8: 135-141.
- Perfect E., Kay B.D. and Silva E.P. 1995. Influence of soil properties on the statistical characterization of dry aggregate strength. *Soil Science Society of America Journal* 59: 532-537.
- Perfect E., Kay B.D., van Loon W.K., Sheard R.W. and Pojasok T. 1990. Factors influencing soil structural stability within a growing season. *Soil Science Society of America Journal* 54: 173-179.
- Pilatti M.A., de Orellana J.A., Priano L.J., Felli O.M. y Grenon D.A. 1988. Incidencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas en un Argiudol en el sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 6: 19-29.
- Pilatti M.A., Imhoff S., Ghiberto P. and Marano R. 2006. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Plante A.F. and Mc Gill W.B. 2002. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil and Tillage Research* 66: 79-92.
- Portella C., Guimarães M., Feller C., Batista Fonseca I. and Tavares Filho J. 2012. Soil aggregation under different management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36: 1868-1877.
- Puget P. and Drinkwater L.E. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Science Society of America Journal* 65: 771-779.
- Puget P., Angers D.A. and Chenu C. 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 55-63.
- Puget P., Chenu C. and Balensdent J. 2000. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science* 51: 595-601.
- Puget P., Chenu C. and Balesdent J. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 46: 449-459.
- Reid J.B. and Goss M.J. 1982. Interactions between soil drying due to plant water use and decreases in aggregate stability caused by maize roots. *Soil Science* 33: 47-53.
- Reyna D.L. and Wall L.G. 2014. Revision of two colorimetric methods to quantify glomalin-related compounds in soils subjected to different managements. *Biology and Fertility of Soils* 50: 395-400.
- Rillig M. 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters* 7: 740-754.
- Rillig M. 2005. A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency?. *Pedobiologia* 49: 395-399.
- Rillig M. and Mummey D. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* 171: 41-53.

- Rillig M., Ramsey P.W., Morris S. and Paul E.A. 2003. Glomalin, an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein, responds to soil-use change. *Plant Soil* 253: 293-299.
- Rillig M., Wright S. and Eviner V. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil* 238: 325-333.
- Rillig M.C. and Steinberg P.D. 2002. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 1371-1374.
- Rubio G., Mosca C., Varela M.F., Scianca C. y Taboada M.A. 2012. Estructura de suelos arenosos bajo cultivos de cobertura. *Memoria Técnica INTA 2011-2012*: 43-47.
- SAMLA. 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos . CD-room. ISBN 987-9184-40-8.
- Santanatoglia O.J. y Fernández N. 1983. Estabilidad estructural y contenido de gomas microbianas bajo distintos tipos de manejo, en un suelo de la Serie Ramallo (Argiudol Vértico). *Ciencia del Suelo* 1: 43-49.
- Sasal M.C., Andriulo A. and Taboada M.A. 2006. Soil porosity characteristics on water dynamics under direct drilling in Argiudolls of the Argentinean Rolling Pampas. *Soil and Tillage Research* 87: 9-18.
- Senigagliesi C. and Ferrari M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. En: *International Crop Science I*. Buxton, D.R., Shibles, R., Forsberg, R.A. Blad, B.L., Asay, K.H., Paulsen, G.M. and Wilson, R.F., (ed.). Crop Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, pp. 27-35.
- Singh P.K. 2012. Role of glomalin related soil protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi : a review. *Agricultural Science Research Journal* 2: 119-125.
- Singhy B. and Malhi S.S. 2006. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. *Soil and Tillage Research* 85: 143-153.
- Six J., Bossuyt H., De Gryze S. and Denef K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7-31.
- Six J., Elliot E. and Paustian K. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1350-1358.
- Six J., Elliott E.T. and Paustian K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 2099-2103.
- Six J., Elliott E.T., Paustian K. and Doran J.W. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America* 62: 1367-1377.
- Six J., Feller C., Denef K., Ogle S.M., Moraes Sa, J.C. and Albrecht A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie* 22: 755-775.

- Solbrig O.T. and Viglizzo E.F. 1999. Sustainable farming in the Argentine pampas: history, society, economy and ecology. Paper No. 99/00-1, DRCLAS (Working papers on Latin America), Harvard University, Cambridge, MA, pp. 40.
- Spaccini R., Piccolo A., Mbagwu J.S., Zena Teshale A. and Igwe C.A. 2002. Influence of the addition of organic residues on carbohydrate content and structural stability of some highland soils in Ethiopia. *Soil Use and Management* 18: 404-411.
- Spohn M. and Giani L. 2011. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1081-1088.
- Steinbach H.S. y Álvarez R. 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana?. *Informaciones Agronómicas* 33: 7-12.
- Steinberg P.D. and Rillig M.C. 2003. Differential decomposition of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae and glomalin. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 191-194.
- Studdert G.A. and Echeverría H.E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1496-1503.
- Taboada M., Barbosa O., Rodríguez M. and Cosentino D. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.
- Taboada M.A., Barbosa O.A. and Cosentino D.J. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loamy soils. *Journal of Soil Science* 173: 130-142.
- Taboada M.A., Cosentino D.J., Micucci F.G. and Lavado R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research* 49: 57-63.
- Tisdall J.M. 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil* 159: 115-121.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1979. Stabilization of soil aggregates by the roots systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research* 17: 429-441.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science* 62: 141-163.
- Tormena C., Fidalski J. and Rossi W. 2008 a. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 33-42.
- Tormena C.A., Bavaresco M.A., Fidalski J., Imhoff S. and Silva A.P. 2008 b. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um latossolo vermelho distroférrico sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32:943-952.
- Utomo W.H. and Dexter A.R. 1981. Soil friability. *Journal of Agricultural Engineering Research* 32: 203-213.
- Varela M., Fernandez P., Rubio G. y Taboada, M. 2011. Cultivos de cobertura: efectos sobre la macroporosidad y la estabilidad estructural de un suelo franco-limoso. *Ciencia del Suelo* 29: 99-106.
- Vepraskas M.J. 1984. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Science Society American Journal* 48: 1220-1225.
- Viglizzo E.F., Carreño L.V., Pereyra H., Ricard F., Clatt J. y Pincén D. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: *Expansión de la frontera agropecuaria*

- en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Viglizzo, E.F. y Jobbágy, E., (ed.). Ediciones INTA, Buenos Aires, pp. 9-17.
- Wall L.G. 2011. The BIOSPAS consortium. En: Handbook of molecular microbial ecology I. de Bruijn, F.J., (ed). Wiley-Blackwell, New Jersey, pp. 299-306.
- Watts C.W. and Dexter A.R. 1997. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. *Soil and Tillage Research* 42: 253-275.
- Watts C.W. and Dexter A.R. 1998. Soil Friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science* 49: 73-84.
- West S.B., Caesar-Tonthat T.C., Wright S.F. and Williams J.D. 2005. Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil. *Soil Science* 84: 154-167.
- Whalley W.R., Leeds-Harrison P.B., Clark L.J. and Gowing D.J. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 84: 18-27.
- Wolf D.C. and Wagner G.H. 1999. Carbon transformations and soil organic matter formation. En: Principles and applications of soil microbiology. Sylvia, D.M., Fuhrmann, J.J., Hartel, P.G. and Zuberer, D.A., (eds.). Pearson Prentice Hall, New Jersey, pp. 285-332.
- Wright A.L. and Hons H.F. 2004. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Science Society of America Journal* 68: 507-513.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. 1996. Extraction of and abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Soil Science* 161: 575-586.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.
- Wright S.F., Green V.S. and Cavigelli M.A. 2007. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. *Soil and Tillage Research* 94: 546-549.
- Wright S.F., Starr J.L. and Paltineanu I.C. 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal* 63:1825-1829.
- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *American Society of Agronomy* 28: 337-351.
- Zaher H., Caron J. and Ouaki B. 2005. Modeling aggregate internal pressure evolution following immersion to quantify mechanisms of structural stability. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1-12.
- Zhang H. 1994. Organic matter incorporation affects on mechanical properties of soil aggregates. *Soil and Tillage Research* 31: 263-175.

