

**Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento
hidro-físico y estructural en suelos con distinta intensidad de uso y
secuencia de cultivos bajo siembra directa**

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

Filipe Behrends Kraemer
Ingeniero Agrónomo – UBA - 2006
Magister Cs. del Suelo – UBA - 2011

Instituto de Suelos – INTA, Castelar



FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Héctor J. M. Morrás

Ingeniero Agrónomo (UCSF)
Ms. Sc. (Rijksuniversiteit Gent)
Dr. Ir. (Universite de Paris VII)

Co-director

Diego J. Cosentino

Ingeniero Agrónomo (UBA)
Ms. Sc. (UBA)
Docteur (AgroParisTech Paris)

Consejero de Estudios

Carina R. Álvarez

Ingeniero Agrónomo (UBA)
Ms. Sc. (UBA)
Doctora en Ciencias Agropecuarias (UBA)

JURADO DE TESIS

Director de tesis

Héctor J. M. Morrás

Ingeniero Agrónomo (UCSF)
Ms. Sc. (Rijksuniversiteit Gent)
Dr. Ir. (Universite de Paris VII)

JURADO

Nilda Mabel Amiotti

Ingeniera Agrónoma (UNS)
Doctora en Agronomía (UNS)

JURADO

Silvia Imhoff

Ingeniera Agrónoma (UNL)
Doctora en Ciencias Agropecuarias (USP, Brasil)

JURADO

Margarita Osterrieth

Licenciada en Geología (UNLP)
Doctora en Ciencias Naturales (UNLP)

Fecha de defensa de la tesis: 25 de MARZO de 2015

Dedicatoria

Para mis amores Isa y Pato, son la llama de mi vida

Agradecimientos

A mi Director, Héctor, gracias por la oportunidad y por creer en mi. Además agradezco la independencia con la que pude realizar esta tesis.

A mi comité, Carina y Diego. Gracias por las correcciones y por el apoyo constante.

A mis jurados Nilda, Silvia y Margarita por enriquecer sensiblemente esta tesis y por las interesantes dicusiones en la defensa.

Al Insituto de Suelos (INTA) por la infraestructura y la colaboración de su personal, en especial a Javier Delgado por la ayuda y compañía todos estos años. También a otros grupos del INTA-Castelar como el grupo dirigido por Omar Tesouro. Gracias por los equipos y la paciencia.

A todos los integrantes de la Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos (FAUBA) por el apoyo y amistad, en especial a Mario Castiglioni por todas las enseñanzas, el tiempo y la amistad brindada.

Al proyecto BIOSPAS, por el financiamiento de esta tesis y por la posibilidad numerosos intercambios científicos con los investigadores participantes. En especial agradezco al grupo de Camilo Bedano y al grupo del Dr. Galantini por los datos suministrados y las excelentes dicusiones.

A Marcelo Soria y a Lucas Garibaldi por su ayuda en los análisis estadísticos y por su amistad.

A Marine Empson y Fabien Achard, pasantes franceses que me acompañaron y ayudaron en diferentes momentos de la tesis. Un placer haber trabajado con ustedes.

A la Escuela para Graduadas (EPG-FAUBA) por ayudarme a lograr este gran objetivo.

A mis amigos, por su amistad incondicional.

A mis padres, Susan y Cláudio por el amor de todos los días y por señalarme con su ejemplo un camino de superación y excelencia. Gracias a Chico, Lu, Fredy, Gise y Tomás por darme siempre momentos de felicidad y alegría. Gracias Mirta por la ayuda y cariño.

A los amores de mi vida Isabel y Patricia, este logro es de ustedes. Gracias por tus consejos, por tu amor inconmesurable y porque al mirar tus ojos veo que no existen obstáculos imposibles. Lo hicimos de nuevo! Gracias otra vez!

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

Publicaciones derivadas de la Tesis

Revistas científicas

- Castiglioni, M.G., **Kraemer, F.B.**, Morrás H.J.M. Efecto de la secuencia de cultivos bajo siembra directa sobre la calidad física de suelos de la región Pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)* 31(1): 93-105. (2013).
- Rosa, S.M¹., **Kraemer F.B**¹., Soria, M.A., Guerrero, L.D., Morrás, H.J.M, Figuerola, E.L.M and Erijman, L. The influence of soil properties on denitrifying bacterial communities and denitrification potential in no-till production farms under contrasting management in the Argentinean Pampas. *Applied Soil Ecology* 75: 172-180. (2014) *1. Ambos primeros autores.*
- **Kraemer, F.B.**, P.L., Fernández, M.B. Ceddía, C.I. Chagas y H.J.M. Morrás. Efecto del procedimiento de eliminación de materia orgánica y velocidad de agitación en la distribución de tamaños de partículas en suelos de textura y mineralogía contrastantes. Enviado a *Ciencia del Suelo*.

INDICE

INDICE.....	VII
INDICE DE TABLAS.....	XI
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVIII
RESUMEN.....	XIX
ABSTRACT.....	XX
CAPÍTULO 1.....	1
<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
1.1 Antecedentes generales.....	2
1.2. Área de estudio y diseño experimental.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	12
1.3.2 Hipótesis Generales.....	12
1.4 Organización de la Tesis.....	13
CAPÍTULO 2.....	14
<i>COMPOSICIÓN MINERAL Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS BAJO ESTUDIO</i>.....	14
2.1 Introducción.....	15
2.1.1 Fracción arcilla.....	15
2.1.2 Fracción limo.....	17
2.2.3 Otros componentes.....	18
2.2 Materiales y Métodos.....	20
2.2.1 Caracterización física y química de los suelos.....	20
2.2.1.1 Análisis mineralógicos.....	20
2.2.1.2 Índices de Atteberg.....	21
2.2.1.3 Fraccionamiento densimétrico de la fracción limos (2-50 µm).....	21
2.2.1.4 Determinación del hierro total y fraccionamiento del hierro.....	21
2.2.1.5 Curvas de expansión y contracción.....	22
2.2.2 Análisis estadísticos.....	22
2.3 Resultados.....	23
2.3.1 Características químicas y físicas generales de los suelos evaluados.....	23
2.3.1.1 Análisis granulométrico.....	25
2.3.1.2 Capacidad de intercambio catiónico.....	26
2.3.1.3 Carbono orgánico total y humedad equivalente.....	27
2.3.2 Caracterización mineralógica de los suelos bajo estudio.....	29

2.3.2.1 Fracción arcilla	29
2.3.2.2. Mineralogía de la muestra total de suelo	30
2.3.3 Variables reológicas	31
2.3.4 Fraccionamiento densimétrico de limos.	33
2.3.5 Hierro total y fraccionamiento del hierro.	35
2.3.6 Análisis de componentes principales (ACP)	35
2.3.7 Curvas de contracción de agregados.....	37
2.4 Discusión	39
2.4.1 Características generales de los suelos	39
2.4.2 COT y HE.....	40
2.4.3 Fracción limos	41
2.4.4 Curvas de contracción de agregados.....	41
2.4.5 Hierro total y su fraccionamiento	42
2.5 Conclusión.....	43
 CAPÍTULO 3.....	 44
 MODIFICACIONES DE LA CALIDAD HIDROFÍSICA EN SUELOS DE TEXTURA Y MINERALOGÍA CONTRASTANTES BAJO SIEMBRA DIRECTA	 44
3.1 Introducción.....	45
3.1.1 Calidad Hidrofísica.....	46
3.1.1.1 Densidad aparente y resistencia a la penetración.....	47
3.1.1.2 Porosidad total, textural y estructural	47
3.1.1.3 Distribución de tamaño de poros, distribución estadística de tamaño de poros.....	48
3.1.1.4 Indicadores de almacenaje de agua.....	49
3.1.1.5 Capacidad de campo y capacidad de agua disponible	49
3.1.1.6 Capacidad de aire y capacidad de campo relativa	49
3.2 Materiales y Métodos	52
3.2.1 Compactación y porosidad (Sección A)	52
3.2.1.1 Densidad aparente	52
3.2.1.2 Porosidad total	52
3.2.1.3 Resistencia a la penetración.....	52
3.2.1.4 Porosidad estructural y textural	52
3.2.2 Tamaño y distribución estadística de poros (sección B).....	52
3.2.2.1 Macroporosidad >1000 µm, >300 µm y >50 µm, microporosidad <50 µm	53
3.2.2.2 Funciones de distribución de poros	53
3.2.3 Almacenamiento de agua (sección C)	55
3.2.3.1 Capacidad de campo	55
3.2.3.2 Capacidad de agua disponible	55
3.2.3.3 Capacidad de aire	55
3.2.3.4 Capacidad de campo relativa (CCR)	55
3.2.4 Observaciones metodológicas sobre la curvas de retención hídrica	56
3.2.5. Análisis estadísticos.....	56
3.3 Resultados y Discusión.....	58
 Sección A	 58
3.3.1.1 Compactación y Porosidad	58
3.3.1.2 Densidad aparente y resistencia a la penetración.....	58
3.3.1.3 Porosidad total, textural, estructural	62
3.3.1.4 Efecto de las variables de manejo sobre la compactación	63
3.3.1.5 Efecto de las propiedades del suelo y las fracciones de carbono orgánico sobre la compactación y porosidad	66
3.3.1.6 Discusión compactación y porosidad	70

Sección B	73
3.3.2 Variables de tamaño y distribución estadística de poros	73
3.3.2.1 Tamaño de poros	74
3.3.2.2 Variables de distribución de tamaño de poros	76
3.3.2.3 Efecto de las variables de manejo en los parámetros de tamaño y distribución de tamaño de poros	81
3.3.2.4 Efecto de distintas propiedades del suelo en las variables de tamaño y distribución de tamaño de poros	84
3.3.2.5 Efecto de distintas fracciones de carbono orgánico del suelo en las variables de tamaño y distribución de poros	84
3.3.2.6 Discusión sobre las variables de tamaño y distribución de tamaño de poros	88
Sección C	91
3.3.3 Variables de almacenamiento de agua	91
3.3.4 Efecto de las variables de manejo sobre las variables de almacenaje de agua	96
3.3.5 Efecto de distintas propiedades del suelo, fracciones de carbono orgánico en las variables de almacenamiento de agua	98
3.3.6. Discusión sobre las variables de almacenamiento de agua	100
3.4 Conclusiones	101
 CAPÍTULO 4	 103
 CALIDAD ESTRUCTURAL EN DIFERENTES ESCALAS ESPACIALES DE SUELOS DE TEXTURA Y MINERALOGÍA CONTRASTANTES BAJO SIEMBRA DIRECTA	 103
Introducción	104
Sección A - Descripción Estructural del Suelo	107
4.1 Introducción	107
4.2 Materiales y Métodos	109
4.2.1 Evaluación estructural del suelo	109
4.2.1.1 Calificación visual a campo de la estructura	109
4.2.1.2 Porosidad visible, excentricidad y redondez	109
4.2.1.3 Morfología tridimensional de los agregados	110
4.2.2 Análisis estadísticos	110
4.3 Resultados	111
4.3.2 Análisis de la estructura del suelo	111
4.3.2.1 Descripción estructural y clasificación visual a campo	111
4.3.2.2 Porosidad visible, Redondez y Excentricidad	116
4.3.2.3 Morfología tridimensional de agregados	117
4.3.3 Comportamiento dinámico e inherente de las variables estructurales	118
4.3.4 Efecto de las características de manejo sobre las variables estructurales	120
4.4 Discusión	122
4.4.1 Estructura e Icv	122
4.4.2 Porosidad visible, redondez	123
4.4.3 Análisis tridimensional de agregados	124
4.5 Conclusión	125
 Sección B - Descripción Estructural del Suelo- Micro escala	 126
4.1 Introducción	126
4.2 Materiales y métodos	128

4.3 Resultados	128
4.3.1 Masa basal	128
4.3.2 Porosidad y microestructura	129
4.4 Discusión	137
4.5 Conclusiones	138
<i>Sección C- Estabilidad estructural del suelo</i>	139
4.1 Introducción.....	139
4.2 Materiales y métodos	140
4.2.1 Determinación de la estabilidad estructural del suelo.....	140
4.2.2 Análisis estadísticos.....	141
4.3 Resultados	142
4.3.1 Efecto de los tratamientos de manejo sobre la estabilidad estructural.....	142
4.3.2 Correlaciones entre la estabilidad estructural y las variables de manejo y fracciones de carbono orgánico.	147
4.3.2.1 Variables de Manejo.....	147
4.3.2.2 Fracciones de carbono orgánico	148
4.3.2.3 Propiedades de suelo	149
4.3.3 Humedad edáfica y estabilidad estructural	150
4.4.1 Uso de diferentes tests de estabilidad estructural para la discriminación de las tratamientos de manejo.	152
4.4.2 Efecto de los tratamientos de manejo sobre la estabilidad estructural.....	153
4.4.3 Efecto de las variables de manejo sobre la estabilidad estructural	154
4.4.4 Relación entre Estabilidad Estructural y las propiedades del suelo	156
4.4.5 Relación entre estabilidad estructural y las fracciones de carbono orgánico	157
4.5 Conclusiones	158
Conclusiones generales del capítulo 4.....	159
<i>CAPÍTULO 5.....</i>	161
<i>CONCLUSIONES GENERALES</i>	161
<i>BIBLIOGRAFÍA.....</i>	165
<i>ANEXOS.....</i>	182
<i>APÉNDICE 1</i>	200
<i>HIDROFOBICIDAD DEL SUELO</i>	200
<i>APÉNDICE 2</i>	220
<i>MOVIMIENTO DE AGUA EN SUELOS DE TEXTURA Y MINERALOGÍA CONTRASTANTES BAJA SIEMBRA DIRECTA Y AMBIENTE NATURAL.</i>	220

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Secuencias de cultivos, características de manejo y rendimientos de los tratamientos de Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para los sitios de Bengolea, Monte Buey, Pergamino y Viale para distintos períodos (2004 al 2010).....	8
Tabla 1.2 Peso de los las variables de manejo para el primer y segundo componente principal (CP1, CP2).....	10
Tabla 1.3 Características climáticas y fisiográficas de los sitios (Haplustol, Argiudol -Monte Buey-, Argiudol -Pergamino- y Hapludert) y tratamientos de manejo (Ambiente natural -AN-, Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP-).....	11
Tabla 2.1 Síntesis de los criterios utilizados para la identificación de arcillas mediante ensayos de comportamiento.	21
Tabla 2.2 Características físicas y químicas de los suelos evaluados: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP).	24
Tabla 2.3 Cuantificación mineralógica de la muestra total de suelo para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los distintos tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas).....	31
Tabla 2.4 Características reológicas y mineralógicas de los suelos evaluados: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos: AN (Ambiente natural), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP)	33
Tabla 2.5 Autovectores correspondientes al análisis de componentes principales	37
Tabla 2.6 Características de expansión y contracción de los suelos evaluados: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas).....	39
Tabla 3.1 Efectos fijos y aleatorios del modelo mixto completo, AIC y componentes de varianza para las variables de compactación y porosidad	58
Tabla 3.2 Correlaciones (Pearson) entre las variables de compactación y porosidad y variables de manejo para las tres profundidades evaluadas (0-5, 5-10 y 10-20 cm) para todos los suelos y todos los suelos sin el Hapludert.....	65
Tabla 3.3 Correlaciones (Pearson) entre las variables de compactación (Densidad Aparente -DAP) y Resistencia a la penetración ($RP_{corr \theta}$) y porosidad (Porosidad total -PT; Porosidad estructural - P_{estr} y; Porosidad textural - P_{tx}) y las propiedades del suelo, fracciones de carbono orgánico y estabilidad estructural para 0-20 cm	69
Tabla 3.4 a) Efectos fijos y aleatorios del modelo mixto, AIC y b) componentes de varianza para las variables de tamaño y distribución de poros.....	73
Tabla 3.5 Promedio para todos los suelos de las variables de distribución de tamaño de poros (Moda - D_{moda} -, Mediana - $D_{mediana}$ -, Media - D_{media} -, Dispersión estándar -DE-, Curtosis y Asimetría) para los tratamientos Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm.....	78
Tabla 3.6 Valores promedio de las variables de tendencia central (Moda - D_{moda} -, Mediana - $D_{mediana}$ -, Media - D_{media} -) y de forma de la curva de distribución de tamaño de poros (Dispersión estándar -DE-, asimetría y curtosis) para los tratamientos Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para las para los suelos, Haplustol, Argiudol – Monte Buey -, Argiudol -Pergamino- y Hapludert, para cada profundidad evaluada, 0-5, 5-10 y 10-20 cm.	80
Tabla 3.7 Correlaciones (Pearson) entre las variables de tamaño y distribución de tamaño de poros y variables de manejo para las tres profundidades evaluadas (0-5, 5-10 y 10-20 cm).....	82
Tabla 3.8 Correlación de Pearson entre las variables de tamaño de poros y propiedades del suelo y fracciones de carbono orgánico	86

Tabla 3.9 Correlación de Pearson entre las variables de tendencia central y forma de la curva de distribución de poros y propiedades del suelo y fracciones de carbono orgánico	87
Tabla 3.10 a) Efectos fijos y aleatorios del modelo mixto, AIC y b) componentes de varianza para las variables de almacenamiento de agua.....	91
Tabla 3.11 Correlaciones (Pearson) entre las variables de almacenamiento de agua e indicadores hidrofísicos y variables de manejo.....	97
Tabla 3.12 Correlaciones (Pearson) entre las variables de almacenamiento de agua y las propiedades del suelo y fracciones de carbono orgánico	99
Tabla 4.1 Análisis de componentes de varianza en porcentaje para el tratamiento, sitio y el residuo del modelo mixto para las variables estructurales.	119
Tabla 4.2 Correlación de Pearson entre las variables morfológicas y estructurales del suelo y las características físicas químicas de los suelos y distintas fracciones de carbono orgánico.	120
Tabla 4.3 Correlación de Pearson entre las variables estructurales y las variables de manejo para todos los suelos evaluados.	121
Tabla 4.4 Componentes de varianza y correlación (Pearson) de los componentes principales del suelo (CP1_suelo, CP2_suelo) para los tests de estabilidad estructural: humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap\ 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}), humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}) y promedio de DMP_{rap} , DMP_{ag} y DMP_{cap} ($DMP_{rap,ag,cap}$).	143
Tabla 4.5 Estabilidad estructural según la metodología Le Bissonnais, (1996) para los suelos Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP), Malas prácticas (MP) considerando los tests: humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap\ 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}), humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}) y para el promedio de DMP_{rap} , DMP_{ag} y DMP_{cap} ($DMP_{rap,ag,cap}$).....	144
Tabla 4.6 Correlaciones (Pearson) entre las variables de estabilidad estructural, humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap\ 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}), humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}) y para el promedio de DMP_{rap} , DMP_{ag} y DMP_{cap} ($DMP_{rap,ag,cap}$) y a) variables de manejo, b) propiedades físicas y químicas y c) distintas fracciones de carbono orgánico	145
Tabla 5.1 Correlación de Pearson entre las variables de manejo y el CP1_final.....	163

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema conceptual entre la intensificación agrícola, composición de suelo, siembra directa y componentes de la calidad hidrofísica y estructural bajo una secuencia de cultivo y variables ambientales en el tiempo.	5
Figura 1.2 Scores sobre el primer (CP1) y segundo eje (CP2) del análisis de componentes principales.	9
Figura 1.3 Mapa de localización de los sitios bajo estudio.	11
Figura 1.4 Organización de la tesis.	13
Figura 2.1 Composición granulométrica (%) a) arcillas, b) limos y c) arenas para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el suelo Haplustol, Argiudol (Monte Buey –MB-), Argiudol (Pergamino –Perg-) y Hapludert.	26
Figura 2.2 Capacidad de intercambio catiónico (cmol kg ⁻¹) para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el suelo Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert.	27
Figura 2.3 Carbono orgánico total (COT) para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el suelo Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert.	28
Figura 2.4 Humedad equivalente (HE) para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey-MB), Argiudol (Pergamino-Perg) y Hapludert.	28
Figura 2.5 Semi-cuantificación de la mineralogía (%) para los tratamientos: AN (Ambiente Natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas Prácticas) para el suelo Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert. E+I/E: Esmeclita+ Interestratificado illita-esmeclita. Barras corresponde al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción tratamientos y suelos (Tukey, p<0,05).....	30
Figura 2.6 a) Límite plástico (Lp), b) límite líquido, c) actividad de arcillas (AA) y d) índice plástico para los tratamientos: Ambiente natural (AN), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert.	32
Figura 2.7 Cuantificación de limos de baja densidad <2,3 g cm ⁻³ y de densidad media >2,3 g cm ⁻³ - < 2,9 g cm ⁻³ en % del limo total para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert.	34
Figura 2.8 (a) Ejemplos de limos de baja densidad donde se observan biolitos, espirulinas, vidrios volcánicos, entre otros; (b) Microagregado de tamaño limo en donde se observan inclusiones de vidrios volcánicos y biolitos.	34
Figura 2.9 (a) Contenido total de hierro y (b) fraccionamiento de hierro, para los suelos: Haplustol, Argiudol (Pergamino) y el Hapludert; y para los tratamientos: AN (Ambiente natural), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP).	35
Figura 2.10 Resultados del análisis de componentes principales. Los diferentes colores indican los tratamientos analizados (AN - Ambiente natural: verde, BP- Buenas prácticas: azul, y MP - Malas prácticas: rojo) mientras que los distintos símbolos indican el tipo de suelo: (● Haplustol; ■ Argiudol (Monte Buey); ◆ Argiudol (Pergamino) y ▲ Hapludert.	36
Figura 2.11 Curva de contracción de agregados (1-5 cm) los suelos evaluados: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos: AN (Ambiente natural), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP).....	38
Figura 3.1 Esquema metodológico del capítulo IV.	51
Figura 3.2 Densidad aparente (DAP) para (a) tratamientos de manejo AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) y (b) distintas profundidades evaluadas (0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm).....	59

- Figura 3.3** Densidad aparente (DAP) para los tratamientos de manejo AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para los distintos suelos evaluados, Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert..... 59
- Figura 3.4** Resistencia a la penetración corregida por humedad del suelo (R_{Pcorrθ}) para las profundidades 0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm para: a) Haplustol; b) Argiudol (Monte Buey); c) Argiudol (Pergamino); d) Hapludert; para Ambiente natural (verde), Buenas prácticas (azul) y Malas prácticas (rojo). 61
- Figura 3.5** Porosidad textural del horizonte superficial (%) para la combinación de suelos: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert y tratamientos: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). Letras diferentes significan diferencias significativas de la interacción tratamiento de manejo*tipo de suelo (LSD, p<0,05). 62
- Figura 3.6** Porosidad Estructural (%) en barras en escala de grises y porosidad total (en barras blancas, sumatoria de ambas barras) para cada suelo: Haplustol; Argiudol (Monte Buey); Argiudol (Pergamino) y; Hapludert; y para los tratamientos: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). 63
- Figura 3.7** Regresiones lineales entre: (a) Densidad aparente (DAP) e ISI 0-5 cm; y (b) Porosidad textural (P_{tx}) e ISI (0-20 cm). Línea de tendencia punteada corresponde a Hapludert. ISI: Índice de intensificación del cultivo 64
- Figura 3.8** Regresiones lineales entre: (a) PT y contenido de limos; (b) P_{tx} y contenido de limos; (c) PT y AA; (d) PT y COP_f; (e) P_{tx} y COP_f; (f) P_{tx} y CH_s. 68
- Figura 3.9** Macroporosidad >300 μm (P_{Mac >300}) para Ambiente natural (AN - círculo negro), Buenas prácticas (BP - círculo blanco) y Malas prácticas (MP - círculo gris) para 0-5, 5-10 y 10-20 cm.... 75
- Figura 3.12** Diámetro de la moda de poros (D_{moda}) para Ambiente natural (AN - círculo negro), Buenas prácticas (BP - círculo blanco) y Malas prácticas (MP - círculo gris) para 0-5, 5-10 y 10-20 cm.... 78
- Figura 3.13** Regresiones lineales entre a) P_{Mac >300 μm} e ISI, b) P_{Mac >300 μm} y Soja/Cultivos, c) P_{Mac >300 μm} e ISI_{agr} para la profundidad 0-5 cm. d) D_{moda} e ISI y e) D_{moda} y Años SD para la profundidad 5-10 cm. 83
- Figura 3.14** Regresiones lineales entre a) P_{Mac >300 μm} y COP_g, b) P_{Mac >1000 μm} y COP_g, c) D_{moda} y COP_g y d) DE y CH_s. P_{Mac >300 y >1000 μm}: Macroporosidad mayor a 300 y 1000 μm respectivamente. 88
- Figura 3.15** a y b) Capacidad de campo (CC), c y d) Capacidad de agua disponible (CAD), e y f) Capacidad de aire (CA) y g y h) Capacidad de campo relativa (CCR) para la interacción suelo (Haplustol, Argiudol -Monte Buey, Argiudol -Pergamino y Hapludert) y tratamiento el Ambiente natural (AN - círculo negro), Buenas prácticas (BP - círculo blanco) y Malas prácticas (MP - círculo gris) (a, c, e y g) y la interacción suelo*profundidad (0-5 cm, 5-10 y 10-20 cm) (b, d, f y h). 94
- Figura 3.16** Humedad gravimétrica (%) para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm para a) Haplustol, b) Argiudol (Monte Buey), c) Argiudol (Pergamino) y d) Hapludert para Ambiente natural (verde), Buenas prácticas (azul) y Malas prácticas (rojo). 95
- Figura 3.17** Regresiones lineales para 5-10 cm entre a) CA e ISI y b) CA e ISI_{agr}. CA 97
- Figura 3.18** Regresiones lineales entre a) CA y COP_g, b) CA y CH_s. 100
- Figura 4.1** Escalas espaciales y metodologías a utilizar para el estudio de la calidad estructural del suelo. 105
- Figura 4.2** Fotografías de los monolitos evaluados para la combinación suelo-tratamiento (Ambiente natural -AN-; Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP-). Correspondiendo a,b,c con AN, BP y MP del Haplustol; d,e,f con AN, BP y MP del Argiudol (Monte Buey); g,h,i con AN, BP y MP del Argiudol (Pergamino) y j,k,l con AN, BP y MP del Hapludert. 113
- Figura 4.3** Fotografías de agregados de 1-5 cm (Wild MZ8 Leica photomicroscope) para la combinación suelo-tratamiento (Ambiente natural -AN-; Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP-). Correspondiendo a,b,c con AN, BP y MP del Haplustol; d,e,f con AN, BP y MP del Argiudol (Monte Buey); g,h,i con AN, BP y MP del Argiudol (Pergamino) y j,k,l con AN, BP y MP del Hapludert. 114
- Figura 4.4** Fotografías de agregados de 1-5 cm (x5) (Wild MZ8 Leica photomicroscope) para la combinación suelo-tratamiento (Ambiente natural -AN-; Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -

- MP). Correspondiendo a,b,c con AN, BP y MP del Haplustol; d,e,f con AN, BP y MP del Argiudol (Monte Buey); g,h,i con AN, BP y MP del Argiudol (Pergamino) y j,k,l con AN, BP y MP del Hapludert. 114
- Figura 4.5** Fotografías de agregados de $<2\mu\text{m}$ (microscopio electrónico de barrido) para la combinación sitio-tratamientos (Ambiente natural -AN-; Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP). Correspondiendo a,b,c con AN, BP y MP del Haplustol; d,e,f con AN, BP y MP del Argiudol (Monte Buey); g,h,i con AN, BP y MP del Argiudol (Pergamino) y j,k,l con AN, BP y MP del Hapludert. 115
- Figura 4.6** Índice calidad visual (Icv) para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tres manejos evaluados: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). 116
- Figura 4.7** a) Porosidad visible de agregados expresados como diámetro medio de poros (μm) y (b) Redondez para los suelos evaluados, Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para, Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). 117
- Figura 4.8** a) Número de caras de agregados y b) Número de vértices de agregados correspondientes al modelo mixto simplificado para los tres manejos evaluados (Ambiente natural – AN, Buenas prácticas – BP y Malas prácticas – MP). 118
- Figura 4.9** a) Cortes delgados correspondiente al suelo Haplustol; a) Ambiente natural 0-5 cm, b) Buenas prácticas 0-5 cm, c) Buenas prácticas 5-10 cm, d) Malas prácticas 0-5 cm, e) Malas prácticas 5-10 cm. 133
- Figura 4.10** a) Cortes delgados correspondiente al suelo Argiudol (Monte Buey); a) Ambiente natural 0-5 cm, b) Buenas prácticas 0-5 cm, c) Buenas prácticas 5-10 cm, d) Malas prácticas 0-5 cm, e) Malas prácticas 5-10 cm. 134
- Figura 4.11** a) Cortes delgado correspondiente al suelo Argiudol (Pergamino); Ambiente natural 0-5 cm, b) Ambiente natural 0-5 cm, c) Buenas prácticas 0-5 cm, d) Buenas prácticas 5-10 cm, e) Malas prácticas 5-10 cm. 1365
- Figura 4.12** a) Cortes delgado correspondiente al suelo Hapludert; a) Ambiente natural 0-5 cm, b) Malas prácticas 5-10 cm. 136
- Figura 4.13** Estabilidad estructural (diámetro medio ponderado - DMP) para el modelo mixto (variable aleatoria bloque y tipo de suelo) según la metodología de Le Bissonnais (1996) para los tests: humedecimiento rápido 10 s ($\text{DMP}_{\text{rap } 10\text{s}}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}) y humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}), para los tratamientos de manejo: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP), Malas prácticas (MP). 142
- Figura 4.14** Regresiones lineales entre el diámetro medio ponderado promedio de los tests: humedecimiento rápido, agitado y humedecimiento por capilaridad ($\text{DMP}_{\text{rap,ag,cap}}$) y a) CP1_manejo, b) Soja como único cultivos (Soja único cult.), c) Índice de intensificación del cultivo (ISI) y d) Índice de intensificación de cultivos agrícolas (ISI_{agr}). 148
- Figura 4.15** Regresiones lineales entre el diámetro medio ponderado promedio de los tests humedecimiento rápido, agitado y humedecimiento por capilaridad ($\text{DMP}_{\text{rap,ag,cap}}$) y a) carbono orgánico total (COT), b) carbono orgánico particulado grueso (COP_g) y c) carbohidratos solubles (CH_s). 149
- Figura 4.16** Regresiones lineales entre el diámetro medio ponderado (DMP) promedio de los tests humedecimiento rápido, agitado y humedecimiento por capilaridad ($\text{DMP}_{\text{rap,ag,cap}}$) y a) actividad de arcillas (AA) y b) límite líquido (LI). 150
- Figura 4.17** Regresiones lineales entre la humedad gravimétrica (Θ grav.) medida a campo y los diferentes tests de estabilidad estructural. a) humedecimiento rápido 10 s ($\text{DMP}_{\text{rap } 10\text{s}}$); b) humedecimiento rápido (DMP_{rap}), c) agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}); d) humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}). 151

ANEXO

Tabla A.1 Correlación de Pearson entre las variables composicionales evaluadas. No se presentan las determinaciones de hierro.....	183
Tabla A.2 Correlación (Pearson) entre las variables medidas mediante la curva de contracción de agregados (1-5 cm).....	184
Tabla A.3 Correlaciones (Pearson) entre la densidad aparente (DAP) y la resistencia a la penetración ($RP_{corr \theta}$) y las propiedades del suelo, fracciones de carbono orgánico y estabilidad estructural para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm.....	185
Tabla A.4 Correlaciones (Pearson) entre la porosidad total (PT), la porosidad estructural (Pestr) y la porosidad textural (Ptx) y las propiedades del suelo, fracciones de carbono orgánico y estabilidad estructural para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm.....	186
Tabla A.5 Valores promedio de las variables de tamaño de poros (P_{Mac} : Macroporosidad para >1000 , 300 y 50 μm y P_{Mic} : Microporosidad para $<50 \mu m$ para los tratamientos Ambiente Natural (AN), Buenas Prácticas (BP) y Malas Prácticas (MP) para las para los suelos, Haplustol, Argiudol – Monte Buey -, Argiudol -Pergamino- y Hapludert, para cada profundidad evaluada, 0-5, 5-10 y 10-20 cm.....	187
Tabla A.6 Características micromorfológicas de la masa basal de los cuatro suelos estudiados.....	188
Tabla A.7 Síntesis de las características microestructurales de los tratamientos AN, BP y MP de a) Haplustol, b) Argiudol (Monte Buey), c) Argiudol (Pergamino) y d) Hapludert.....	189
Tabla A.8 Correlaciones entre tests de estabilidad estructural según la metodología de Le Bissonnais (1996). Humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}), humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}) y para el promedio de DMP_{rap} , DMP_{ag} y DMP_{cap} ($DMP_{rap,ag,cap}$).....	193
Tabla A.9 Autovectores correspondientes al análisis de componentes principales. La significancia corresponde al análisis de correlación efectuado entre los componentes principales y cada variable. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$	194
Figura A.1 Difractogramas de muestras de la fracción arcilla, naturales y orientadas de los cuatro suelos evaluados a) Haplustol, b) Argiudol Monte Buey, c) Argiudol (Pergamino) y d) Hapludert para los tres tratamientos, Ambiente Natural (verde), Buenas Prácticas (azul) y Malas Prácticas (rojo) para el subsitio 1.....	195
Figura A.2 Ejemplo de pre-tratamientos utilizados para la identificación de los minerales de arcilla para dos muestras contrastantes encontradas en esta tesis, (a) Ambiente natural del Haplustol, b) Ambiente natural del Hapludert.....	196
Figura A.3 Difractogramas de la composición mineralógica de la muestra total del suelo, a) Haplustol, b) Argiudol (Monte Buey), c) Argiudol (Pergamino) y d) Hapludert.....	197
Figura A.4 Regresión lineal entre la resistencia a la penetración (RP) y la humedad gravimétrica (Θ_{grav} %) para todos los estratos para la corrección de la RP; a) Argiudol (Monte Buey), b) Argiudol (Pergamino) y c) Hapludert. El suelo Haplustol no necesitó ser corregido ya que no se encontraron relaciones entre la RP y la humedad.....	198
Figura A.5 Distribución volumétrica de poros (normalizada) para el manejo Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para los suelos, (a) Haplustol, b) Argiudol – Monte Buey -,c) Argiudol -Pergamino y d) Hapludert, para cada profundidad evaluada, 0-5, 5-10 y 10-20 cm.....	199

Apéndice 1

Tabla 1. Hidrofobicidad del suelo (HS_{WDPT}) para el muestreo verano e invierno y secado da agregados al airey estufa 50°C para la el suelo Haplustol, Argiudol (Pergamino), Hapludert y Argiudol (Monte Buey) y los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas)	206
Tabla 2. Análisis de modelo mixto para los efectos fijos, tratamientos de manejo, fecha de muestreo y temperatura de secado sobre la hidrofobicidad del suelo por el método de WDPT (Water Drop Penetration Time)..	207
Tabla 3. Correlación de Pearson entre la hidrofobicidad del suelo medida por WDPT y las variables de manejo.	209
Tabla 4. Correlación de Pearson entre la hidrofobicidad del suelo medida por WDPT y las propiedades del suelo.	2011
Figura 1. Valores promedios de la hidrofobicidad de todos los suelos evaluados (HS_{WDPT}) para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para los muestreos de verano e invierno.	207
Figura 2. Precipitación mensual (mm) para el muestreo de verano (MV) e invierno (MI) para a) Haplustol, b) Argiudol (Pergamino) y c) Hapludert.	2012

Apéndice 2

Tabla 1. Resultados de los ensayos de simulación de lluvias para los tres suelos evaluados para cada tratamiento (AN: Ambiente Natural, BP: Buenas prácticas y MP: Malas prácticas).....	226
Tabla 2. Correlación de Pearson entre I_b (infiltración básica), Esc.1h (volumen de escurrimiento en 1 hora), Psuelo (pérdida de suelo), T.IN.Esc (tiempo inicio del escurrimiento), T.Est.Esc (tiempo de estabilización del escurrimiento), T.Pred.Inf (tiempo de predominio de la infiltración) y las variables de manejo, compactación y porosidad, tamaño y distribución estadística de tamaño de poros, de almacenamiento de agua, fracciones de carbono orgánico y estabilidad estructural.....	228
Figura 1. Conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) para los distintos suelos evaluados (Haplustol, Argiudol- Monte Buey, Argiudol -Pergamino y Hapludert) para los tratamientos de manejo, Ambiente natural (círculo negro), Buenas prácticas (círculo blanco) y Malas prácticas (círculo gris)	227
Figura A.II.1. a) Descripción del microsimulador de lluvias; b y c) Detalle del microsimulador en funcionamiento.	236
Figura A.II.2. Ejemplo de repeticiones de simulaciones de lluvia.....	236
Figura A.II.3 a) Parcela del microsimulador con remoción de rastrojo; b) Parcela del microsimulador de AN y c) Ejemplo de grietas en parcela del Hapludert.....	236

Lista de abreviaturas

AA	Actividad de arcilla	LC	Labranza convencional
ACP	Análisis de componentes principales	LI	Límite líquido
AN	Ambiente natural	Lp	Límite plástico
BP	Buenas prácticas	M	Mica
C/F	Cuarzo/feldespato	MB	Monte Buey
CA	Capacidad de aire	MO	Materia orgánica
CAD	Capacidad de agua disponible	MP	Malas prácticas
CC	Capacidad de campo	Perg	Pergamino
CCR	Capacidad de campo relativa	P _{estr}	Porosidad estructural
CE	Conductividad eléctrica	P _{Mac<50 μm}	Porosidad macroporos menor a 50 μm
CH _s	Carbohidratos solubles	P _{Mac>1000 μm}	Porosidad macroporos mayor a 1000 μm
CIC	Capacidad de intercambio catiónico	P _{Mac>300 μm}	Porosidad macroporos mayor a 300 μm
COP _f	Carbono orgánico particulado fino	P _{Mac>50 μm}	Porosidad macroporos mayor a 50 μm
COP _g	Carbono orgánico particulado grueso	PSI	Porcentaje de sodio intercambiable
COT	Carbono orgánico total	Psuelo	Pérdida de suelo
Cvc	Calificación visual a campo de la estructura	PT	Porosidad Total
DAP	Densidad aparente	P _{tx}	Porosidad textural
DE	Dispersión estándar	Rd	Redondez
D _{media}	Diámetro de la media de poros	RP	Resistencia a la penetración
D _{mediana}	Diámetro de la mediana de poros	RP _{corr θ}	Resistencia a la penetración corregido por la humedad
D _{moda}	Diámetro de la moda de poros	SD	Siembra directa
E/I+E	Esmectita/illita+esmeclita	SH	Sin Hapludert
Ecc	Excentricidad	T.IN.Esc	Tiempo inicio del escurrimiento
Esc.1h	Volumen de escurrimiento en 1 hora	T. Est.	Tiempo de estabilización del escurrimiento
HE	Humedad equivalente	Esc.	Tiempo de predominio de la infiltración
HS	Hidrofobicidad subcrítica	T.Pred.Inf	Tiempo de predominio de la infiltración
Ib	Infiltración básica	TS	Todos los suelos
Ip	Índice plástico	V _{max}	Volumen máximo
ISI	Índice de intensificación	V _{min}	Volumen mínimo
ISI _{agr}	Índice de intensificación de la secuencia agrícola	θ _{grav}	Humedad gravimétrica
Ivc	Índice visual a campo	θ _{max}	Humedad gravimétrica máxima
LBD	Limos de baja densidad	Δvol	Diferencia entre volumen máximo y mínimo

Resumen

La siembra directa es actualmente la práctica agronómica más importante en la región pampeana. Sin embargo aún existen numerosos interrogantes relacionados con la misma, tales como el efecto de la ausencia de remoción del suelo o el efecto del monocultivo o de la intensificación agrícola en el comportamiento de las variables hidrofísicas y estructurales del suelo. A partir del análisis de tres tratamientos ("Malas prácticas" en siembra directa, "Buenas prácticas" en siembra directa y "Ambiente natural" de referencia) en distintos suelos de la Región Pampeana dentro de un importante gradiente textural y mineralógico (un Haplustol y un Argiudol en la Prov. de Córdoba, un Argiudol en la Prov. de Buenos Aires y un Hapludert en Entre Ríos), se ha logrado detectar diversos indicadores que permiten explicar de forma satisfactoria las diferencias entre tratamientos para todos los suelos estudiados. Las mismas fueron: densidad aparente (0-20 cm), macroporosidad mayor a 300 μm (0-5 cm), tamaño de poro más frecuente, capacidad de aire, índice de calidad visual, porosidad visible y diámetro medio ponderado para el test de humectación rápida en el ensayo de estabilidad de agregados. Así se concluyó que una mayor intensificación agrícola, con secuencias de cultivo con más maíz y cultivos de invierno, mejoró las condiciones estructurales en todos los suelos, mientras que los suelos con menor resiliencia presentaron condiciones físicas menos favorables como por ejemplo aumentos en la densidad aparente. Esto quedó evidenciado muy claramente a través de las características porales, estructurales y los rasgos biológicos revelados por los análisis micromorfológicos. En esta Tesis queda demostrado que los efectos positivos o negativos de la SD sobre la condición del suelo dependen de una compleja interrelación entre tipo de suelo y las prácticas de manejo, sujetas a un equilibrio dinámico entre los efectos de densificación producidas por el tránsito y de reestructuración producidos por la actividad biológica. Además, se concluye que el uso y elaboración de indicadores de calidad física deben estar siempre referidos al tipo de suelo analizado, o al menos se debe contar con información composicional adecuada para la correcta interpretación de los mismos.

Palabras clave: Molisoles; Vertisoles; siembra directa; indicadores de calidad de suelos; porosidad del suelo.

Abstract

No-tillage is the main agricultural management in the Pampas region. However there are still many questions related to this practice, such as the effect of the absence of soil disturbance, the effect of monoculture or the agricultural intensification on the behavior of soil hydro-physical and structural variables. From the analysis of three treatments (“Bad practices” and “Good practices under no tillage management and “Natural environment” as reference) in different soils of the Pampas within an important textural and mineralogical gradient (one Haplustol and Argiudol in Cordoba province, an Argiudol in Buenos Aires province and a Hapludert in Entre Ríos province) it has been detected various indicators to satisfactorily explain the differences between treatments for all soils studied. They were: DAP (0-20 cm) bulk density, P_{Mac}> 300 (0-5 cm) greater than 300 μ m macroporosity, D_{moda}: most frequent pore size, CA: air capacity, I_{cv} visual quality index, P_v: visible porosity and DMPrap: weighted mean diameter for fast wetting test in testing aggregate stability. Thus it was concluded that increased agricultural intensification, with crop sequences with more corn and winter crops, improved structural conditions in all soils, while soils with lower resilience had less favorable physical conditions reflected in high DAP. This was clearly evidenced through pore and structure characteristics and biological features revealed by micromorphological analysis. This thesis demonstrated that the positive or negative effects of SD on soil condition depend on a complex interaction between soil type and management practices, modulated by the balance between the effects of densification produced by transit and the benefits in structural reorganization promoted by biological activity. Moreover, this thesis suggest that use and elaboration of soil physical quality indicators must be always refered to the soil type evaluated, or at least adequate composicional information must be gather in order to achieve correct interpretation of those indicators.

Key words: Mollisols; Vertisols; no-tillage; soil quality indicators; soil porosity.

Capítulo 1
INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

1.1.1 Propiedades edáficas bajo siembra directa

Actualmente en la Argentina la mayor parte de los cultivos agrícolas extensivos se efectúan bajo el sistema de siembra directa (SD). Más de 27 millones de hectáreas se cultivan con este sistema y se considera que la mayor parte de la soja (15 millones) y casi la mitad de los cereales son producidos utilizando SD (Wall, 2011). Esto corresponde al 75% del área cultivada en Argentina (AAPRESID, 2012) y hace 30 años que su adopción lleva un crecimiento sin pausa (Viglizzo et al., 2011). Entre los beneficios ciertos del sistema están la reducción de los riesgos de erosión del suelo así como un menor costo de la producción agrícola. Además, numerosos trabajos, demuestran que este sistema promueve la conservación del contenido de carbono orgánico y el aumento de la estabilidad estructural (Derpsch et al., 2010), mejorando de esta manera la capacidad de captación del agua para los cultivos.

Por otra parte, es evidente que las condiciones del suelo en este sistema de cultivo son diferentes de las existentes en los suelos cultivados con labranzas. Diversos análisis físicos de campo y de laboratorio se han utilizado para evaluar el suelo en SD, en muchos casos comparando con el estado del suelo bajo otros sistemas de labranza, o comparando con un testigo sin cultivar; frecuentemente se han utilizado algunos parámetros relacionados con la estructura tales como la densidad aparente (Lal et al., 1994; Taboada et al., 1998; Morrás et al., 2001; Alvarez et al., 2009), la resistencia a la penetración (Bauder et al., 1981; Chagas et al., 1994; Morrás et al., 2001; Alvarez et al., 2009) o la porosidad (Ferrerías et al., 2000), y otros relacionados con la dinámica del agua, tales como la infiltración y la permeabilidad (Heard et al., 1988; Chagas et al., 2004; Alvarez et al., 2009). Una conclusión general, de la literatura encontrada en sistemas bajo SD es que no todas las propiedades del suelo se recuperan y/o evolucionan favorablemente bajo agricultura continua en SD (Andriulo y Cardone, 1998; Díaz-Zorita et al., 2002; Micucci y Taboada, 2006; Sasal et al., 2006; Alvarez et al., 2009, 2014).

Una característica común observada en sistemas bajo SD ha sido el mayor contenido de MO de la capa superficial de este sistema en comparación con sistemas bajo labranzas de tipo convencional (Alvarez et al., 1995; Bonel et al., 2005). Este incremento se debería a la concentración de residuos en superficie y por otro lado al hecho que en SD el proceso de degradación de la MO puede ser menor. Sin embargo, en otros casos no se han observado diferencias de MO en el suelo respecto a los cultivos laboreados (Quiroga et al., 1998; Bonel et al., 2005).

En general, se ha observado en sistemas bajo SD una mayor consolidación o compactación. La densidad aparente y la resistencia a la penetración son usualmente mayores que en la tierra arada (Gregorich et al., 1993; Quiroga et al., 1998; Vidal y Costa, 2000). Es así que en general, se ha concluido que la conversión del cultivo a sistemas de SD causa una reducción en el volumen total de poros en el perfil de suelo. A pesar de la mayor densidad y menor porosidad total, en muchos casos la penetración de agua es igual o mayor que en la labranza convencional (Bauder et al., 1981; Morrás et al., 2001). Algunos autores atribuyen esto a una mayor estabilidad de la estructura en SD que da lugar a macroporos más estables y con mayor interconexión entre sí, en tanto otros autores (Zacagnini y Calamari, 2001) lo relacionan con la actividad de la fauna: en SD habría una mayor actividad biológica evidenciable claramente en la macrofauna,

especialmente lombrices, generando una red de poros más continua. Sin embargo, en otros casos no se ha observado aumento de la bioporosidad.

De lo referido surge que el sistema de SD modifica diversos parámetros físicos y biológicos de los suelos, aún cuando los antecedentes indican que los cambios que se producen son diversos y en algunos aspectos divergentes. Estas diferencias y aún discordancias pueden hallarse relacionadas tanto con las características propias de los suelos, como con el estado de los mismos derivado de su historia de manejo. Sin embargo todavía sigue sin comprenderse cabalmente cuáles son los factores que juegan y cómo se interrelacionan para generar los diversos resultados observados en el cultivo del suelo en SD. Así, debe considerarse que los resultados diversos obtenidos con este sistema de cultivo son una consecuencia de una nueva organización de los componentes edáficos, y que los parámetros físicos y biológicos analizados habitualmente para evaluar la SD se integran y se reflejan en una característica conspicua que es la morfología del suelo. Algunos trabajos han dado cuenta de los aspectos macromorfológicos del suelo en SD (Shipitalo y Protz, 1987; Sasal et al., 2004, 2006). Sin embargo las características microestructurales recién han comenzado a estudiarse localmente (Morrás et al., 2004; Bonel et al., 2005; Morrás y Bonel, 2005). La técnica micromorfológica se presenta así como una herramienta sumamente interesante para analizar las características estructurales e interpretar las transformaciones edáficas del suelo derivadas del cultivo sin labranza.

Un aspecto que no se ha considerado frecuentemente en los estudios de los suelos en SD es el rol que juega la composición de la fracción mineral. Diversas características físicas, químicas y fisicoquímicas de los suelos están condicionadas por la composición de sus fracciones inorgánicas. Por ejemplo, características físicas como la estructura, la porosidad, los procesos de expansión – contracción y la dinámica hídrica son notoriamente dependientes de la proporción relativa y de la composición mineral de sus fracciones finas y gruesas. Así, se ha informado que la cantidad de limos de baja densidad afecta directamente la resistencia de la ruptura de un agregado (Cosentino y Pecorari, 2002). También, distintas cantidades y tipos de arcillas pueden acarrear cambios en el número y actividad de las poblaciones microbianas (Stotzky, 1985; Kraemer et al., 2013).

Por otro lado, la composición del suelo, modifica la magnitud de su resiliencia ante procesos degradatorios y modifica los agentes que establecen la agregación y estabilización del mismo (Oades, 1993). Oades (1993) distinguió diferentes mecanismos de agregación para suelos arenosos (<15 % arcilla), limosos (15 – 35 % arcilla) y arcillosos (>35 % arcilla). Generalmente, los suelos arcillosos, principalmente los Vertisoles, con altos contenidos de minerales expansibles son muy resilientes y poseen una agregación intrínseca muy intensa. En contraposición, en los suelos arenosos, la distribución de poros está asociada al tamaño y empaquetamientos de los granos de arena, y su estructura no es afectada por los ciclos de humedecimiento y secado ya que su capacidad de expansión y contracción es muy baja. De esta forma, la agregación en dicho suelos depende de factores biológicos. Por último, la agregación de los suelos limosos depende de la intensidad de los ciclos de humedecimiento y secado, que a su vez dependen de la cantidad y tipo de arcillas. Además, el contenido de limos afecta la agregación, ya que se considera que los limos poseen una capacidad de expansión nula, lo cual disminuye la resiliencia de los suelos con esta textura (Stengel et al., 1984). Por ello, debe tenerse en cuenta también los factores bióticos en la agregación de los suelos limosos (Oades, 1993).

En consecuencia, la evaluación detallada de la granulometría y mineralogía de los suelos aportaría sin duda información rica y novedosa para la comprensión del comportamiento de los suelos cultivados en SD.

1.1.2 Intensificación agrícola y secuencia de cultivos en SD

Asociado a la incorporación del manejo bajo SD, se observó un incremento marcado del área destinada al cultivo de soja (*Glycine max* L., Merr.) (Novelli et al., 2011). El predominio del cultivo de soja representa un riesgo desde el punto de vista de la sustentabilidad, ya que su rastrojo aporta no sólo una menor cantidad de residuos al suelo (Studdert y Echeverría, 2000), sino que también poseen una baja relación C/N que favorece su descomposición. En el caso de que sea el único cultivo en la rotación (soja de primera), existe la posibilidad de que el suelo permanezca con baja cobertura durante gran parte del año (Sanford, 1982; Bathke y Blake, 1984). La efectividad de la aplicación de SD depende del tipo y cantidad de residuos que formarán el “mulch” o cobertura (Lal et al., 2007).

Como se desprende del párrafo anterior, los cambios edáficos por el uso de la tierra no sólo surgen de modificaciones del sistema de labranza aplicado, sino también de la influencia de la secuencia y el rendimiento de los cultivos implantados (Díaz Zorita et al., 2004). Si bien existen numerosos trabajos y comparaciones entre SD y LC, son escasos los trabajos que evalúan propiedades edáficas en distintos manejos bajo SD (Castiglioni et al., 2013). En este sentido, se han informado modificaciones generadas por distintas especies vegetales o por sus diferentes secuencias en la curva de retención hídrica, en la tasa de infiltración superficial y en el flujo de agua en profundidad (Dexter et al., 2001; McVay et al., 2006; Sasal et al., 2006). Recientemente Castiglioni et al. (2010) determinaron en un Argiudol vértico con una rotación trigo/soja-maíz bajo SD, mayor volumen de macroporos luego del cultivo de maíz. Restovich et al. (2010) informaron para un Argiudol típico efectos favorables a corto plazo del maíz sobre el índice de estabilidad de agregados y la macroporosidad edáfica, no perdurando los mismos más de un año. Al comparar monocultivos de maíz y soja bajo SD, Chagas et al. (1995) pudieron determinar efectos negativos de esta última especie sobre la estabilidad de la estructura superficial de un Argiudol típico con alto contenido de limo. A su vez, Brandan Pérez et al. (2010) visualizaron un efecto positivo de la secuencia de diferentes cultivos más diversificada e intensa sobre la diversidad y cantidad de poblaciones bacterianas y fúngicas del suelo.

En los últimos años, diversos índices y relaciones han sido propuestos a fin de evaluar el efecto de la secuencia de cultivos sobre las propiedades edáficas. En este sentido, puede encontrarse en la bibliografía algunos ejemplos como la relación: número de cultivos de soja en relación a los cultivos totales (Novelli et al., 2013) y años de siembra directa, como una variable clave para entender los cambios en las propiedades del suelo (Sasal, 2012). Por otro lado, el índice de intensificación de la secuencia agrícola (ISI), que es la relación entre el número de meses ocupado por cultivos en desarrollo respecto al número total de meses del año (Sasal et al., 2010), ha demostrado ser un parámetro que se vincula significativamente con el comportamiento de algunas propiedades edáficas. En este sentido, Echeverría et al. (2012) encontraron una relación positiva entre el índice de estabilidad estructural de un suelo de la provincia de Buenos Aires con un parámetro similar al ISI. Por su parte, Sasal (2012) encontró que la presencia de estructura laminar en el suelo estaba vinculada negativamente con un mayor valor de ISI. Este parámetro sintetiza información de las características de los cultivos, como la cantidad y calidad de los rastrojos aportados y el tipo y distribución de

su sistema radical (Sasal et al., 2006). Además el ISI indica el tiempo de permanencia de las raíces vivas.

Por otro lado, diversos estudios no encontraron efectos de las secuencias de cultivos sobre distintas propiedades edáficas como en la conductividad hidráulica saturada y en la densidad aparente (Sasal et al., 2010) o en cambios en la macrofauna del suelo (diversidad, riqueza y abundancia de especies), al incorporar especies de desarrollo invernal en un monocultivo de soja (De Falco et al., 2012). Esta discrepancia puede estar dada por el aumento de la presión del tránsito de maquinaria ante la intensificación agrícola, en donde se aumenta el número de pasadas y con mayor peso (Botta et al., 2007; Balbuena et al., 2009). Por ejemplo, Wilson et al. (2010) observaron mayores valores de resistencia a la penetración en la rotación trigo/soja y trigo/soja-maíz, respecto a lo sucedido en monocultivos de soja y maíz. Estos autores no atribuyeron estos resultados al efecto particular de alguna de las especies analizadas, sino al mayor número de pasadas de implementos agrícolas que ocurren en las dos primeras secuencias de cultivos mencionadas.

Lo expuesto, señala que existe una tensión de fuerzas en la intensificación agrícola, en donde ocurre una mayor presión de tránsito pero al mismo tiempo una mayor cantidad de rastros y un perfil espacial y temporal de raíces más importante. Así, como se presenta en el esquema de la Figura 1.1, el balance de esta intensificación agrícola tiene como resultante estados estructurales diferentes (medidos como calidad hidrofísica y estructural). Esa calidad depende de un contexto edáfico (composición del suelo) y del sistema de manejo, en este caso la SD. En esta figura se observa que la composición del suelo tiene un orden jerárquico mayor que el sistema de manejo “Siembra Directa” y luego ambos factores influyen la organización estructural del suelo y por ende la expresión de las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo. Por ello, a partir del conocimiento de estos factores sería posible analizar y predecir la evolución estructural de diferentes suelos.

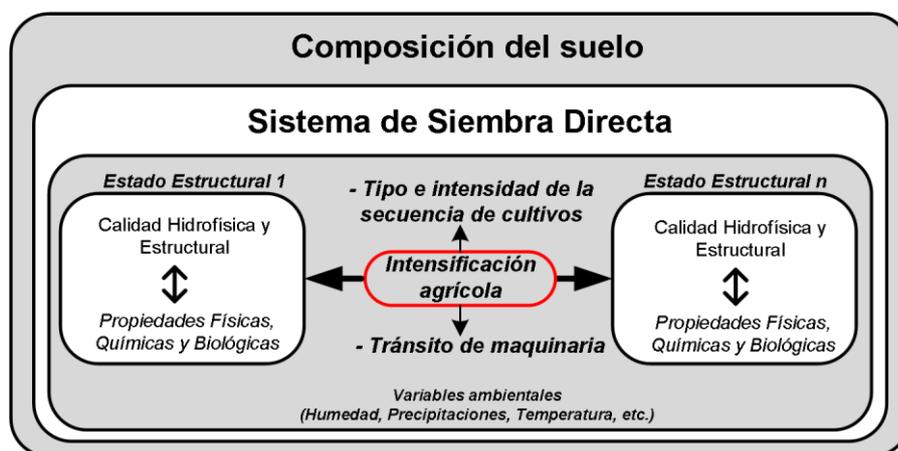


Figura 1.1 Esquema conceptual entre la intensificación agrícola, composición de suelo, siembra directa y componentes de la calidad hidrofísica y estructural bajo una secuencia de cultivo y variables ambientales en el tiempo.

A partir de este esquema se logra un conocimiento más integral de los factores que afectan la calidad del suelo y permite la evaluación de los indicadores más correctos para la evaluación de distintos manejos. Así se evaluará la calidad hidrofísica y estructural, entendiendo como calidad, al mantenimiento de las funciones productivas y ecosistémicas del suelo (Karlen, 1990) para luego estudiar su efecto sobre el movimiento de agua.

De esta forma, esta tesis propone un abordaje original para tratar de comprender la disparidad de resultados en los estudios de suelos en SD, en donde a través de una evaluación composicional precisa del suelo y de los cambios estructurales e hidrofísicos observados en diferentes escalas, se podrá evaluar algunos cambios en la calidad global de suelos con distinto nivel de intensificación agrícola y distintas secuencias de cultivos.

En consecuencia, esta tesis de doctorado permitirá ir llenando progresivamente vacíos de información, conjuntamente con la evaluación de propiedades de interés práctico para el uso y manejo de los suelos. En este sentido, como se mencionó con anterioridad, la aplicación de las técnicas micromorfológicas aunque escasa hasta el momento, se ha revelado de enorme potencial como vía de interpretación de las modificaciones de diversos parámetros edáficos, físicos y biológicos, y de su influencia en los cultivos. Se espera asimismo que la utilización de estas otras técnicas que implican análisis de detalle contribuya a entender la dinámica de los procesos y permita valorar los indicadores y métodos de diagnóstico más tradicionales utilizados en el análisis de los efectos edáficos de la SD.

1.2 Área de estudio y diseño experimental

El área de estudio, así como los suelos y manejos fueron seleccionados de forma conjunta entre científicos y productores integrantes del consorcio BIOSPAS (www.biospas.org). El BIOSPAS es un proyecto interdisciplinario, cuyo objetivo a largo plazo es la definición de indicadores ecológicos de sostenibilidad en manejos bajos SD (Wall, 2011). Debido a la dificultad para establecer réplicas estrictas de las prácticas de manejo en lotes productivos se adoptó el criterio descrito por el programa de Certificación de Buenas Prácticas Agrícolas de AAPRESID (<http://www.aapresid.org.ar/ac/buenas-practicas-agricolas>) y los lineamientos de las Buenas Prácticas Agrícolas desarrollados por la FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations) (www.fao.org/prods/GAP/index_en.htm).

Así se consideraron dos prácticas diferentes llamadas “Buenas prácticas” (BP) y “Malas prácticas” (MP). Para llevar a cabo los objetivos planteados, se trabajó en cuatro localidades (Bengolea y Monte Buey, Prov. Córdoba, Pergamino, Prov. Buenos Aires y Viale, Prov. Entre Ríos) sobre lotes con diferentes manejos en cuanto a rotación y fertilización (Tabla 1.1), El tratamiento BP se refiere a un manejo agrícola sostenible bajo SD con rotaciones agrícolas intensivas, reposición de nutrientes y mínimo uso de agroquímicos (herbicidas, insecticidas y fungicidas); MP se refiere a manejos agrícolas no sostenibles bajo SD con monoculturas, baja reposición de nutrientes y alto uso de agroquímicos. Por otro lado, a fines de comparación se evaluó en cada sitio un suelo de referencia bajo ambiente natural (AN), situados cercanos al área de estudio (menos de 5 km), donde no se ha practicado la agricultura por lo menos desde hace 30 años.

Si bien en cada tipo de suelo se seleccionaron lotes correspondientes a estas definiciones, los manejos entre los sitios no pueden considerarse rigurosamente como réplicas debidos a diferencias en su secuencia agrícola de los lotes, años bajo siembra directa, etc.. El diseño experimental de esta tesis compartido por todos los integrantes

del BIOSPAS privilegió la perspectiva de los productores en la calificación del manejo del suelo y la productividad de los cultivos para de esta forma discernir entre BP y MP.

Por ello, para comprobar dicho agrupamiento (lotes con características de BP y otros con MP) y caracterizar de forma cuantitativa el manejo de los distintos lotes evaluados, se realizó un análisis de componentes principales que integró las siguientes variables de manejo: índice de intensificación de la secuencia de cultivos (ISI), el cual es calculado teniendo en cuenta el período de ocupación de cada cultivo o secuencia de cultivos por cada año para un período considerado (Sasal, 2012). Este índice se calculó para todos los tratamientos, AN, BP y MP (ISI) y para los tratamientos agrícolas, BP y MP (ISI_{agr}); años bajo siembra directa (años SD); número de cultivos de soja respecto al total de cultivos (Soja/Cultivos) y número de cultivos de soja respecto al de maíz (Soja/Maíz) dentro del período considerado (2004-2010) (Tabla II.1).

Por otro lado no se consideró el número de años en agricultura. Esto se debió a que todos los lotes seleccionados poseían un historial de muchos años en el uso de la tierra y porque no se disponían de datos fidedignos para obtener un número de años certero. El único lote que se presume que podría tener un número menor de años bajo agricultura es el BP del Hapludert, el cual fue puesto en producción agrícola continua con el avenimiento de la SD a fines de los años ochenta.

Tabla 1.1 Secuencias de cultivos, características de manejo y rendimientos de los tratamientos de Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para los sitios de Bengolea, Monte Buey, Pergamino y Viale para el período 2004 - 2010.

<i>Sitio/ Periodo</i>	Bengolea		Monte Buey		Pergamino		Viale	
	<i>BP</i>	<i>MP</i>	<i>BP</i>	<i>MP</i>	<i>BP</i>	<i>MP</i>	<i>BP</i>	<i>MP</i>
2004/2005	Trigo/soja	Maní	Trigo/ Sorgo	Soja de 1°	Soja de 1°	Soja de 1°	Trigo/soja	Maíz
2005/2006	Maíz	Trigo/soja	Maíz	Trigo/ Soja	Trigo/soja	Soja de 1°	M [†] +RG/Maíz	Soja de 1°
2006/2007	Trigo/soja	Soja de 1°	Trigo/ Soja	Maíz	Maíz	Soja de 1°	Soja de 1°	Trigo/soja
2007/2008	Vicia/maíz	Trigo/soja	Vicia/Maíz-Soja	Soja de 1°	Soja de 1°	Soja de 1°	Trigo/soja	Maíz
2008/2009	Trigo/soja	Soja de 1°	Maíz	Soja de 1°	Trigo/soja	Soja de 1°	Maíz	Soja de 1°
2009/2010	Soja de 1°	Soja de 1°	Trigo/ Soja	Soja de 1°	Maíz	Soja de 1°	Soja de 1°	Soja de 1°
Años bajo SD	13	5	28	10	6	5	13	9
soja único cult. (%)	17	50	0	66	33	100	33	50
ISI ^a	0,67	0,53	0,64	0,49	0,56	0,42	0,59	0,5
Soja/Cultivos ^b	0,40	0,62	0,28	0,75	0,5	1,0	0,44	0,57
Maiz/Cultivos	0,20	0	0,30	0,14	0,25	0	0,22	0,28
Soja/Maíz ^c	4	5	1	5	2	6	2	2
Inviernos con CC (%) ^d	20	0	40	0	0	0	20	0
Herbicida utilizado (L) ^e	27,7	43,8	25,2	38,9	29,3	46,5	34,5	43,1
Rendimiento Soja (kg ha ⁻¹) ^f	3067	2775	3167	2675	2933	2825	3000	1805
Rendimiento Maíz (kg ha ⁻¹)	10500	-	12550	8000	9500	-	7030	3450

^aRelación entre el n° meses ocupado por cultivos/ total de meses por año ^bN° cultivos de soja / cultivos totales ^cN° cultivos de soja / N° cultivos de maíz ^d% de inviernos con cultivos de cobertura ^eCalculado como litros de herbicidas de baja toxicidad más litros de herbicidas de alta toxicidad ponderado por dos. La toxicidad fue definido de acuerdo a las categorías de toxicidad de EPA (Figuerola et al., 2012)

^f Rendimientos del último cultivo de soja y maíz correspondiente a lapso evaluado.

[†]Melilotus + Raygrass

1.2.1 Asignación de tratamientos. Buenas y malas prácticas.

Los primeros dos ejes del análisis de componentes principales (ACP) de las variables de manejo fueron responsables de 91,7% de la variabilidad total. El primer componente (CP1_manejo) explicó un 78% de la variabilidad contabilizando las principales diferencias de manejo entre los tratamientos de forma muy balanceada (escores muy parecidos) (Tabla 1.2), mientras que en el segundo eje, los años bajo SD y las variables de manejo que incluyen al maíz tiene un peso superior al resto de las variables (Tabla 1.2). Mediante el CP1 se logró separar los distintos lotes en dos grupos Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) con una representación balanceada de los sitios (tipo de suelos) en cada grupo. De esta forma, de acuerdo a la Figura 1.2 el tratamiento de BP cuenta con una sucesión de cultivos más equilibrada (presencia de gramíneas y leguminosas), presenta más tiempo de ocupación de la tierra (ISI) y más años bajo SD, mientras que MP se correspondieron con lotes con menos años bajo SD con preponderancia de soja en la sucesión de cultivos y menor tiempo de ocupación de la tierra y menor cantidad de raíces vivas por año (Tabla 1.1, 1.2). Sin embargo como se puede observar en la Figura 1.2 los dos grupos no se concentran tan definidamente, presentándose más un gradiente de manejos, desde lotes con menos años bajo SD y gran porcentaje de soja en la rotación, hasta situaciones con muchos años bajo SD y mayor tiempo de ocupación del suelo por año (base mensual). Es decir, se trata de un gradiente de intensificación agrícola, donde BP se puede relacionar con sistemas más intensificados y MP con sistemas menos intensificados.

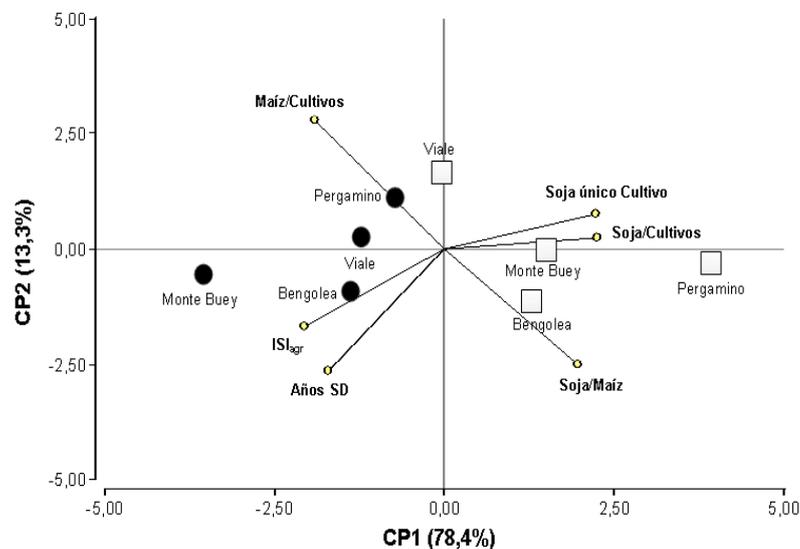


Figura 1.2 Scores sobre el primer (CP1) y segundo eje (CP2) del análisis de componentes principales. ISI_{agr} (Índice de intensificación de la secuencia agrícola), años bajo SD (números de años bajo siembra directa), Soja/Cultivos (relación del número de cultivos de soja sobre el total de los cultivos del período), Maíz/Cultivos (relación del número de cultivos de maíz sobre el total de los cultivos del período), Soja/Maíz (relación del número de cultivos de soja sobre el total de los cultivos de maíz de período) y Soja único cultivo (años de cultivo de soja como único cultivo anual). ● Corresponde a Buenas prácticas mientras que □ corresponde a MP. Debajo de ambos ejes principales se presentan entre paréntesis los autovectores.

Tabla 1.2 Peso de los las variables de manejo para el primer y segundo componente principal (CP1, CP2). ISI_{agr} (Índice de Intensificación de la secuencia agrícola), años bajo SD (números de años bajo siembra directa), Soja/Cultivos (relación del número de cultivos de soja sobre el total de los cultivos del período), Maíz/Cultivos (relación del número de cultivos de maíz sobre el total de los cultivos del período), Soja/Maíz (relación del número de cultivos de soja sobre el total de los cultivos de maíz de período) y Soja único cultivo (años de cultivo de soja como único cultivo anual).

Variables	CP1	CP2
ISI_{agr}	-0,42	-0,34
Años bajo SD	-0,34	-0,54
Soja/Cultivos	0,45	0,05
Soja/Maíz	0,40	-0,50
Maíz/Cultivos	-0,38	0,56
Soja único cultivo	0,45	0,15

Los tratamientos de manejo fueron replicados en cuatro sitios con suelos contrastantes localizados en una transecta de oeste a este en la región pampeana norte: Haplustol en Bengolea (33° 01' 31" S; 63° 37' 53" O), Argiudol en Monte Buey (32° 58' 14" S; 62° 27' 06" O), Argiudol en Pergamino (33° 56' 36" S; 60° 33' 57" O) y Hapludert en Viale (31° 52' 59,6" S; 59° 40' 07" O). La precipitación anual disminuye hacia el oeste (1023 mm a 795 mm) y varía con la estación, estando concentrada en la primavera y en el verano. Por su parte la temperatura decrece de norte a sur (18,0 °C a 16,3 °C) Servicio Meteorológico Nacional, <http://www.smn.gov.ar>, consultado Noviembre 2012) (Tabla 1.3). La composición granulométrica también presenta una variación a lo largo de la transecta, incrementándose el contenido de arcilla de oeste a este (INTA, 1974-1997).

El Haplustol (Bengolea) pertenece a la serie General Cabrera (GC) (INTA, 1974-1997) se encuentra ubicado en el Pedemonte pampeano, donde el régimen de humedad es ústico, posee una textura franco arenosa y las arenas y limos fluviales son encontrados en conjunto con sedimentos loésicos. El Argiudol estudiado en Monte Buey (serie Monte Buey) (INTA, 1974-1997) se encuentra en un área de baja pendiente en el límite entre el Piedemonte de las sierras de Córdoba y la Pampa Ondulada, posee una textura franco limosa y un desarrollo moderado de un horizonte Bt. El Argiudol (Serie Pergamino) (INTA, 1974-1997) evaluado en Pergamino está localizado en la Pampa Ondulada donde las redes de drenaje son bien definidas y el relieve es levemente ondulado (gradientes de hasta 5%). Este suelo es de textura franco limosa con un Bt bien desarrollado, representativo de la Pampa Ondulada. En este sitio las precipitaciones son levemente superiores con respecto al sitio anterior (Tabla 1.3). Por último, los tratamientos sobre los Hapludert, serie Santiago (arcillo limoso) están localizados en la Mesopotamia, al sur de la provincia de Entre Ríos (Viale) donde el sistema de drenaje está fuertemente desarrollado y con un paisaje ondulado, con pendientes algo mayores que el sitio de Pergamino. En cada tipo de suelo, cada tratamiento fue muestreado en tres subsitios diferentes (1,2,3) con un distanciamiento entre si de al menos 50 mts entre cada subsitio.

Tabla 1.3 Características climáticas y fisiográficas de los sitios (Haplustol, Argiudol -Monte Buey-, Argiudol -Pergamino- y Hapludert) y tratamientos de manejo (Ambiente natural -AN-, Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP-).

	<i>Haplustol</i>			<i>Argiudol (Monte Buey)</i>			<i>Argiudol (Pergamino)</i>			<i>Hapludert</i>		
	<i>AN</i>	<i>BP</i>	<i>MP</i>	<i>AN</i>	<i>BP</i>	<i>MP</i>	<i>AN</i>	<i>BP</i>	<i>MP</i>	<i>AN</i>	<i>BP</i>	<i>MP</i>
Clima	Templado Subhúmedo			Templado Subhúmedo			Templado húmedo			Templado húmedo		
Temperatura Media Anual (°C)	17			17			16			18		
Precipitación media anual (mm)	870			910			1000			1160		
Altitud (m)	224	222	223	112	111	108	64	68	65	73	80	81
Pendiente promedio (%)	0,5	0,75	0,5	0,01	0,5	0,2	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75	0,2

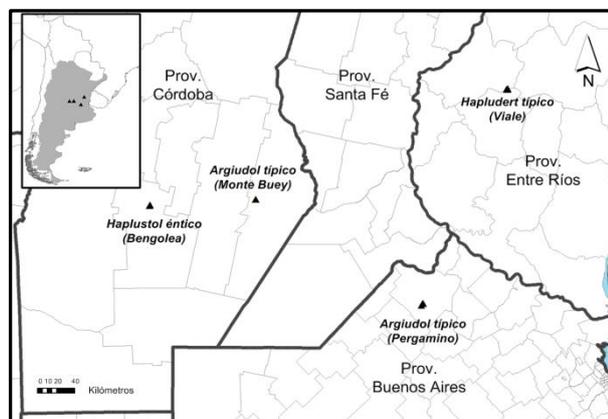


Figura 1.3 Mapa de localización de los sitios bajo estudio.

El muestreo de los sitios efectuado por el conjunto de los grupos de investigación asociados al BIOSPAS se llevó a cabo en dos veranos (Enero-Febrero) y en dos inviernos (Julio-Agosto). Sin embargo para esta tesis, se decidió concentrar la mayoría de los muestreos y ensayos a campo en invierno donde las condiciones físicas y químicas son más estables y reflejan de forma más global los cambios edáficos ocurridos según la rotación y los manejos de cada tratamiento.

1.3.1 Objetivo General

- El objetivo general de la tesis es evaluar la calidad estructural e hidrofísica de suelos con diferente composición granulométrica y mineralógica en manejos bajo SD con diferentes niveles de intensificación agrícola.

1.3.2 Hipótesis Generales

1. I - Una mayor intensificación agrícola con una secuencia de cultivos más diversificada mejora la calidad estructural e hidrofísica a diferentes escalas de organización.

1. II - Si bien la intensificación conlleva un mayor tránsito su efecto negativo no se ve reflejado en el estado estructural e hidrofísico del suelo.

1. III - Indicadores de calidad de suelo relacionados a la porosidad son los que permiten diferenciar entre manejos agrícolas independientemente del tipo de suelo.

1.4 Organización de la Tesis

La tesis se organiza con un capítulo de introducción, luego tres capítulos de resultados: en el capítulo 2 se realizaron análisis específicos de la composición mineral mientras que en los capítulos 3 y 4 se evaluaron la calidad hidrofísica y calidad estructural respectivamente. Estos dos capítulos fueron reanalizados a la luz de los datos surgidos del capítulo 2. Finalmente se realizó un capítulo de conclusiones generales (capítulo 5). Además se incluyen dos apéndices en donde se discute el efecto de la hidrofobicidad sobre la estabilidad estructural (Apéndice 1) y se analiza el movimiento hidrológico del suelo en relación a los hallazgos de esta tesis (Apéndice 2).

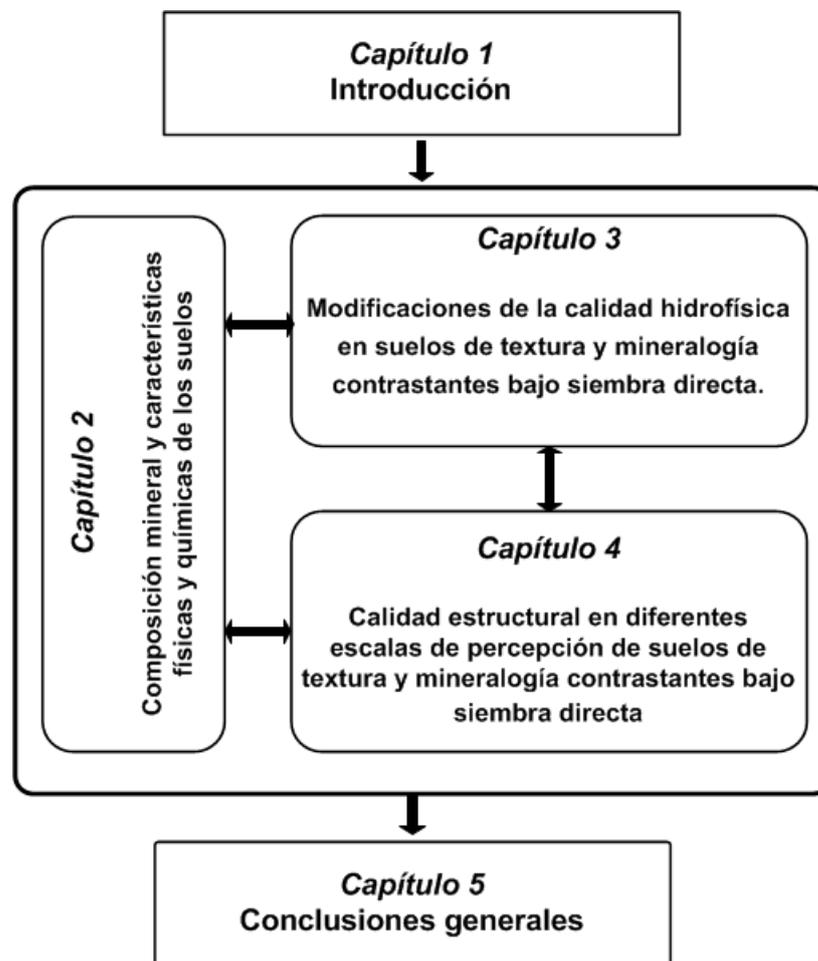


Figura 1.4 Organización de la tesis.

Capítulo 2

**COMPOSICIÓN MINERAL Y CARACTERÍSTICAS
FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS BAJO
ESTUDIO**

2.1 Introducción

La composición mineral del suelo en sus diversas fracciones granulométricas y mineralógicas juegan roles determinantes en el comportamiento químico, físico y biológico del mismo, y por ende influyen fuertemente en la calidad hidrofísica y en la formación y mantenimiento de micro-ambientes edáficos. Por ejemplo, distintos constituyentes del suelo como las arcillas, compuestos de hierro, de calcio y distintas fracciones orgánicas pueden afectar la agregación y estabilidad del suelo (Le Bissonnais, 1996; Malley et al., 2004; Cañasveras et al., 2009), la estructuración y morfología de agregados (Morrás et al., 1999; Cooper et al., 2005) y diversas variables físicas, como la densidad aparente y la conductividad hidráulica saturada (Ferreira et al., 1999).

2.1.1 Fracción arcilla

Un aspecto sumamente importante a considerar en la relación entre la composición y el comportamiento del suelo es la influencia de las arcillas en la retención de agua. Esta es una de las propiedades edáficas más importantes en la agricultura ya que influye en el crecimiento de las plantas, la aireación, su temperatura, drenaje, riego y traficabilidad (Puckett et al., 1985). La dependencia de la retención de agua de distintos parámetros del suelo es compleja y depende en gran medida de las fracciones minerales y orgánicas del mismo. La geometría irregular de poros, su discontinuidad y las variaciones en textura y mineralogía son las principales características de los suelos que influyen en su capacidad de retención de agua (Rawls et al. 1991). La importancia relativa de éstos está asociada al rango de potencial mátrico involucrado (Pachepsky et al., 1996). La cantidad de agua retenida en potenciales menores a -1500 kPa es función de parámetros que afectan la superficie específica siendo los más importantes, la textura, el contenido de materia orgánica y la mineralogía de las arcillas (Rawls et al., 1991) mientras que a altos potenciales (mayores a -10 kPa) la retención está relacionada fundamentalmente con la densidad aparente, la porosidad y la estructura. Baumer y Brasher (1982) mencionan que con contenidos de arcilla en el suelo superiores al 10%, la mineralogía de estas, se convierten en una variable importante a tener en cuenta en la predicción de la retención de agua. Así, mientras que las estructuras 2:1 de los silicatos, especialmente montmorillonita, tienen el mayor efecto, aquellas del tipo 1:1 (caolinita) tienen un efecto menor.

Además del rol en la retención de agua, el contenido y composición de la fracción arcilla modifica, a través de la modificación en la porosidad y estructura del suelo, la dinámica hídrica del mismo. Numerosas investigaciones sobre el transporte de agua e intercambio de gases (Beven y German, 1982), han demostrado que la estructura del suelo debe ser vista como un espacio anisotrópico que le permite exhibir diversas propiedades en diferentes direcciones del espacio. Esto se manifiesta claramente en suelos de mediano a alto contenido de arcilla, los cuales al secarse se contraen formando fisuras verticales que se constituyen en pasos rápidos del agua infiltrada, zonas de alta aireación del suelo y lugares para la penetración profunda de las raíces de las plantas (Dexter, 1988). La presencia de estas grietas provoca además un patrón desuniforme de distribución de la humedad del suelo, ya que el humedecimiento y el secado del mismo se producen preferentemente a través de las paredes de los agregados que separan dichas fisuras, o donde estas terminan (Van Stiphout et al., 1987).

Son pocos los trabajos que relacionan la mineralogía de los suelos con su dinámica de poros y sus propiedades hídricas. Como se menciona en la literatura (Nettleton et al., 1983; Kutilek, 1996) existe una notable diferencia entre los suelos denominados "rígidos" y los suelos con arcillas expandibles en cuanto a su dinámica en la organización y composición del espacio poroso y en el correspondiente comportamiento hídrico de los mismos. Respecto a los suelos de la región chaco-pampeana es escasa la información que vincule la mineralogía con las características hídricas. Estudios de la conductividad hidráulica de suelos halomórficos del norte de Santa Fe realizados por Morrás y Candiotti (1981) mostraron importantes diferencias de permeabilidad que, además de la influencia fundamental de las variaciones de salinidad, sodicidad y textura, pudieron también en parte atribuirse a las diferencias de composición mineralógica de la fracción arcilla. En trabajos recientes, Castiglioni et al. (2005a, b; 2007) también estudiaron las relaciones existentes entre la tasa de movimiento del agua edáfica y algunas propiedades vinculadas con la composición mineralógica de la fracción arcilla de algunos Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada.

Del mismo modo diversos investigadores han estudiado la relación de las arcillas con los índices de Atteberg, como el límite plástico y el límite líquido. Estos índices han sido vinculados frecuentemente con la friabilidad y la oportunidad de labranza del suelo (Mueller et al., 2003), con propiedades hídricas (Castiglioni et al., 2007) y con propiedades como la estabilidad estructural de agregados (Ayoubi et al., 2012). Sin embargo, todavía son muy escasos los trabajos que utilizan estos índices y más aún en el estudio de suelos de la región Pampeana.

Por otro lado, estas relaciones afectan una de las principales propiedades que poseen las arcillas, su expansión-contracción. Las arcillas que cambian más de volumen son las más activas en los fenómenos de humectación-deseccación. Las consecuencias macroscópicas serán importantes en suelos con mineralogía esmectítica, cuyas propiedades de hinchamiento-contracción se relacionan con la geometría variable de esta arcilla. Para otras arcillas como la illita y la caolinita, la retención de agua depende sobre todo del tamaño y forma de las partículas (Tessier, 1984).

Estos diversos comportamientos son importantes en la formación y estabilidad de la estructura del suelo. Así, Dexter (1988), Kay (1990) y Oades (1993), destacan que la capacidad para regenerar una estructura degradada depende de los procesos responsables de formar y estabilizar agregados, los cuales se encuentran directamente relacionados a procesos de expansión y contracción (Utomo y Dexter, 1982).

Diversos autores (Stern et al., 1991; Igwe et al., 1999) mencionan que el tipo de mineral presente en las arcillas es un factor importante en el control de la estabilidad de agregados y que la presencia aún de pequeñas cantidades de esmectita incrementan su grado de dispersión, favoreciendo la formación de sellos superficiales. También Stern et al. (1991), trabajando con distintos suelos que poseían entre un 13 y 39% de arcilla, encontró que el factor que determinaba la disminución drástica en la tasa de infiltración final de los mismos era la presencia de esmectita en sus arcillas y no su composición textural.

Por otro lado, varios investigadores establecieron relaciones más estrechas entre la capacidad de expansión de los suelos y sus diferentes propiedades. Así por ejemplo, la

capacidad de intercambio catiónico (CIC) resulta un buen indicador de la composición y del comportamiento del suelo. Es sabido que la adsorción de cationes aumenta cuando aumentan los contenidos de partículas finas, con el aumento de minerales de arcilla 2:1 (Martel et al., 1978) y con el contenido de materia orgánica del suelo (Thompson et al., 1989). Además, la CIC está directamente relacionada con la estabilidad de los agregados del suelo y la dispersión de las arcillas (Golberg, 1998). Por su parte, Parker et al. (1977) mencionan que los cambios de volumen del suelo son gobernados por factores tales como: mineralogía de arcillas, tipo de cationes adsorbidos, agentes cementantes, estructura y densidad del suelo, estrés e historia de estrés, etc.

En relación a este fenómeno de expansión y contracción, Braudeau (2004) considera que la función característica de la forma en la que sólidos, agua y aire están organizados puede ser determinada mediante el análisis de las curvas de contracción del suelo. La curva de contracción es un método preciso de obtener características hídricas importantes así como otras propiedades estructurales como capacidad de aireación e índice de expansión del suelo. Este comportamiento ha sido investigado principalmente en suelos arcillosos donde se expresan con una gran magnitud (Boivin et al., 2004). Sin embargo, los cambios de volumen también ocurren, aunque con una magnitud menor, en suelos con bajos contenidos de arcilla (Dexter, 1988). Recientemente Castiglioni et al. (2004; 2005b) aplicaron el análisis de las curvas de contracción al estudio de Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada con diferencias mineralógicas conocidas, encontrando correlaciones significativas de diversos sectores de las curvas de contracción con la CIC y la humedad equivalente, las cuales integran tanto la cantidad como el tipo de arcillas. Además, al evaluar el comportamiento del sólido y el aire a diferentes humedades, constituiría una metodología muy precisa e integradora para evaluar distintos manejos agronómicos. De esta forma, Fernández (2011) logró buenos resultados al evaluar el pisoteo animal al sur de Santa Fe. Por otro lado, todavía no es clara la efectividad de esta metodología en suelos con mayor cantidad de arenas donde se espera que el comportamiento sea más rígido.

2.1.2 Fracción limo

El limo es otra fracción que se encuentra de forma mayoritaria en gran parte de los suelos de la región chaco-pampeana y de otras regiones del país y, si bien la arcilla es la fracción más importante y más estudiada en cuanto al comportamiento físico de los suelos, la fracción limo también dictamina el comportamiento de las propiedades físico-químicas de los suelos. Por ejemplo, los suelos cultivados de la región pampeana han sufrido un proceso de deterioro físico, debido entre otras causas a la presencia de una alta cantidad de limos en su matriz (Pecorari, et al 1990).

La abundancia de esta fracción de por sí genera sensibilidad de estos suelos a la degradación física que se manifiesta por la formación de estructuras masivas, encostramiento superficial y disminución de la porosidad estructural (Wischmeier et al., 1971). Sin embargo, más allá de los efectos físicos derivados de la cantidad de esta fracción, algunos estudios han puesto en evidencia la influencia de la composición de los limos en diversos aspectos.

Así por ejemplo, inicialmente Pecorari et al. (1990) y posteriormente Cosentino y Pecorari (2002) establecieron que la conocida abundancia de fitolitos y vidrios

volcánicos en la fracción limo de los suelos pampeanos tendrían consecuencias negativas desde el punto de vista físico. La existencia de estos limos de baja densidad disminuye la densidad de partícula y aumenta la porosidad textural y la debilidad estructural del ensamblaje del esqueleto con la arcilla en un amplio rango de contenidos hídricos, generando un efecto negativo sobre su resistencia mecánica a la ruptura influenciando también la estabilidad estructural de estos suelos.

2.2.3 Otros componentes

Por último diversos elementos químicos presentes en el suelo como el calcio, sodio, hierro pueden afectar tanto la agregación del suelo como su estabilidad, así como también el comportamiento de expansión y contracción del suelo. Cationes bivalentes como el calcio producen una floculación del suelo modificando sus propiedades de expansión y dispersibilidad en suelos con arcillas 2-1. Las relaciones entre los complejos de materia orgánica, tipo de mineralogía de arcillas y estructuración del suelo han sido estudiadas por Varadachari et al. (1995). Estos autores encontraron que el rol del ácido húmico en la estructuración depende del catión intermediario, y del grado de saturación de la arcilla con calcio, siendo mayor la ligazón del ácido húmico a través de puentes de calcio que a través de puentes sodio. Además mencionan que la fortaleza de las uniones ácido húmico-calcio-Illita es más fuerte que la unión ácido húmico-calcio-esmectita, si bien estas relaciones pueden variar según otros factores. En cuanto al hierro, Cañasveras et al. (2009) encontró una buena correlación entre el hierro (extractable con citrato-bicarbonato-ditionita) y la estabilidad estructural mientras que diversos trabajos sobre Oxisoles señalan que el contenido de hierro es uno de los principales factores en la microestructuración del suelo (Ferreira et al., 1999).

En síntesis, las fracciones inorgánicas del suelo juegan roles fundamentales en el comportamiento físico y químico de los mismos. Los suelos de la región chaco-pampeana de la Argentina presentan variaciones composicionales significativas, no solamente entre las diferentes subregiones sino también a nivel local y aún predial (Morrás, 1996b; 2002; Morrás et al., 2002). Puede postularse que así como diferencias de composición generan diferencias de comportamiento en los suelos naturales y en los suelos cultivados mediante métodos tradicionales (Castiglione et al., 2005a,b; 2007), del mismo modo variaciones composicionales generarán diferencias de comportamiento en los suelos cultivados en SD. Sin embargo, hasta el momento se carece de estudios que vinculen la composición mineral con la organización estructural y el comportamiento hidrofísico de los suelos cultivados en SD. Por todo esto, para comprender las modificaciones físicas y estructurales y el efecto de distintos tratamientos de manejo agrícolas sobre el suelo, se debe en primer lugar, conocer el comportamiento intrínseco del suelo, el cual estará expresado por las variables discutidas en este capítulo.

Objetivos

- Determinar la composición general del suelo, poniendo énfasis en la fracción arcilla y en las propiedades físicas y físico-químicas a ella relacionadas.
- Cuantificar la presencia de limos de baja densidad en los suelos y evaluar su efecto sobre otras variables edáficas (como por ejemplo, la estabilidad estructural).
- Verificar el potencial de las curvas de expansión y contracción del suelo como herramienta para discriminar manejos de suelo bajo SD (e.g. Buenas y Malas prácticas, nivel de intensificación agrícola) e interpretar su comportamiento a través de factores composicionales del mismo.

Hipótesis

2. I. - Los sitios evaluados en este trabajo conforman un gradiente ecológico y pedogenético con el cual se podrá estudiar el efecto de la textura y mineralogía sobre diversas variables edáficas en distintas prácticas agrícolas bajo SD.
2. II - Todos los suelos poseen un porcentaje importante de limos de baja densidad lo que les otorgaría características de fragilidad.
2. III - Las curvas de contracción son útiles para discriminar entre distintos manejos agrícolas.

2.2 Materiales y Métodos

Para evaluar el efecto de la composición de suelo en los tratamientos Ambiente natural, Buenas prácticas y Malas prácticas se realizó una caracterización mineralógica, física y química de los 4 suelos bajo estudio: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert.

2.2.1 Caracterización física y química de los suelos

El muestreo de suelos para su caracterización física y química fue llevado a cabo en invierno. Para cada combinación de suelo y tratamiento se tomaron muestras compuestas (5 submuestras) de 0-20 cm en 3 puntos de muestreos separados al menos por 50 m. Para realizar los análisis físicos y químicos de rutina todas las muestras fueron homogeneizadas en su punto de recolección, tamizadas (tamiz 2 mm) y secadas al aire. Las determinaciones efectuadas fueron: pH (1:2.5 suelo:agua), carbono orgánico oxidable total (COT) (Walkley y Black, 1934), conductividad eléctrica (CE) mediante conductímetro. Los cationes intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó por el método de acetato de amonio 1N (Klute, 1986). El Na^+ y el K^+ fueron medidos por fotometría de llama, mientras que el Ca^{+2} y el Mg^{+2} fueron medidos mediante espectrometría de absorción atómica. La granulometría fue determinada mediante el método de la pipeta de Robinson para el tamaño arcillas ($<2 \mu\text{m}$) y la fracción limo (2-50 μm), mientras que las arenas ($>50 \mu\text{m}$) fueron determinadas mediante tamizado en agua (Soil Conservation Service, 1972). Por último la humedad equivalente (HE) fue medida según la metodología propuesta por Briggs y Mc Lane (1907).

2.2.1.1 Análisis mineralógicos

Se efectuaron determinaciones mineralógicas de la fracción arcilla mediante difracción de rayos X sobre muestras orientadas naturales, glicoladas (Etilenglicol) y calcinadas a 550°C de cada uno de las combinaciones suelo/tratamientos estudiado. Para ello, se eliminó la materia orgánica de 20 gramos de suelo mediante un promedio de 10-20 ml de H_2O_2 100 v y luego las muestras fueron dispersadas mediante adición de 20 ml hexametáfosfato de sodio en la suspensión acuosa. La fracción arcilla obtenida por sedimentación (Ley de Stokes, ~16 horas) fue saturada con cloruro de magnesio (1 N) para obtener muestras homiónicas. El análisis mineralógico de la fracción arcilla se realizó mediante difracción de rayos X con un equipo Panalytical X'Pert Pro con anticátodo de Cu con una energía de 40 Kw y 30 mA. La identificación de las arcillas se efectuó evaluando el comportamiento de las muestras en cada uno de los tests aplicados. Una síntesis de los criterios utilizados se presenta en la Tabla 2.1. También se realizó una semi-cuantificación de las especies minerales en la fracción arcilla según el método de Holtzappfel (1985). Además se realizaron determinaciones mineralógicas en polvo de las muestras de suelo total. En este caso se realizó una cuantificación de las distintas fases mediante el programa TOPAS.

Tabla 2.1 Síntesis de los criterios utilizados para la identificación de arcillas mediante ensayos de comportamiento. Espacio interfoliar en Å de reflexiones basales en pequeños ángulos (2°-15° 2 /min) Adaptado de Robert (1975); Brindley y Brown (1980).

<i>Minerales</i>	<i>Naturales</i>	<i>Glicolados</i>	<i>Calcinados 550 °C</i>
Esmectitas	15-16 Å	16,8-20 Å	10 Å
Illitas	9,5-10,3 Å	9,5-10,5 Å	9,5-10,3 Å
Caolinitas	7-7,2 Å	9-10 Å	9-10 Å

2.2.1.2 Índices de Atteberg

El límite plástico (Lp) y el límite líquido (Ll) se obtuvieron según Means y Parcher (1965). Luego se calculó el Índice plástico (Ip) el cual, es la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre Ll y Lp. Para la caracterización de este índice se utilizaron los siguientes intervalos: (0) no plástico, (1-5) poco plástico, (5-10) baja plasticidad, (10-20) plasticidad media, (20-40) alta plasticidad y (mayor a 40) plasticidad muy alta (Márquez, 1985). Además se calculó el número de actividad de las arcillas (AA). Su cálculo obedece a la siguiente fórmula: AA: Lp/contenido de arcilla (%). Dado que el Lp de un determinado material de suelo aumenta con su contenido de arcilla, el número de actividad no variará y por lo tanto este parámetro puede ser la forma más real de determinar el efecto de diferentes tipos de arcillas presentes en cada suelo, independientemente de su contenido.

2.2.1.3 Fraccionamiento densimétrico de la fracción limos (2-50 µm)

El fraccionamiento densimétrico fue realizado mediante la metodología propuesta por Zucol y Osterrieth (2002), modificada por Madella et al. (1998). En síntesis, la fracción de tamaño de limo, obtenida previamente por sedimentación de una muestra de suelo sin materia orgánica (tratada previamente con H₂O₂) y la cual no contiene carbonatos, fue sometida a distintas series de centrifugaciones con el agregado de diferentes cantidades de politungstato de sodio [Na₆ (H₂W₁₂O₄₀) H₂O] con el fin de alcanzar distintas densidades del medio de suspensión. En primer lugar, en dicha fracción se determinaron los limos pesados a partir de una densidad de 2,9 g cm⁻³. La fracción resultante más liviana fue nuevamente separada en dos fracciones >2,3 g cm⁻³ y <2,3 g cm⁻³. Esta última fracción corresponde a la fracción de limos de baja densidad (LBD), estimándose compuesta por biolitos y vidrios volcánicos (Cosentino, 2000). La fracción >2,3 g cm⁻³ - <2,9 g cm⁻³ corresponde a la fracción de limos de densidad intermedia.

2.2.1.4 Determinación del hierro total y fraccionamiento del hierro.

El contenido de hierro total fue determinado según la metodología normalizada ISO 11466 (1995). Brevemente, dicha metodología consistió en pesar 1 g de muestra en tubos de ensayo (Pyrex) donde se adicionó 10 cm³ de una solución de ácido nítrico y ácido clorhídrico con una relación 1:3, a temperatura ambiente durante 16 horas. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en un bloque digestor a 130°C durante 2 horas bajo condiciones de reflujo. Luego se diluyó la muestra en 50 cm con 0,5 mol L⁻¹ de ácido nítrico, fue filtrada y almacenada en frascos de polietileno a 4°C para la

posterior medición de Fe total por espectrofotometría de absorción atómica (VARIAN-AA600, UFRRJ, Río de Janeiro, Brasil).

Para realizar el fraccionamiento de hierro, se utilizó la metodología empleada en Soares (2005) y Behling (2005) la cual consistió en extracciones utilizando las siguientes soluciones extractantes: agua, cloruro de magnesio 1 mol L^{-1} , DPTA, ácido acético $0,043 \text{ mol L}^{-1}$ y H_2O_2 100v. Estos extractantes se correlacionan con la fracción soluble, intercambiable, óxidos, carbonatos y materia orgánica, respectivamente. Para todos los extractantes se realizaron 3 repeticiones y 3 muestras blanco sin agregado de suelo. En los extractos se midió la concentración de varios metales por espectrofotometría de AA. En esta tesis sólo se presentarán los resultados relativos al Fe del suelo Haplustol, Argiudol (Pergamino) y Hapludert para el subsitio 1 para cada tratamiento de manejo.

2.2.1.5 Curvas de expansión y contracción

Las curvas de contracción se determinaron mediante el procedimiento propuesto por Castiglioni (2005a) en agregados ($n=30-60$) de 3 a 10 cm^3 de volumen, obtenidos a campo para cada tratamiento. La obtención de estos agregados se realizó mediante el desagregado de los mismos por sus planos de debilidad cuando su contenido hídrico se encontraba cercano a capacidad de campo. Luego de obtener el volumen y la humedad para cada agregado se trazaron curvas (volumen en función de la humedad gravimétrica) en las cuales se calculó su pendiente (pendiente), ordenada al origen (ordenada), volumen máximo (V_{max}), volumen mínimo (V_{min}), diferencia entre V_{max} y V_{min} (ΔV_{ol}) y la humedad máxima alcanzada para cada combinación tipo de suelo-tratamiento de manejo (θ_{max}). Estas curvas se ajustaron a una recta lineal cuyo coeficiente de determinación fue superior a $0,70$ en todos los casos.

2.2.2 Análisis estadísticos

Para evaluar el efecto del tipo de suelo y del tratamiento sobre las variables físicas y químicas se realizaron análisis de varianza (ANOVA, Snedecor y Cochran, 1980). Cuando se encontraron diferencias significativas se aplicó el test de Tukey con un $p < 0,05$. Además se establecieron correlaciones de Pearson entre las variables medidas. Todos los supuestos fueron corroborados y ninguna variable debió ser transformada. Para interpretar el rol de los limos de baja densidad expresado en la densidad de partícula, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) considerando el contenido de arcillas, limos y arenas, COT, LBD y E+I/E. Por último, se realizó un segundo análisis de componentes principales, para resumir las características físicas y químicas de los suelos estudiados y para interpretar el agrupamiento de las muestras evaluadas de acuerdo al tipo de suelo y/o al tratamiento. El ACP incluyó las siguientes variables: contenido de arcillas, limos y arenas, conductividad eléctrica (CE), pH, calcio (Ca^{+2}) intercambiable, capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), saturación de bases (SB), humedad equivalente (HE), carbono orgánico oxidable total (COT), densidad de partícula (D_p), límite plástico (L_p), límite líquido (LI), índice de plasticidad (I_p), actividad de arcillas (AA), esmectitas más interestratificadas illita-esmectita (E+I/E). Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el programa Infostat/P v1.1 (2002).

2.3 Resultados

2.3.1 Características químicas y físicas generales de los suelos evaluados.

En relación a las propiedades químicas (Tabla 2.2) se puede mencionar que el pH fue moderadamente ácido con valores que oscilaron entre 5,5 - 6,5 sin presentar diferencias entre suelos o tratamientos (Tabla 2.2). La CE fue baja para todos los sitios con valores menores a 1 mS cm^{-1} . Para el Ca^{+2} , la ordenamiento encontrado fue Hapludert >Argiudol (Monte Buey)>Argiudol (Pergamino)> Haplustol, presentando diferencias significativas el Hapludert con todos los suelos y también el Haplustol del Argiudol (Pergamino) ($p < 0,05$). En el caso del Ca^{+2} no se encontraron diferencias entre tratamientos de manejo. El mismo ordenamiento se encontró para Mg^{+2} , pero además, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. El tratamiento AN presentó los valores más altos diferenciándose significativamente de BP, mientras que MP presentó valores intermedios. El Na^{+} por su parte, sólo presentó diferencias significativas entre sitios, con un ordenamiento (Hapludert >Haplustol=Argiudol (Pergamino) >Argiudol (Monte Buey). El PSI fue bajo para todos los suelos con excepción del Haplustol donde se encontró para el AN un valor de 6,8%. El K^{+} fue la única base de cambio que presentó interacción sitio/tratamiento, observándose en general valores más elevados en los suelos de textura más gruesa (Haplustol y Argiudol -Monte Buey-, con respecto a los de textura más fina (Argiudol -Pergamino- y Hapludert) y una tendencia AN>BP>MP. La SB fue alta y relativamente homogénea en todos los suelos y tratamientos (68,9 – 89,25 %) detectándose diferencias significativas únicamente entre el Haplustol y el resto de los suelos, los cuales presentaron valores más bajos. Por último, la Dp fue mayor en el Haplustol con respecto al resto de los suelos (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Características físicas y químicas de los suelos evaluados: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). Valores entre paréntesis corresponden al error estándar.

Suelo	Trat	Granulometría						CE		pH		Bases de cambio						CIC	PSI	SB	HE	COT							
		Arcilla (<2 µm)		Limo (2-50 µm)		Arena (>50 µm)						Ca ⁺²		Mg ⁺²		Na ⁺							K ⁺						
				(%)				mS cm ⁻¹		1:2.5 agua				Meq. 100 g ⁻¹															
Haplustol	AN	13,8	(3,1)	29,3	(2,2)	56,8	(1,2)	0,32	(0,09)	6,0	(0,2)	6,31	(0,12)	2,31	(0,04)	0,86	(0,02)	1,86	(0,29)	12,7	(0,2)	6,8	(0,2)	89,2	(2,2)	23,5	(2,1)	2,0	(0,1)
	BP	11,8	(0,1)	32,0	(0,0)	56,2	(0,1)	0,38	(0,03)	5,9	(0,3)	7,50	(0,90)	2,00	(0,06)	0,76	(0,01)	2,08	(0,16)	14,1	(0,5)	5,4	(0,1)	87,4	(3,9)	21,6	(2,8)	1,4	(0,1)
	MP	11,6	(0,1)	31,8	(0,1)	56,7	(0,2)	0,34	(0,02)	5,7	(0,1)	6,43	(0,36)	2,19	(0,08)	0,77	(0,03)	2,06	(0,27)	13,4	(0,4)	5,8	(0,3)	85,5	(3,1)	15,0	(2,3)	1,0	(0,0)
Argiudol (Monte Buey)	AN	22,6	(0,8)	60,8	(0,5)	16,6	(0,3)	0,54	(0,07)	5,8	(0,4)	11,77	(0,93)	3,30	(0,12)	0,37	(0,03)	3,00	(0,00)	26,8	(1,6)	1,4	(0,2)	68,9	(2,7)	25,6	(1,5)	3,7	(0,4)
	BP	24,6	(2,3)	58,1	(3,4)	17,3	(1,4)	0,63	(0,15)	5,5	(0,2)	11,10	(0,23)	3,10	(0,17)	0,33	(0,03)	2,20	(0,30)	23,3	(1,4)	1,4	(0,1)	72,4	(5,1)	25,1	(0,5)	2,2	(0,1)
	MP	20,2	(1,0)	62,3	(0,9)	17,4	(0,2)	0,22	(0,03)	6,4	(0,0)	12,50	(0,12)	3,15	(0,03)	0,30	(0,00)	1,10	(0,00)	21,2	(0,3)	1,4	(0,0)	81,1	(1,2)	20,0	(2,0)	1,8	(0,0)
Argiudol (Pergamino)	AN	21,8	(0,6)	62,3	(0,2)	15,9	(0,4)	0,36	(0,03)	5,7	(0,1)	7,97	(1,14)	3,38	(0,13)	0,77	(0,06)	1,68	(0,09)	18,9	(0,9)	4,1	(0,4)	72,8	(2,8)	23,2	(1,6)	3,2	(0,2)
	BP	22,8	(1,5)	60,2	(1,5)	16,9	(0,3)	0,39	(0,02)	5,5	(0,1)	7,86	(0,41)	2,57	(0,22)	0,65	(0,02)	1,18	(0,14)	17,1	(1,0)	3,8	(0,1)	71,6	(2,1)	21,5	(2,7)	2,0	(0,1)
	MP	21,1	(1,6)	64,3	(0,9)	14,6	(0,7)	0,26	(0,04)	6,2	(0,0)	10,24	(0,12)	2,11	(0,10)	0,73	(0,04)	1,32	(0,04)	18,0	(0,7)	4,1	(0,4)	80,3	(3,8)	20,2	(0,8)	2,0	(0,0)
Hapludert	AN	41,6	(0,8)	56,7	(0,9)	1,7	(0,1)	0,90	(0,02)	6,3	(0,3)	18,31	(2,91)	6,59	(0,93)	1,17	(0,36)	0,97	(0,10)	39,1	(1,9)	3,0	(0,9)	68,9	(8,0)	35,2	(2,1)	3,4	(0,2)
	BP	47,3	(1,2)	51,1	(1,2)	1,6	(0,0)	0,70	(0,03)	6,5	(0,2)	25,59	(5,68)	4,33	(0,37)	1,09	(0,11)	1,19	(0,21)	41,1	(1,2)	2,7	(0,4)	77,7	(9,9)	36,1	(1,3)	3,0	(0,3)
	MP	40,2	(1,6)	57,8	(1,6)	2,0	(0,1)	0,71	(0,04)	5,8	(0,2)	16,00	(3,75)	5,68	(0,71)	1,03	(0,11)	1,27	(0,20)	31,7	(1,8)	3,2	(0,2)	74,8	(6,5)	28,0	(0,1)	2,2	(0,0)

CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, COT: carbono orgánico total y Dp: densidad de partícula.

Contrariamente a los resultados presentados, entre los suelos bajo estudio se encontraron diferencias marcadas en la composición granulométrica y en ciertas propiedades relacionadas con la misma, por lo que serán discutidas más en detalle a continuación.

2.3.1.1 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico presentó efectos del sitio y del tratamiento no detectándose interacción entre estos dos factores. Tampoco existieron diferencias significativas entre los distintos subsitios de muestreo para cada combinación suelo-tratamiento ($p > 0,05$) (datos no mostrados) evidenciado en los bajos valores de error estándar (Tabla 2.2, Figura 2.1a,b,c). Los resultados del análisis granulométrico evidenciaron un gradiente textural O-E a través del cual aumenta el contenido de arcillas y disminuye el de arena (Tabla 2.2, Figura 2.1a,b,c). Así el Hapludert presentó los valores más altos de contenido de arcillas mientras que el Haplustol los más bajos (Figura 2.1a). De forma contraria, el Haplustol presentó los valores más altos de contenido de arena, diferenciándose significativamente con ambos Argiudoles y a su vez dichos suelos se diferenciaron del Hapludert ($p < 0,05$), el cual presentó valores muy bajos de esta fracción (Figura 2.1c). Los suelos posicionados de forma intermedia de este gradiente (Argiudoles) presentaron una composición granulométrica muy semejante entre sí, con un alto contenido de limos, los cuales más elevados al determinado en el Hapludert y muy superiores del Haplustol (Figura 2.1b) ($p < 0,05$). Sin embargo las arenas encontradas en el Haplustol fueron arenas muy finas, por lo cual se hipotetiza que las mismas se comportarán como limos.

Por otro lado, se puede observar en todos los suelos que el contenido de arcilla de BP fue superior a MP, no diferenciándose estadísticamente AN de MP ($p > 0,05$) (Figura 2.1a). Por el contrario, el contenido de limo fue menor en BP diferenciándose significativamente con MP pero no así con AN ($p > 0,05$) (Figura 2.1b). Por último el contenido de arenas no difirió entre tratamientos de manejo ($p > 0,05$) (Figura 2.1c).

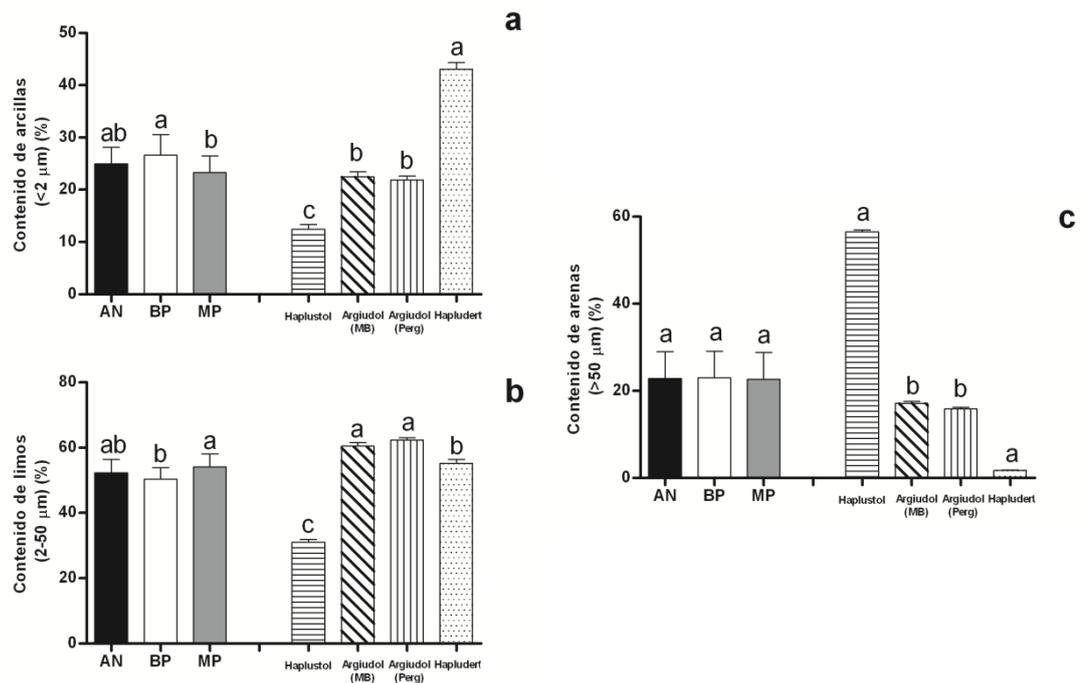


Figura 2.1 Composición granulométrica (%) a) arcillas, b) limos y c) arenas para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el suelo Haplustol, Argiudol (Monte Buey –MB–), Argiudol (Pergamino –Perg.–) y Hapludert. Barras corresponden al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos y entre los suelos (Tukey, $p>0,05$).

2.3.1.2 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una función creciente de la superficie interna y externa de las partículas de los materiales presentes en el suelo, y por lo tanto se incrementa en la medida que disminuye el tamaño de las partículas (Jury et al., 1991). Por ello la CIC presentó valores acordes al contenido de arcillas en cada situación analizada, presentando un coeficiente de correlación con las mismas muy alto (Figura 2.2, Tabla A.1). En este análisis se detectó un efecto significativo de la interacción tratamiento*suelo ($p<0,05$) (Figura 2.2). El Haplustol presentó los valores más bajos de CIC no encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos de manejo (Figura 2.2). En el otro extremo, el suelo Hapludert presentó los valores más altos diferenciándose significativamente del resto de los suelos y observándose en el tratamiento MP un valor significativamente menor al resto de los tratamientos, sin embargo este tratamiento es a su vez mayor al resto de los suelos con excepción del AN del Argiudol (Monte Buey). Los Argiudoles presentaron valores intermedios de CIC, mostrando el Argiudol (Monte Buey) valores algo mayores al de Pergamino, principalmente en AN y BP. En cada suelo no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de manejo ($p>0,05$) (Figura 2.2).

Yule y Ritchie (1980) mencionan que la CIC describe en forma conjunta la actividad y la cantidad de arcilla presente en el suelo, mientras que el contenido de materia orgánica aumenta dicho valor (Thompson et al., 1989). En consecuencia –y

como se verá luego- para los Argiudoles (Monte Buey y Pergamino) con igual cantidad de arcillas, las diferencias de CIC observadas (Figura 2.2) se explicarían por las pequeñas diferencias encontradas en el contenido de MO y posiblemente en diferencias mineralógicas entre ambos suelos.

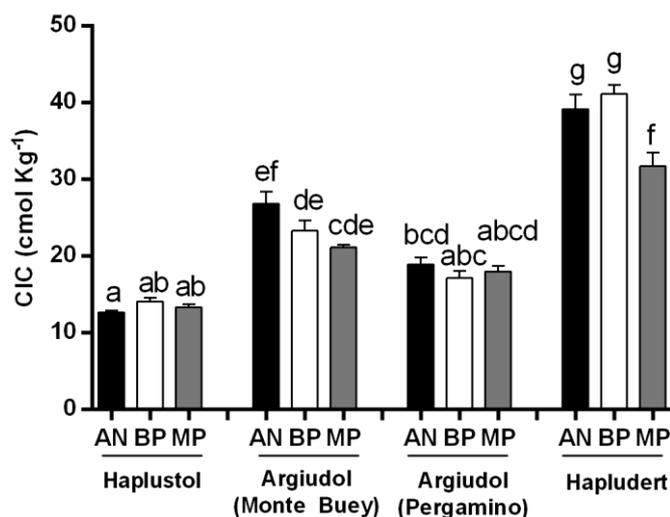


Figura 2.2 Capacidad de intercambio catiónico (cmol kg^{-1}) para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el suelo Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert. Barras corresponden al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción tratamientos*suelos (Tukey, $p > 0,05$).

2.3.1.3 Carbono orgánico total y humedad equivalente

El contenido de carbono orgánico en los suelos es dependiente de las condiciones ecológicas (clima y vegetación) pero también se halla relacionado con su composición granulométrica y mineralógica a través del efecto de protección que ejercen las fracciones finas inorgánicas sobre los coloides orgánicos generando así complejos arcillo- húmicos más estables (Quiroga et al., 1996b; Alvarez y Lavado, 1998; Hevia et al., 2003).

El carbono orgánico total (COT) en conjunto con la humedad equivalente (HE), fueron las características del suelo que mejor explicaron las diferencias entre los tratamientos ($p < 0,0001$), propiedades que a su vez dependieron del contenido de arcillas y de la CIC (Tabla A.1). Con relación al COT, el Haplustol presentó los menores valores (1,49 %) detectándose diferencias significativas con los demás suelos, mientras que el mayor valor promedio para todos los tratamientos fue encontrado en el Hapludert (2,88 %), no encontrándose diferencias significativas con el Argiudol (Monte Buey) (2,57 %) pero sí con el Argiudol (Pergamino) (2,42 %). Entre los Argiudoles no existieron diferencias significativas.

En cuanto a los tratamientos, el COT presentó una interacción significativa ($p = 0,02$) con el tipo de suelo, presentando un ordenamiento general $\text{AN} > \text{BP} > \text{MP}$, con valores de 3,07, 2,18, 1,78% respectivamente. Los dos Argiudoles presentaron un comportamiento muy similar con diferencias significativas entre los tratamientos agrícolas con respecto al AN. El COT de estos AN no se diferenció estadísticamente del

AN de Hapludert, mientras que el AN del Haplustol presentó valores significativamente menores ($p < 0,05$) (Figura 2.3). Para el caso del Argiudol (Monte Buey), las diferencias entre los tratamientos agrícolas son mínimas, mientras que para el Argiudol (Pergamino) los valores son prácticamente iguales (Figura 2.3). Por otro lado, los BP de los Molisoles fueron similares diferenciándose significativamente del BP del Hapludert ($p < 0,05$), el cual presentó un valor mayor. Por último, el MP del Haplustol presentó un valor muy bajo, diferenciándose del resto de los tratamientos bajo MP, con excepción del Argiudol (Monte Buey).

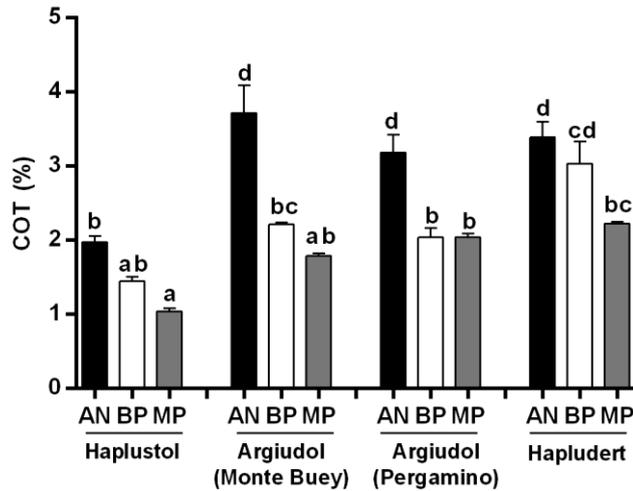


Figura 2.3 Carbono orgánico total (COT) para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el suelo Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert. Barras corresponden al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción tratamientos*suelos (Tukey, $p < 0,05$).

Como se mencionó anteriormente, la HE también mostró diferencias entre los sitios y tratamientos no detectándose interacción entre suelos y tratamientos. La HE presentó valores muy altos en el Hapludert (33,1 %) diferenciándose significativamente del resto de los suelos cuyos valores oscilaron entre 20% y 23,6 % (Figura 2.4). A su vez, no se encontraron diferencias significativas entre BP y AN, mientras sí lo hicieron con MP (Figura 2.4), la tendencia encontrada fue la siguiente, $AN \geq BP > MP$, con valores de 26,9 %, 26,1 % y 20,8 % respectivamente. Como se puede observar en la Tabla A.1, la HE presentó altos coeficientes de correlación con el COT, y también con el contenido de arcillas.

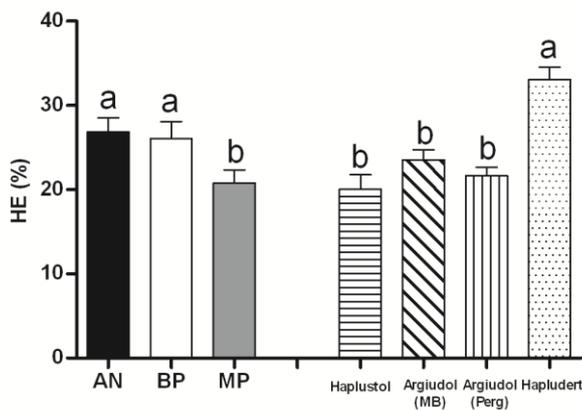


Figura 2.4 Humedad equivalente (HE) para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey-MB), Argiudol (Pergamino-Perg) y Hapludert. Barras corresponden al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos y entre los suelos (Tukey, $p < 0,05$).

2.3.2 Caracterización mineralógica de los suelos bajo estudio.

2.3.2.1 Fracción arcilla

En la fracción arcilla de los horizontes A de los suelos estudiados se encontraron dos grupos mineralógicos bien diferenciados. Por un lado, los análisis por difracción de rayos X para los Molisoles, mostraron una composición mineral dominada principalmente por illita (I), representada por la reflexión a 9-10 Å, interestratificados irregulares illita/esmectita (I/E) representados por una serie continua de reflexiones en los pequeños ángulos, y una cantidad reducida de caolinita (C) con reflexiones entre 7-7,2 Å (Figura A.2 a, b, c). Por otro lado, el Hapludert presentó además una proporción importante de esmectitas en la fracción arcilla (Figura A.2 d). No se presentan los resultados por subsitio, los cuales no presentaron ninguna diferencia entre los mismos. En la Figura A.2 a y b se presentan ejemplos de difractogramas correspondientes a la identificación de las distintas fases según diferentes pre-tratamientos de las arcillas. En la misma se observa para dos suelos contrastantes (Haplustol-Hapludert) un aumento de las cuentas a bajos ángulos para las muestras glicoladas y lo opuesto para las muestras calcinadas. También en este último pre-tratamiento se advierte un desplazamiento y crecimiento del área de la illita producto de la contracción de los espacios interfoliares de las arcillas interestratificadas I/E y de las esmectitas. De la misma forma, se observa la desaparición del pico de la caolinita confirmando su presencia en las muestras.

Si bien las mismas especies minerales fueron identificadas en los Molisoles sus proporciones difirieron. Por su parte el Vertisol, además de los minerales detectados en los otros suelos, también presentó una cantidad considerable de esmectitas. Para obtener información sobre las proporciones de los tipos de arcillas en los diferentes suelos se realizó un procedimiento de semi-cuantificación en el que se consideraron de manera conjunta todos los minerales expansibles (I/E y E) (Figura 2.5). Estos valores resultaron coherentes con el comportamiento físico del suelo expresado por las diversas correlaciones con coeficientes muy altos encontradas entre estos valores cuantitativos y variables texturales y reológicas (Lp, Ll e Ip) (Tabla A.1). Sin embargo, se debe tener en cuenta que la metodología presenta entre un 5-10% de error y existe un error estadístico relacionado al número de cuentas de los difractogramas que se sitúa alrededor de 12% para la illita y 16% para la caolinita, siendo dicho valor más variable para las E+I/E.

Teniendo en cuenta lo anterior, se interpreta que los suelos Molisoles presentaron una reducida diferencia entre los distintos sitios y tratamientos para la proporción de illita y E+I/E. En el Hapludert, el contenido de E+I/E presentó valores significativamente mayores que el resto de los suelos, encontrándose también diferencias entre AN y BP, con respecto a MP, el cuál presentó un valor menor, si bien es significativamente superior al resto de los suelos (Figura 2.5). Para el contenido de illitas el comportamiento fue el contrario, con menores valores en el MP del Hapludert con respecto a los tratamientos AN y BP ($p < 0,05$) y diferenciándose también significativamente de los Molisoles (Figura 2.5). Para todos los Molisoles, la proporción de caolinita fue relativamente homogénea, encontrándose menores valores de la misma en el suelo Hapludert ($p < 0,05$) (Figura 2.5).

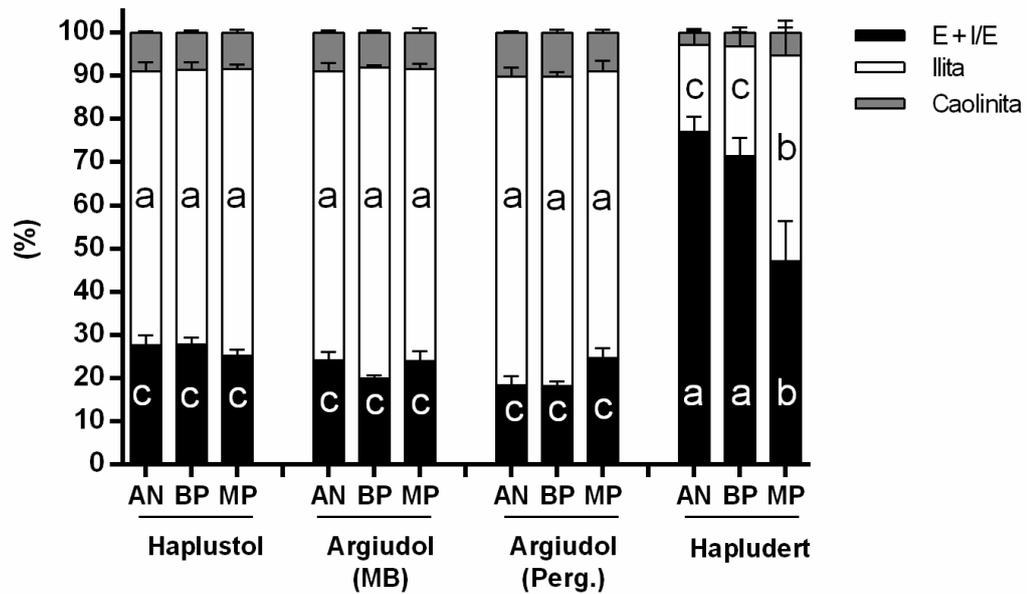


Figura 2.5 Semi-cuantificación de la mineralogía (%) para los tratamientos: AN (Ambiente Natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas Prácticas) para el suelo Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert. E+I/E: Esmeclita+ Interestratificado illita-esmeclita. Barras corresponde al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción tratamientos y suelos (Tukey, $p < 0,05$).

2.3.2.2. Mineralogía de la muestra total de suelo

En la Tabla 2.3 se presentan los resultados cuantitativos para suelos y tratamientos según el método Rietveld (TOPAS). Ejemplos de los difractogramas pueden ser encontrados en la Figura A.3. De acuerdo a estos datos, el Haplustol y el Argiudol (Monte Buey) –ambos situados en la Provincia de Córdoba– presentan los mayores contenidos de micas. En lo relativo a los minerales feldespáticos, el Haplustol presenta contenidos de albita ligeramente superiores a los otros suelos, los Argiudoles Monte Buey y Pergamino se caracterizan por presentar mayores proporciones de microclina, en tanto el Hapludert se diferencia de los otros suelos por el mayor contenido de anortita. Respecto a la relación C/F, si bien los valores son similares, se pudo observar una relación algo más alto en el Haplustol, particularmente en el tratamiento AN.

Tabla 2.3 Cuantificación mineralógica de la muestra total de suelo para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los distintos tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas). C/F: relación cuarzo-feldespato.

Suelo	Tratamiento	Minerales (%)					Índices		Bondad de ajuste
		Mica	Cuarzo	Albita	Anortita	Microclina	Feldespatos	C/F	
Haplustol	AN	7,5	13,7	16,5	50,4	11,9	78,8	0,17	2,1
	BP	10,0	10,3	12,9	54,0	12,8	79,7	0,13	1,9
	MP	5,4	10,7	16,2	54,8	12,8	83,8	0,13	2,1
Argiudol (Monte Buey)	AN	7,5	10,4	12,7	54,1	15,3	82,1	0,13	1,4
	BP	7,1	9,7	12,3	48,3	22,6	83,2	0,12	1,7
	MP	9,4	9,3	14,8	50,9	15,6	81,3	0,11	1,7
Argiudol (Pergamino)	AN	5,6	10,4	15,5	53,4	15,1	84,0	0,12	1,8
	BP	2,9	10,2	15,5	52,6	18,9	87,0	0,12	1,8
	MP	3,2	8,7	12,1	59,8	16,2	88,1	0,10	1,5
Hapludert	AN	3,7	10,2	7,5	67,8	10,8	86,1	0,12	1,7
	BP	4,4	8,6	9,9	65,4	11,6	87,0	0,10	2,1
	MP	4,0	10,3	11,0	61,2	13,5	85,7	0,12	1,7

2.3.3 Variables reológicas

En el análisis de las variables reológicas, se encontró la existencia de una interacción entre los tratamientos de manejos y el tipo de suelo, para todas las variables con excepción del límite plástico (Lp). En la Figura 2.6 a, se puede observar que el Lp fue significativamente mayor en el suelo Hapludert y menor en el Haplustol, presentado los Argiudoles valores intermedios. En relación a los tratamientos, MP presentó los valores más bajos diferenciándose significativamente de AN ($p < 0,05$), mientras que BP no presentó diferencias ni con AN ni con MP ($p > 0,05$) (Figura 2.6 a). En el análisis del Ll, se detectó una interacción significativa entre ambos factores (tratamiento-tipo de suelo) y presentó un comportamiento muy similar al Lp. Así el AN y el BP siguieron un ordenamiento Hapludert > Argiudoles > Haplustol; sin embargo para MP, sólo se encontraron diferencias significativas entre el Hapludert y los Molisoles, los cuales presentaron valores menores (Figura 2.6 b). La actividad de arcillas (AA) por su parte presentó los mayores valores en el Hapludert donde el AN se diferenció significativamente de los AN de los Molisoles ($p < 0,05$) (Figura 2.6 c), mientras que para BP, el Argiudol (Pergamino) presentó los valores más bajos diferenciándose estadísticamente del resto de los suelos ($p < 0,05$) (Figura 2.6 c). Por último, para MP, los Argiudoles presentaron valores más bajos con respecto al Haplustol y el Hapludert ($p < 0,05$) (Figura 2.6 c). Puede observarse (Figura 2.6 c y Tabla 2.4) que los valores de AA en el Haplustol resultan en conjunto ligeramente superiores a los de los otros Molisoles, lo cual se relaciona con su mayor contenido de minerales expansibles como indica la Figura 2.6. Por otro lado, el índice de plasticidad (Ip), mostró diferencias notorias entre los Molisoles y el Vertisol con mayores valores en este último suelo presentado de nuevo un alto coeficiente de correlación con el contenido de arcillas así como con la CIC (Tabla A.1, Figura 2.6). En los Molisoles no se encontraron

diferencias entre los tratamientos ni entre los suelos, si bien se podría generalizar que AN y BP presentan valores más altos que MP y que el Haplustol presenta una tendencia hacia valores más bajos que los Argiudoles. El Hapludert por su parte presentó diferencias significativas entre los tratamientos de manejo diferenciándose BP con valores mayores con respecto a MP, el cual no se diferenció de AN ($p>0,05$) (Figura 2.6). No obstante el bajo valor de MP del Hapludert es significativamente superior a todos los tratamientos de los Molisoles (Figura 2.6 d). Como se observa en esta misma figura, los valores para el Haplustol correspondieron al rango de bajo, mientras que para el Hapludert, fue alto. Los Argiudoles en general, se encontraron dentro del rango denominado bajo”, con algunos tratamientos (BP de Monte Buey y AN de Pergamino) que se ubican en un Lp “medio”. También debe destacarse que el Lp fue la variable reológica que mejor se correlacionó con el contenido de E+I/E, demostrando el notorio valor de esta variable para reflejar el contenido y en especial el tipo de mineralogía presente en el suelo.

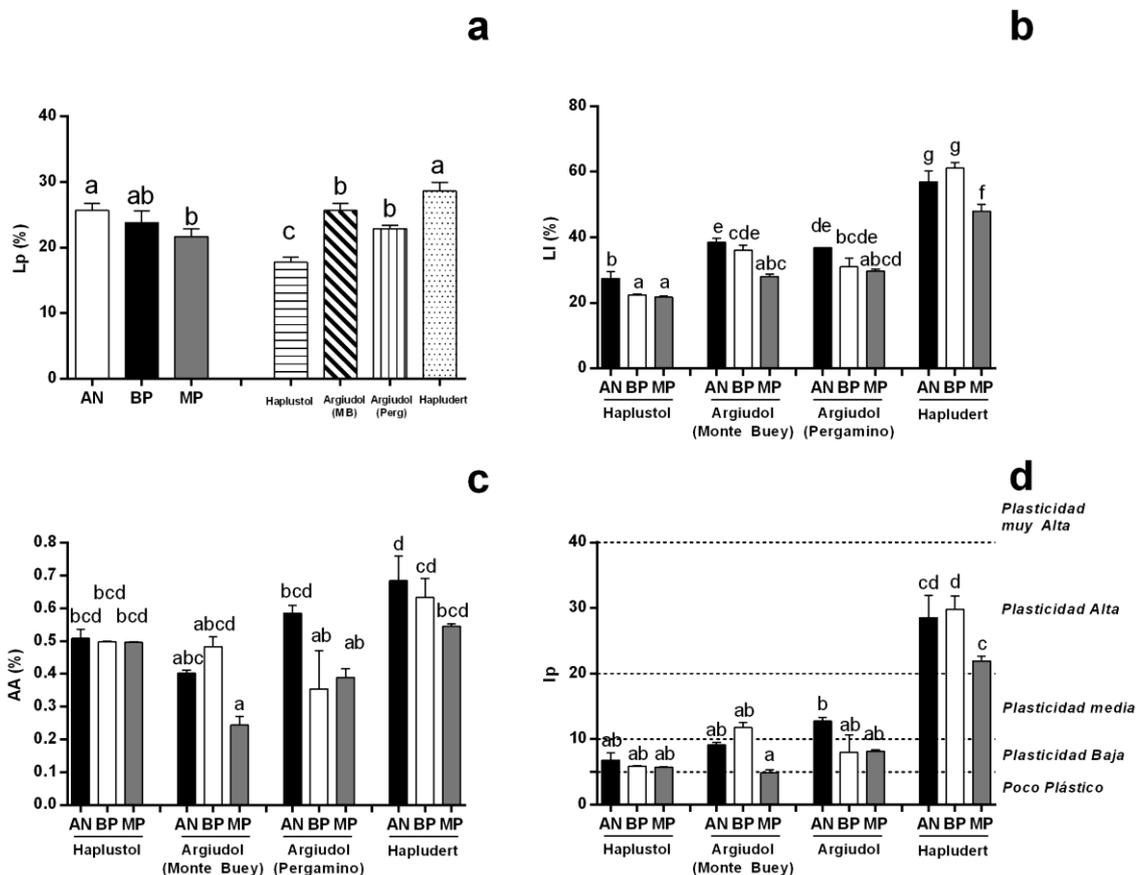


Figura 2.6 a) Límite plástico (Lp), b) límite líquido, c) actividad de arcillas (AA) y d) índice plástico para los tratamientos: Ambiente natural (AN), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert. Barras de error corresponde al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción tratamientos y suelos (b,c,d) o entre tratamientos y entre suelos (a) (Tukey, $p<0,05$).

Tabla 2.4 Características reológicas y mineralógicas de los suelos evaluados: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos: AN (Ambiente natural), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). Valores entre paréntesis corresponden al error estándar. Lp: límite plástico, Ll: límite líquido, Ip: índice de plasticidad, AA: actividad de arcillas, E+E/I: esmectitas más interstratificados illita-esmectita.

Suelo	Trat. Manejo	Lp		Ll		Ip		Calificación Ip	AA		
		(%)									
Haplustol	AN	20,7	(1,0)	27,5	(2,1)	6,8	(1,1)	B	0,51	(0,03)	
	BP	16,5	(0,3)	22,4	(0,3)	5,9	(0,0)	B	0,50	(0,01)	
	MP	16,1	(0,3)	21,8	(0,4)	5,7	(0,1)	B	0,50	(0,00)	
Argiudol (Monte Buey)	AN	29,5	(0,8)	38,6	(1,1)	9,1	(0,4)	B	0,40	(0,01)	
	BP	24,4	(0,8)	36,1	(1,5)	11,8	(0,8)	M	0,48	(0,03)	
	MP	23,1	(0,9)	28,1	(0,7)	4,9	(0,4)	B	0,24	(0,03)	
Argiudol (Pergamino)	AN	24,1	(0,5)	36,8	(0,0)	12,8	(0,5)	M	0,59	(0,02)	
	BP	23,1	(1,2)	31,0	(2,7)	8,0	(2,7)	B	0,35	(0,12)	
	MP	21,5	(0,4)	29,7	(0,6)	8,1	(0,3)	B	0,39	(0,03)	
Hapludert	AN	28,4	(0,3)	57,0	(3,2)	28,6	(3,4)	A	0,68	(0,08)	
	BP	31,3	(3,4)	61,2	(1,7)	29,8	(2,0)	A	0,63	(0,06)	
	MP	26,1	(1,4)	48,0	(2,1)	21,9	(0,7)	A	0,55	(0,01)	

2.3.4 Fraccionamiento densimétrico de limos.

Debido a la importancia del contenido de limo con respecto a otras fracciones granulométricas se procedió a analizar la composición de dicha fracción de forma densimétrica. Los primeros resultados de este fraccionamiento indicaron que los suelos poseían un bajo porcentaje de limos muy pesados ($>2,9 \text{ g cm}^{-3}$). Los mayores valores fueron encontrados para el Haplustol (11 %) diferenciándose significativamente del resto de los suelos, los cuales presentaron valores de 4,7, 6,8 y 4,4 % para el Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y el Hapludert respectivamente. Por otro lado, se evaluaron las proporciones de limos de baja densidad (LBD) $<2,3 \text{ g cm}^{-3}$ y limos de densidad media $>2,3 \text{ g cm}^{-3} <2,9 \text{ g cm}^{-3}$, encontrándose un alto porcentaje de estos últimos (Figura 2.7). Según el análisis estadístico efectuado, no se detectaron efectos del tratamiento ni interacción tratamiento*tipo de suelo. Sólo se encontró un efecto del tipo de suelo ($p < 0,05$). Así, los limos más livianos o de baja densidad oscilaron entre 10 - 30% con el siguiente ordenamiento Haplustol < Argiudol (Monte Buey) < Argiudol (Pergamino) < Hapludert diferenciándose significativamente el Haplustol del resto de los suelos ($p < 0,05$). Los resultados entre tratamientos no fueron muy claros, debido a la altos desvíos estándares encontrados para esta variable ($DE \sim 8,5$), si bien se pudo apreciar valores ligeramente mayores para el AN, con excepción del Haplustol (Figura 2.7). Si se analiza el porcentaje de LBD sobre el total del suelo, el Argiudol (Pergamino) presentó los mayores valores de LBD con valores promedio para todos los tratamientos de 16,1 % mientras que el Hapludert presentó valores muy semejantes con 15,4%. Los menores valores se encontraron para el Haplustol con 4,1% mientras que el Argiudol (Monte Buey) presentó valores intermedios (11,5 %).

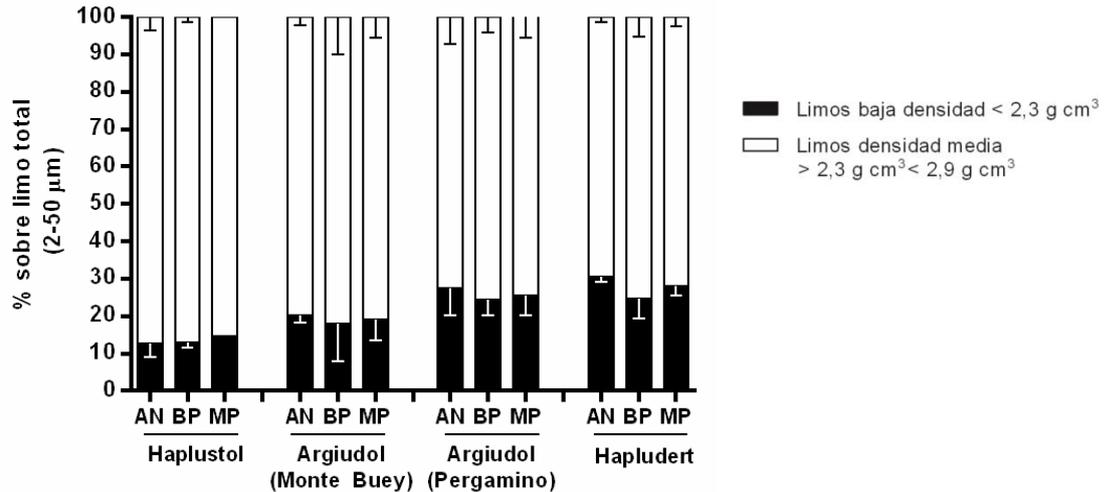


Figura 2.7 Cuantificación de limos de baja densidad $< 2,3 \text{ g cm}^{-3}$ y de densidad media $> 2,3 \text{ g cm}^{-3} - < 2,9 \text{ g cm}^{-3}$ en % del limo total para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert. Barras de error corresponde al error estándar.

Por otro lado se pudo observar que la composición de la fracción de limos de baja densidad en todas las muestras analizadas presentó una elevada concentración de biolitos, siendo los fitolitos los más dominantes (Figura 2.8 a). Además, como se observa en la Figura 2.8 b, se encontraron diversos ejemplos de microagregados de tamaño limos los cuales presentaban inclusiones de biolitos en su estructura.

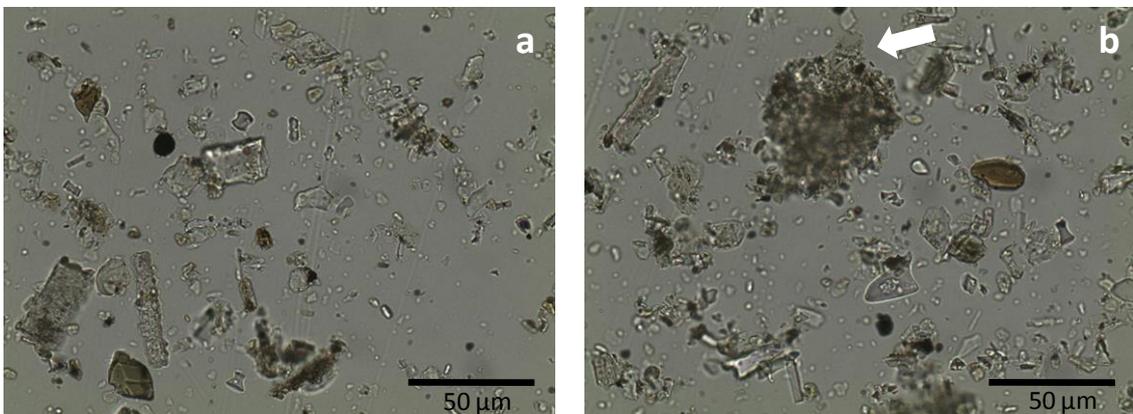


Figura 2.8 (a) Ejemplos de limos de baja densidad donde se observan biolitos, espirulinas, vidrios volcánicos, entre otros; (b) Microagregado de tamaño limo en donde se observan inclusiones de vidrios volcánicos y biolitos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en los suelos con mayor contenido de LBD (Argiudoles y Vertisol) pareciera existir una menor proporción de esta fracción en los tratamientos cultivados respecto a los AN. La diferencia podría atribuirse a una menor producción de fitolitos o a una disolución más intensa de estos componentes silíceos bajo condiciones de cultivo. Esto sin embargo no se observó en el Haplustol con escaso contenido de LBD.

2.3.5 Hierro total y fraccionamiento del hierro.

El contenido de hierro total de los distintos tratamientos, mostraron una homogeneidad de dicho elemento en los suelos evaluados (Figura 2.9 a) no encontrándose diferencias significativas entre los sitios o entre los tratamientos ($p>0,05$). Por otro lado, este elemento se encontró principalmente formando parte de los óxidos y en segundo lugar de la materia orgánica (Figura 2.9 b). Las fracciones ligadas al Fe fueron las mismas para el Haplustol y el Argiudol, mientras que en el Hapludert las fracciones solubles, ligada a los carbonatos y al complejo de intercambio fueron más altas con respecto a los otros suelos (Figura 2.9 b).

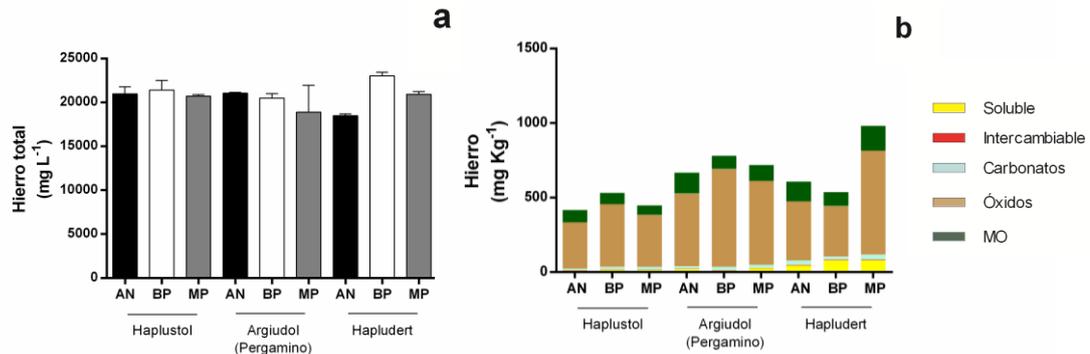


Figura 2.9 (a) Contenido total de hierro y (b) fraccionamiento de hierro, para los suelos: Haplustol, Argiudol (Pergamino) y el Hapludert; y para los tratamientos: AN (Ambiente natural), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP).

2.3.6 Análisis de componentes principales (ACP)

A partir de una selección de variables físicas y químicas del suelo de cada combinación suelo-tratamiento se procedió a efectuar el ACP a fin de describir y resumir las propiedades del sistema evaluado. La selección de las variables obedeció a tres factores principales: 1) se priorizaron aquellas variables que estuviesen correlacionadas con la granulometría ya que las mayores diferencias radicaron en la misma (eg. CIC, Ll, Ip); 2) se descartaron aquellas variables con alto error o muy correlacionadas entre sí (eg. illita y caolinita con E+I/E) y; 3) se descartaron algunas variables que su función en el comportamiento hidrofísico no es clara o es redundante, como el K⁺ y el Na⁺ con el PSI, respectivamente. Los dos primeros ejes fueron responsables de 81 % de la variabilidad de las muestras evaluadas. El primer eje (CP1) explicó el 61,6 % de la variabilidad y estuvo compuesto principalmente por la CIC, el Ll y el contenido de arcilla (Figura 2.10, Tabla 2.5). El segundo eje (CP2), el cual representó el 13,3% de la variabilidad, estaba compuesto por el Limo, PSI y la AA. Como se verificó en la Tabla 2.5, el biplot del ACP presentó correlaciones muy altas entre diversas variables asociadas al contenido de arcillas (CIC; Ll; Ip) y variables que generalmente se asocian a este contenido de arcillas como el Ca⁺², Lp y COT. Estas variables discurrieron principalmente sobre el CP1. EL ACP presentó 3 agrupamientos correspondientes a los tres grupos taxonómicos (grandes grupos) evaluados en esta tesis. También existió un ordenamiento de los tratamientos en cada uno de estos grupos taxonómicos, encontrándose el AN en valores más altos del CP1 y más bajos del CP2 y viceversa para MP. Para los tratamientos agrícolas esto indicó que los lotes con manejo de BP presentaron un mayor contenido de arcillas, sus variables asociadas y

mineralogías con mayor proporción de E+I/E, mayor COT, mayor Ca^{+2} , además de menor cantidad de limos. También dicho tratamiento se encontró relacionado con valores más altos de PSI, el cual puede explicarse por la posición en el paisaje un poco más baja de los AN y BP con respecto a MP, en donde existiría una acumulación de sales con respecto a los otros tratamientos, aunque dicha acumulación puede considerarse despreciable (capítulo 1, Tabla 1.3).

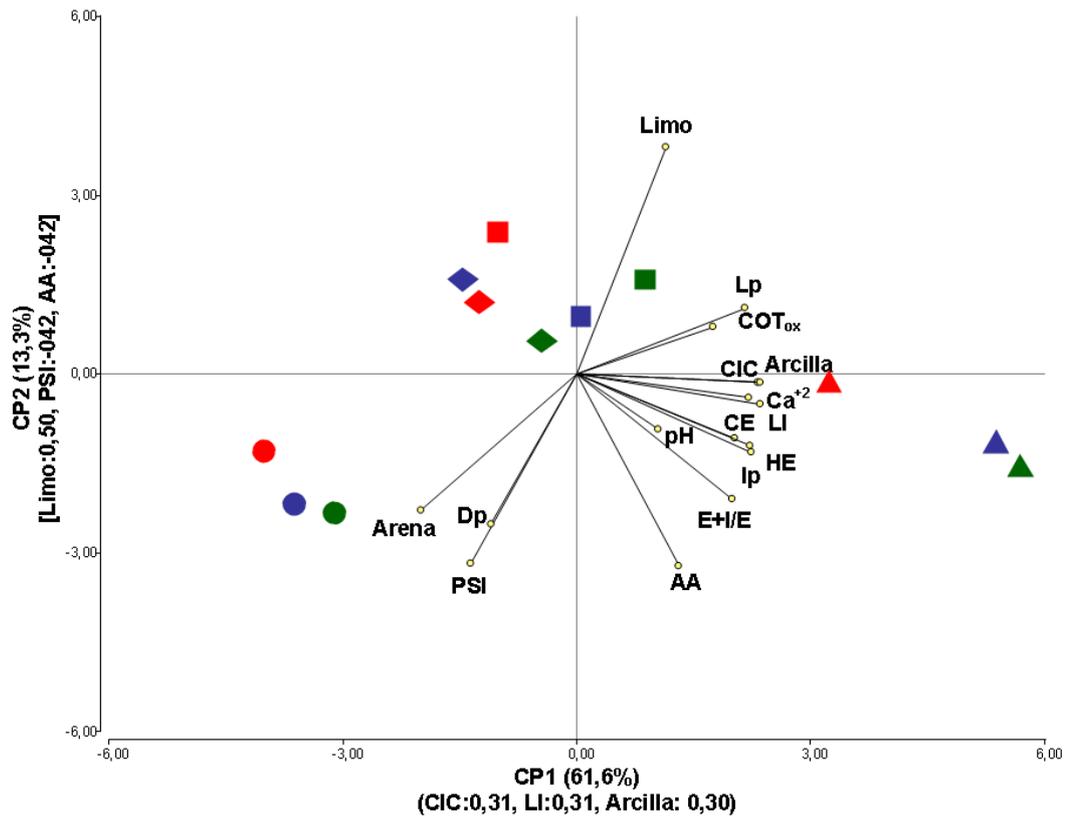


Figura 2.10 Resultados del análisis de componentes principales. Los diferentes colores indican los tratamientos analizados (AN - Ambiente natural: verde, BP- Buenas prácticas: azul, y MP - Malas prácticas: rojo) mientras que los distintos símbolos indican el tipo de suelo: (● Haplustol; ■ Argiudol (Monte Buey); ◆ Argiudol (Pergamino) y ▲ Hapludert. La longitud de los vectores muestra la magnitud de representación de cada variable para cada componente y los ángulos entre las variables indican la correlación existente entre estas. Ángulos de 90° entre dos variables indican que las mismas no se encuentran correlacionadas.

Tabla 2.5 Autovectores correspondientes al análisis de componentes principales. La significancia corresponde al análisis de correlación efectuado entre los componentes principales y cada variable. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, HE: humedad equivalente, COT: carbono orgánico total, Lp: límite plástico, Ll: límite líquido, Ip: índice de plasticidad, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificados illita-esmectita.

Variables	CP1		CP2	
Arcilla	0,30	***	-0,02	
Limo	0,15	**	0,50	***
Arena	-0,26	***	-0,30	**
COT	0,23	***	0,10	
CE	0,27	***	-0,14	
pH	0,14	*	-0,12	
Ca ⁺²	0,29	***	-0,05	
PSI	-0,18	***	-0,42	***
CIC	0,31	***	-0,02	
HE	0,29	***	-0,16	
Dp	-0,14	*	-0,33	**
Lp	0,28	**	0,15	
Ll	0,31	***	-0,07	
Ip	0,29	***	-0,17	
AA	0,17	**	-0,42	***
E+I/E	0,26	***	-0,27	*

2.3.7 Curvas de contracción de agregados.

Así como en el ACP, las pendientes de las curvas de contracción de los agregados se agruparon en primer lugar según su grupo taxonómico, presentado valores muy altos para el Hapludert, intermedio para los Argiudoles y bajos para el Haplustol (Tabla 2.6, Figura 2.11). Entre los Argiudoles, se pudo observar mayores pendientes en el Argiudol (Monte Buey), especialmente comparando los BP. Esta variable presentó una correlación cercana a 1 con el contenido de arcillas y con la CIC, mientras que también presentó coeficientes de correlación muy altos con las variables reológicas del suelo ($r = 0,59$ AA hasta $r = 0,97$ para Ll). Además la pendiente de las curvas presentó una correlación muy alta con la proporción de E+I/E. Los limos livianos por su parte presentaron una alta correlación negativa con la pendiente y el ΔVol , pero cuando no se considera el suelo Hapludert que presentó los menores valores de este tipo de limos la correlación pierde significancia.

Por otro lado, en términos generales las variables que expresan la capacidad de expansión-contracción fueron mayores en el tratamiento BP con respecto a MP, indicando una menor capacidad de contracción-expansión para dicho tratamiento (Tabla 2.6, Figura 2.11). Esto pudo verificarse mediante la variable ΔVol donde MP presentó los menores valores mientras que el AN presentó la mayor amplitud de cambio de volumen con excepción del Hapludert, donde el mayor cambio de volumen registrado fue en BP. Esta variable se correlacionó con las mismas variables físicas y químicas que la pendiente de las curvas (Tabla A.2), si bien, se obtuvieron coeficientes menores para el contenido de arcillas y mayores para E+I/E. En este mismo sentido la θ_{max} se comportó de la misma forma que ΔVol , con la única diferencia que el MP del Argiudol (Monte Buey) presentó los valores más altos para los tratamientos de dicho suelo.

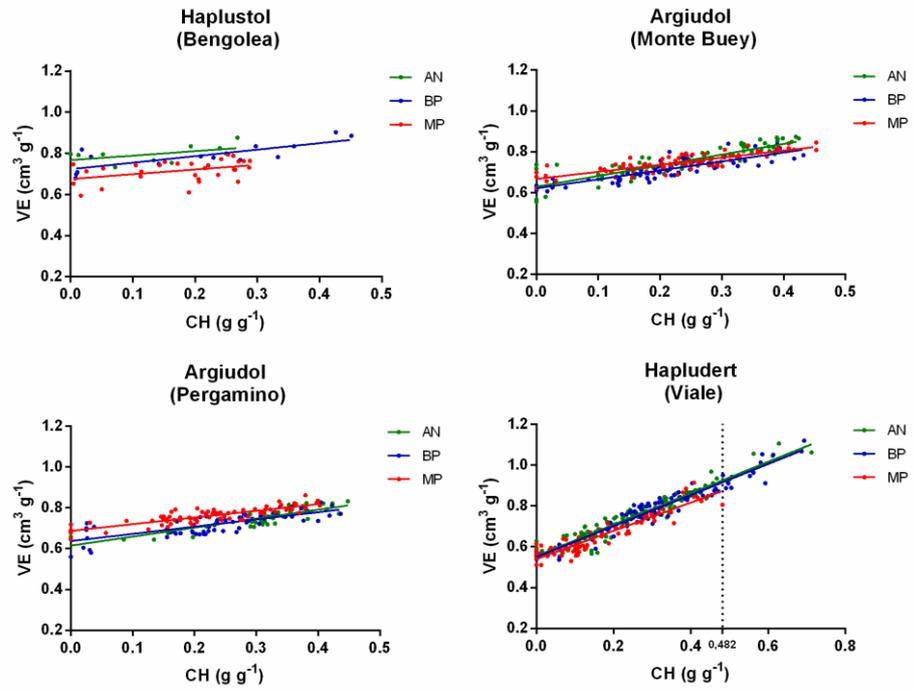


Figura 2.11 Curva de contracción de agregados (1-5 cm) los suelos evaluados: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos: AN (Ambiente natural), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP).

Tabla 2.6 Características de expansión y contracción de los suelos evaluados: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas y MP (Malas prácticas). Vmax: volumen máximo, Vmin: volumen mínimo, Δ Vol: Diferencia entre Vmax y Vmin, θ max: humedad gravimétrica máxima.

Suelo	Tratamiento	Pendiente	Ordenada	Vmax	Vmin	Δ Vol	θ max
				cm ³ g			g g ⁻¹
Haplustol	AN	0,24	0,76	0,93	0,77	0,16	0,50
	BP	0,32	0,72	0,89	0,68	0,20	0,45
	MP	0,23	0,68	0,76	0,67	0,10	0,29
Argiudol (Monte Buey)	AN	0,41	0,67	0,87	0,71	0,16	0,43
	BP	0,47	0,62	0,80	0,62	0,18	0,41
	MP	0,37	0,66	0,83	0,66	0,17	0,45
Argiudol (Pergamino)	AN	0,44	0,61	0,83	0,65	0,18	0,45
	BP	0,39	0,63	0,79	0,63	0,16	0,43
	MP	0,32	0,69	0,82	0,68	0,13	0,40
Hapludert	AN	0,73	0,56	0,94	0,59	0,35	0,55
	BP	0,77	0,54	1,02	0,55	0,47	0,64
	MP	0,65	0,55	0,79	0,56	0,23	0,41

2.4 Discusión

2.4.1 Características generales de los suelos

A través de los resultados obtenidos se reflejan claramente las diferencias composicionales y taxonómicas entre los suelos estudiados. De esta forma, se puede advertir que el Hapludert posee una condición química favorable a la floculación y agregación ya que fue el suelo que presentó proporciones de Ca⁺², Mg⁺² y CIC más altos que los otros suelos; aunque también presentó un contenido de Na⁺ alto, sin embargo el PSI de dicho suelo fue bajo, no existiendo problemas de pérdida de estructura por efecto del Na⁺ (Tabla 2.2). En contraposición el Haplustol, presentó valores de CIC, bases de cambio (Ca⁺² y Mg⁺²) bajas y valores de Na⁺² y PSI un poco más altos lo que podría indicar dificultades en la formación y estabilización de agregados, lo cual se vería agravado por la textura franco-arenosa de este suelo (Tabla 2.2). Para los Argiudoles, sus características químicas favorecerían en principio una adecuada condición estructural y calidad del suelo.

En cuanto a la determinación mineralógica de la muestra total del suelo, se encontraron las mismas fases, si bien la relación cuarzo/feldespato aumentó de oeste a este (Haplustol hacia el Hapludert). Por el contrario, a partir del análisis de la fracción arcilla se pusieron en evidencia dos grupos bien diferenciados: aquel con una composición de arcillas en las que predomina la illita (Molisoles), y otro donde también existen minerales esmectíticos (Vertisol). A su vez, la cantidad de arcillas separó tres grupos en correspondencia con su ubicación taxonómica (Haplustol, Argiudoles y Hapludert). Con estos dos elementos (cantidad y tipo de arcillas) se puede definir, tal como refleja el ACP un gradiente textural que se podrá utilizar para interpretar el efecto de la composición sobre las variables físicas y estructurales que caracterizaron los distintos manejos bajo SD en los suelos aquí estudiados. Se debe tener en cuenta en esta

interpretación que los AN y BP presentaron contenidos de arcilla levemente superiores a MP. Este hecho puede estar relacionado a un proceso de degradación del suelo debido a la erosión hídrica laminar que está presente en MP, movilizandando las partículas más pequeñas y menos densas como las arcillas (Nearing et al., 1990).

Los resultados del límite líquido (Ll) y el límite plástico (Lp) fueron los esperables según el contenido de arcillas y la CIC del suelo, encontrándose coeficientes de correlación muy altos entre estas cuatro variables (Tabla A.1). La alta correlación encontrada entre el Ll con el contenido de arcillas y la CIC –además de su relación con la MO– se debe a que el mismo es dependiente de los constituyentes minerales del suelo, de la intensidad de las cargas superficiales, del espesor de la lámina de agua retenida y de la relación área superficial/volumen de las partículas. Aquellos minerales que tienen una mayor carga superficial y partículas de bajo tamaño tendrán una mayor proporción de agua retenida en forma viscosa, y por lo tanto mayor será su límite líquido (Means y Parcher, 1965). Por su parte, si bien los valores de plasticidad fueron más altos en el Hapludert, se asemejaron a los de los Molisoles.

Debe notarse que las propiedades reológicas determinadas se relacionaron adecuadamente con la cantidad y composición de las arcillas de los distintos suelos. Dichas variables presentaron una alta correlación con el Ll, Lp, Ip y AA, siendo el Ip la variable encontrada más adecuada para la descripción del efecto del tipo y calidad de las arcillas (Tabla A.1).

2.4.2 COT y HE

Como se mencionó con anterioridad el COT y la HE fueron las variables que mejor describieron el efecto del manejo del suelo. Numerosos autores señalan la relevancia del carbono orgánico como indicador de calidad de suelos (Doran y Pakin, 1994) y como herramienta útil para discernir entre tratamientos agrícolas (Duval et al., 2013). Si bien existió una fuerte correlación del COT principalmente con el contenido de arcillas, el efecto del tratamiento fue lo suficientemente importante para expresar modificaciones en esta variable. De la misma forma, que lo mencionado por Sollins et al. (1996), el carbono orgánico incrementó su estabilización en los suelos con el aumento del contenido de arcilla, generando un efecto protector del carbono orgánico al disminuir así la tasa de descomposición y generando una mayor acumulación en los distintos horizontes.

Dentro del proyecto general en el cual se encuadra esta tesis (Proyecto BIOSPAS), existe un grupo dedicado exclusivamente a la evaluación del efecto de distintos manejos bajo SD en las distintas fracciones de carbono del suelo (Proyecto I Grupo 2, Director Dr. Galantini). Por ello, no se profundizará más esta temática, mientras que en los capítulos subsiguientes, se utilizará esta variable (COT) en conjunto con distintas fracciones del carbono, como el carbono particulado grueso y fino (COP_g y COP_f), carbono mineralizable (COM), medidos por combustión seca (LECO carbon analyzer) y carbohidratos totales y solubles (CH_t y CH_s) para comprender el funcionamiento de algunas variables estudiadas en esta tesis.

En cuanto a la HE, si bien se logró analizar dicha variable independientemente al tipo de suelo y se observaron altas correlaciones con el COT, esta variable también se correlacionó fuertemente con el contenido de arcillas, lo que relativiza su utilidad como indicador de manejo. También debe destacarse que su medición se realiza sobre muestra

tamizada (<2 mm) por lo que su relación con la dinámica hídrica del suelo estaría restringida a la microporosidad.

2.4.3 *Fracción limos*

Todos los suelos estudiados poseen un importante contenido de limos (Tabla 2.2, Figura 2.1). Diversos trabajos señalan el efecto negativo de la fracción limo en la agregación del suelo y la estabilidad estructural (Alvarez et al., 2009). Además esta fracción ha sido relacionada con una baja resiliencia debido a la baja capacidad de expansión y contracción de los minerales que la componen (Taboada et al., 2004; 2008). En el mismo sentido, dicha fracción es relacionada con altas susceptibilidades de degradación física debido a su baja resistencia mecánica (Stengel et al., 1984). Esto se ve agravado debido a la composición de la misma. Todos los suelos presentaron un importante contenido de limos de baja densidad (Figura 2.7), lo cuál también explica los bajos valores de densidad de partícula encontrada en los suelos (Tabla A.1). Cosentino y Pecorari (2002) demostraron un aumento en la fragilidad física del suelo ante aumentos en la composición de dicho tipos de limo. Esto se debe principalmente a la presencia de fitolitos muy frágiles los cuales son evidentes y abundantes en esta fracción de baja densidad (Figura 2.8). Si bien todavía no se cuantificó en las muestras el porcentaje de ocurrencia de dichos biolitos, se pudo estimar un porcentaje cercano al 50% en dicha fracción (Osterieth, comunicación personal).

Por todo esto, se puede considerar que los suelos más limosos (Argiudoles de Monte Buey y Pergamino) serán propensos a poseer bajos valores de estabilidad estructural y las prácticas agrícolas tendrán un efecto importante en la agregación, porosidad y la aireación de estos suelos.

2.4.4 *Curvas de contracción de agregados*

Como se esperaba, la pendiente de la curvas de contracción estuvieron fuertemente correlacionadas con el CPI, el cual tiene como principales variables, el contenido de arcillas, la CIC y el LI. De la misma forma Castiglioni et al. (2004; 2005b) en Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada encontraron correlaciones significativas entre diversos parámetros de las curvas de contracción con la CIC y la HE, propiedades estas que integran tanto la cantidad como el tipo de arcillas presente. También Seed et al. (1963), sugirió que los elementos responsables de la expansión de los suelos eran el contenido de arcilla y su mineralogía. Estos autores, desarrollaron una ecuación predictiva en la que incluyeron el porcentaje de arcilla y un índice de actividad (similar a la actividad de arcillas), presumiendo que este índice era una expresión de la expansibilidad de la fracción arcilla. Sin embargo, Parker et al. (1977), trabajando con diferentes ecuaciones predictivas de cambio de volumen sobre suelos de Virginia con distinta mineralogía de arcillas, no encontraron que la ecuación desarrollada por Seed et al. (1963) tuviera un alto poder de estimación, teniendo mejor comportamiento la que incluía el índice de plasticidad. Esto corrobora nuevamente la relevancia del I_p como variable explicativa del gradiente textural y mineralógico presente en la tesis. También se debe destacar los altos coeficientes de correlación entre el ΔVol y la composición de la fracción arcillas (E+I/E). De esta forma también se pone de manifiesto la importancia del tipo de mineralogía en la expansión y contracción del suelo y por ende en la generación de estructura.

Por otro lado, a semejanza del COT y de la HE, las variables de las curvas de contracción explicaron en gran medida las diferencias entre tratamientos. Si bien los agregados analizados eran relativamente pequeños (1-5 cm), los mismos no se

comportaron como una pasta de arcilla ya que las pendientes fueron diferentes a 1. Por ello se puede afirmar que existe una porosidad estructural en esos agregados, los cuales mediante su comportamiento de expansión y contracción posibilitaron la diferenciación entre tratamientos. En este sentido, la pendiente y el ΔVol fueron las variables que discriminaron los distintos tratamientos, encontrándose mayores valores para ambas en manejos en BP con rotaciones donde se incluía al maíz con más frecuencia y donde existía una mayor intensificación del cultivo (ISI).

En ausencia de ciclos de congelamiento y descongelamiento en la región pampeana, la formación abiótica de los agregados está relacionada con la alternancia de ciclos de humedecimiento y secado que producen grietas o fisuras debido a la expansión y contracción del suelo (Dexter, 1988; Oades, 1993). En este sentido, como se desarrolló en este capítulo el Hapludert será el suelo con mayor capacidad de agregación abiótica al presentar los mayores índices de expansión y contracción. Por otro lado, los Molisoles con una preponderancia de minerales illíticos y un alto contenido de limos, a priori, no permitiría procesos intensos de expansión y contracción. No obstante, los Argiudoles y el Haplustol en menor grado, presentaron un comportamiento físico no rígido. En primer lugar esta expansión puede ser resultado de la presencia de la MO y de la presencia de minerales interestratificados en todos los suelos evaluados. Diversos autores, encontraron los mismos resultados en esta región (Cosentino y Pecorari, 2002; Taboada et al., 2004, 2008). Una hipótesis alternativa propuesta para explicar este proceso de expansión y contracción en suelos illíticos y limosos, corresponde a una expansión diferencial debido a un humedecimiento rápido como fuera descrito por Dexter (1988). Esta expansión depende de la generación de un estrés debido al contacto de agua (potencial mátrico=0) y horizonte de suelo muy seco (potencial mátrico muy negativo). Así se genera aire atrapado en los poros originando una formación de fisuras o grietas paralelas al frente de mojado. Este mecanismo ha sido identificado como generador de expansión volumétrica en suelos de la región pampeana (Taboada et al., 2001; Fernández et al., 2010).

2.4.5 Hierro total y su fraccionamiento

Como se discutió anteriormente, no existieron diferencias en el Fe total. Por ello, si bien algunos autores como Cañasveras et al. (2009), señalan la importancia del hierro en la agregación y sus propiedades físicas derivadas de esta. El efecto sería muy bajo y homogéneo para todas las situaciones evaluadas. No obstante, en el Hapludert, el contenido de hierro podría afectar de forma diferente los mecanismos de agregación ya que como se presentó en la Figura 2.9, existe un porcentaje de hierro soluble e intercambiable que estaría más activo en los procesos de agregación y estabilización de la estructura.

2.5 Conclusión

En el presente capítulo se estudiaron diversos atributos químicos, físicos y mineralógicos de los suelos que permiten una primera interpretación del comportamiento de otras variables estructurales e hidrofísicas en relación a los tratamientos de manejo evaluados. En el análisis estadístico uno de los componentes principales explicó casi la totalidad de la variación composicional de los suelos, evidenciando un gradiente textural y mineralógico. Además, algunas variables relacionadas con la expansión y contracción (pendiente y ΔV_o) lograron explicar de forma satisfactoria las diferencias entre los tratamientos de manejo, aún en el suelo franco-arenoso, aunque con resultados no tan claros comparado al resto de los suelos. También se comprobó la alta ocurrencia de limos de baja densidad que podría ser responsable de la fragilidad de los suelos evaluados y conllevar a problemas de aireación del suelo. Por todo lo mencionado, se corroboran las tres hipótesis formuladas (*hipótesis 2.I, 2.II y 2.III*). El conjunto de los datos obtenidos permite desde ya inferir diferencias en los procesos de formación y estabilización de la estructura entre suelos y tratamientos, lo que será analizado a continuación.

Capítulo 3

MODIFICACIONES DE LA CALIDAD HIDROFÍSICA EN SUELOS DE TEXTURA Y MINERALOGÍA CONTRASTANTES BAJO SIEMBRA DIRECTA

3.1 Introducción

Los procesos de degradación del suelo en la Región Pampeana se dieron como consecuencia de numerosos años de agricultura en sistemas tradicionalmente agrícolas y manejados bajo labranza convencional. En la década del '80, estos procesos se agravaron debido a la intensificación de la agricultura (Taboada y Lavado, 2009). La pérdida de materia orgánica, la formación de costras, la compactación de capas de suelos e irregularidades en el crecimiento de los cultivos de grano han sido descritas por muchos trabajos como consecuencias de esta degradación de los suelos (Díaz-Zorita, 1996; Krüger, 1996; Quiroga et al., 1996a). En contraposición, a partir de la década del 90', se comenzaron a implementar manejos más conservacionistas, entre los cuales surge la SD como el sistema que fue más adoptado y cuya implementación sigue creciendo con los años (Viglizzo et al., 2011). La SD fue implementada para controlar diferentes procesos de degradación de los suelos tales como disminuir la erosión y conservar la fertilidad de estos suelos (Hall et al., 1992). Si bien la introducción de la SD trajo aparejado algunos aspectos positivos como por ejemplo el incremento de la cantidad y diversidad de la fauna del suelo (Morrás et al., 2001), existen numerosos trabajos que muestran que no siempre la SD resultó adecuada y se reportan diferentes inconvenientes de fertilidad física en suelos bajo este sistema (Barbosa et al., 1997; Cosentino y Pecorari, 2002). Por ejemplo, propiedades del suelo relacionados a la compactación o al endurecimiento del suelo han sido reportadas bajo este manejo (Nesmith et al., 1987; Mahboubi et al., 1993; Chagas et al., 1994). Si bien generalmente se encuentra un aumento del contenido de agua en la capa superficial, también, en algunas situaciones, se observa una mayor compactación y un consecuente aumento de la resistencia a la penetración. Si este aumento es realmente significativo podría generar problemas físicos en el suelo tales como la disponibilidad de agua, aire y nutrientes para los cultivos (Oussible et al., 1992). Por todo lo expuesto anteriormente, la intensidad y la dirección de los procesos de compactación, densificación y endurecimiento del suelo bajo este sistema todavía permanecen como un interrogante a ser estudiado.

Sin embargo, los cambios edáficos debidos al uso de la tierra no sólo dependen del sistema de cultivo utilizado sino también del tipo de suelo, de las condiciones climáticas imperantes, del nivel de degradación inicial de las tierras y de la secuencia y rendimiento de los cultivos (Díaz-Zorita et al., 2004).

La SD puede ser manejada con diferentes intensidades de uso, secuencias de cultivo, sistemas de tránsito de maquinaria, tecnologías de fertilización y control de plagas. De esta forma un mismo sistema puede desembocar en procesos de modificación del suelo muy diferentes. Como consecuencia de las distintas secuencias de cultivo bajo SD, se ven afectadas la cantidad, calidad y permanencia de rastrojos aportados en las cosechas, la amplitud de períodos de barbecho, como así también la distribución y el tipo de sistema radical que afecta la estructura del suelo (Domzal et al., 1991). La cantidad de rastrojo se ve favorecida por prácticas como el doble cultivo o rotaciones que incorporen el maíz o el sorgo, ya que aportan el doble de materia seca respecto del cultivo de soja de primera. Por su parte, la fertilización incrementa el crecimiento y la generación de biomasa de los cultivos, produciendo, por lo tanto, mayores aportes de rastrojo al suelo. Así en los últimos años, es cada vez más frecuente el uso de índices de manejo que contemplan el tipo e intensidad de uso de la tierra. Entre ellos se puede citar al índice de intensificación del cultivo (ISI), el cual relaciona la cantidad de meses con raíces vivas en relación a un año (Sasal, 2012) o la relación soja/número de cultivos (Novelli et al., 2011) que trata de aislar el efecto de este cultivo en los cambios de diversas características edáficas.

No obstante, los estudios del efecto de diferentes sucesiones de cultivos bajo el sistema de SD sobre distintas propiedades físicas del suelo no son abundantes. Menos bibliografía se encuentra aún si se pretende analizar la respuesta hidrofísica de diferentes suelos a las modificaciones producidas en el sistema de sucesión de cultivos. Por ejemplo, Novelli et al. (2011) mencionan que si bien son varios los trabajos en los que se ha analizado la respuesta en el nivel de carbono edáfico y la distribución de agregados por efecto de los diferentes sistemas de cultivo y la fertilización, hay poca evidencia sobre el efecto del incremento en la frecuencia del cultivo de soja sobre estas variables en suelos con características contrastantes.

Por todo lo expuesto, se desconocen aún las consecuencias de una mayor intensificación agrícola, que puede acarrear por un lado problemas de compactación del suelo y por otro beneficios en ciertas propiedades físicas resultantes del incremento de la fauna del suelo y de la permanencia temporal de raíces vivas en secuencias con mayor grado de rotación de cultivos.

3.1.1 Calidad Hidrofísica

En los últimos años, a la luz de la intensificación agrícola y la degradación del suelo, los productores agropecuarios han reconocido la necesidad de promover buenas prácticas agrícolas, incluyendo rotaciones y reposición de nutrientes, paralelamente al monitoreo de la salud del suelo para asegurar una alta productividad a largo plazo (Wall, 2011). La calidad del suelo se refiere a la capacidad funcional que éste posee, para sostener la productividad vegetal y animal en ecosistemas naturales o manejados por el hombre, y mantener o mejorar la calidad del aire y agua haciendo posible la vida humana (Karlen et al., 1997).

Si bien existen estudios que intentan elucidar cómo los sistemas de labranza, las rotaciones de cultivo y la fertilización modifican la calidad física de los suelos de diversas texturas y mineralogías, en general miden propiedades aisladas que dificultan obtener conclusiones que puedan plasmarse en guías prácticas de manejo. También son escasos los trabajos que contemplen índices hidrofísicos más abarcativos con la diversidad de situaciones a campo expuestas. Una de las razones, que explican esta escasez, se debe a que los avances en el desarrollo de nuevas estrategias prácticas para mantener o mejorar la calidad del suelo en manejos agrícolas intensivos ha sido difícil y lento debido a la complejidad de las interacciones entre los sistemas de manejo, tipo de suelo, tipo de cultivos y clima (Wallace y Terry, 1998)

En este sentido, las diferentes formas para evaluar la calidad hidrofísica de los suelos son afectadas por ambiente y tipo de suelo y su comportamiento varía en función de la escala espacial y temporal de estudio. Por ejemplo, a nivel de lote, propiedades como el contenido de materia orgánica o la densidad aparente poseen una variación en profundidad importante, exacerbada principalmente en manejos bajo SD (Alvarez et al., 2009). Por ello deben emplearse más de una propiedad para evaluar la calidad hidrofísica de sistemas en ambientes diferentes y resulta necesaria la estratificación del muestreo para obtener resultados más precisos. En este sentido es esperable que diferentes combinaciones de estas propiedades deriven en calidades diferenciales según el tipo de suelo y el manejo. A partir de las relaciones entre las variables hidrofísicas es posible establecer rangos de calidad para las cuales el crecimiento de los cultivos no se vea restringida. De esta forma, el estudio de la combinación de distintas variables edáficas permitiría poner el foco en aquella propiedad física que esté limitando el crecimiento vegetal, proveyendo en consecuencia directrices de manejo.

Una forma integradora de evaluar la calidad hidrofísica de los suelos, la cual está directamente relacionada con los rendimientos agrícolas es la propuesta por Letey (1985). Este autor discute de forma pragmática las propiedades físicas del suelo que afectan el desarrollo de las plantas. El mismo propone la evaluación de cuatro factores que afectan directamente el crecimiento de las plantas: agua, oxígeno, temperatura y resistencia a la penetración (RP). De estas cuatro condiciones físicas relacionadas al crecimiento de las plantas el agua es considerada como la dominante. Los otros tres factores son afectados por el contenido hídrico (CH). Silva et al. (2001) afirmaron que todos los factores físicos del suelo, directamente relacionados al crecimiento de las plantas, dependen del CH del suelo y son condicionados por la compactación del mismo. En un suelo compactado, existe un aumento de la masa por unidad de volumen acarreado una mayor densidad aparente (DAP) y RP del suelo con una reducción lineal de la porosidad total y de la macroporosidad (Stone et al., 2002).

3.1.1.1 Densidad aparente y resistencia a la penetración

La DAP si bien no se incluye directamente en los factores a tener en cuenta según Letey (1985), es una de las variables más utilizadas para evaluar la calidad del suelo. No obstante, su uso para evaluar la compactación entre diferentes manejos puede estar afectado por las características intrínsecas del suelo, ya que la misma está influenciada de manera importante por la textura y materia orgánica del suelo (MO). A su vez, variaciones de la DAP pueden estar relacionadas a diferentes CH, llevando a cambios de volumen del suelo que están asociados a mecanismos de expansión – contracción (Oades, 1993; Logsdon y Karlen, 2004). La magnitud de estos cambios depende fuertemente del porcentaje de arcillas y la proporción de minerales expansibles (e.g. arcilla tipo esmectita) (Parker et al., 1982). Las distintas texturas de los suelos generan DAP diferentes, más allá del estado de densificación.

En cuanto a la ubicación de esta compactación bajo SD, algunos autores señalan una estratificación de la MO en profundidad y un deterioro estructural, localizado particularmente en el estrato 5-10 cm (Wander y Bollero, 1999; De Battista, 2005; Alvarez et al., 2009). En ambientes naturales la DAP tiende a aumentar en profundidad, debido al peso de los estratos sobreyacentes y a disminución de MO que tiende a reducir el volumen de poros (Cavenage et al., 1999). En este sentido, todavía resulta de interés el estudio de este fenómeno, principalmente en suelos con distinta textura y mineralogía.

En relación a la RP, la misma constituye uno de los atributos físicos considerados en la evaluación de la calidad de suelos y su manejo. El mismo es habitualmente adoptado como indicador de procesos de compactación por presentar relaciones directas con el crecimiento de las plantas (Imhoff et al., 2000; Stone et al., 2002). La RP es afectada especialmente por el CH, aunque también por la textura y la condición estructural del suelo (Tardieu, 1994). Diversos autores encontraron altos valores de RP en SD con respecto a cultivos laboreados en suelos pampeanos (e.g. Chagas et al., 1994; Krüger, 1996; Quiroga et al., 1998; Taboada, et al., 1998; Schmidt et al., 2006; Alvarez et al., 2009), como en suelos de otros países (e.g. Scott et al., 1975; Hill et al., 1985; Grant y Lafond, 1993).

3.1.1.2 Porosidad total, textural y estructural

Soane et al. (1982) sostiene que la compactación altera el volumen y la estructura de los poros del suelo, reduciendo el tamaño y el número de los macroporos, afectando también su forma y continuidad. De esta manera se modifica el estado de agregación y

las interacciones existentes entre las fases sólida, líquida y gaseosa, disminuyendo la conductividad, permeabilidad y difusión del agua y aire a través del sistema poroso.

Por lo mencionado, la cuantificación de la porosidad del suelo juega un rol fundamental en la caracterización de su funcionamiento físico. Sin embargo, el origen de esta porosidad varía entre tipos de suelos y manejos siendo de interés el conocimiento de la conformación de la porosidad según su origen. Existen dos grandes grupos de factores que afectan la conformación de la porosidad total del suelo: 1) su constitución granulométrica, orgánica y mineralógica, que condicionan la forma de agrupamiento de las partículas elementales del suelo, generando así un sistema de porosidad que puede ser calificado como textural (P_{tx}) y 2) los factores climáticos, biológicos y mecánicos que actúan sobre el suelo, y de cuyas acciones resulta un segundo sistema de porosidad, llamado estructural (P_{estr}) (Stengel, 1988). De esta forma, se puede discriminar el efecto del suelo para poder interpretar mejor el efecto del manejo sobre la modificación del sistema poroso. Además, por ejemplo, Aparicio y Costa (2007) encontraron en suelos de la región pampeana una clara relación entre la conductividad hidráulica saturada y la P_{estr} sugiriendo su medición para el monitoreo de la calidad del suelo.

3.1.1.3 Distribución de tamaño de poros, distribución estadística de tamaño de poros

Si bien es de interés el análisis de la porosidad total, estructural y textural, las prácticas agrícolas en general modifican diferentes rangos de tamaño de poros, siendo necesaria su cuantificación para el análisis del efecto del manejo. Además, las características de los poros están fuertemente asociadas a la calidad hidrofísica del suelo. De esta forma, la degradación del sistema poroso puede ocasionar mermas en la producción, favorecer el escurrimiento y la pérdida del suelo del sistema debido a procesos de erosión (Botta et al., 2006; Botta et al., 2007). En este sentido son muchos los métodos e indicadores desarrollados para detectar cambios en la red de poros y en el movimiento de agua asociados con la misma (Bodhinayake et al., 2004; Dexter et al., 2008). Una de estas metodologías es el análisis de las curvas de retención hídrica (CRH), las cuales producen información precisa sobre la distribución de tamaño de poros (Dexter, 2004). De esta forma se pueden analizar los cambios en dicha distribución con el fin de evaluar la degradación estructural del suelo (Sasal et al., 2006; Dexter et al., 2008). Por ejemplo, la macroporosidad, si bien en proporción a la porosidad total (PT) es baja, es el principal mecanismo de regulación de la entrada de agua al suelo (Moret y Arrúe, 2007). Su relevancia se debe a que esta fracción es la primera en ser destruida cuando el suelo se degrada físicamente por el tráfico de maquinarias o el pisoteo animal (Botta et al., 2004).

Así, uno de los principales efectos de la compactación sobre la porosidad es la reducción del número de macroporos mayores a 50 micrones no afectando de forma marcada aquellos poros de un tamaño menor al mencionado. Con este proceso se ve reducida la aireación del suelo al disminuir el volumen de macroporos del mismo. Se afecta además el agua disponible para los cultivos ya que ésta se encuentra mayoritariamente en los macro y mesoporos y no en microporos donde el agua no se encuentra disponible. En este sentido el manejo puede afectar este tipo de porosidad. Por ejemplo, diferencias significativas en la porosidad de los primeros 10 cm fueron encontradas en favor de un suelo bajo SD y con residuos en superficie respecto de un suelo con pocos residuos o labrados (Fuentes et al., 2009).

A su vez, Reynolds et al. (2009) sugirió el uso de la distribución de volumen de poros para medir los cambios en la calidad hidrofísica del suelo. En este sentido se

sugirió la comparación de dicha distribución ante una distribución óptima desarrollada a partir de los suelos que presentaban las mejores características físicas o suelos sin cultivar. Así, para la evaluación de la calidad del suelo, se comenzó con la utilización de variables que corresponden a la distribución de poros, como por ejemplo la identificación del poro modal (D_{moda}), mediana (D_{mediana}) y media (D_{media}), así como variables de forma de la distribución de poros como la dispersión estándar (DE), asimetría y curtosis. En los últimos años diversos autores como Castellini et al. (2013) y Shahab et al. (2013), lograron buenos resultados mediante dicha técnica.

3.1.1.4 Indicadores de almacenaje de agua

Como se dijo anteriormente las variables asociadas al contenido y movimiento del agua, son claves para delinear la calidad hidrofísica de un sistema. Por un lado, las variables de almacenaje de agua, capacidad de campo (CC) y capacidad de agua disponible (CAD) son uno de los principales factores que determinan los rendimientos y la respuesta a la aplicación de fertilizantes en la Región Pampeana (Taboada et al., 2008). De la misma forma, Topp et al. (1997) y Reynolds et al. (2009) encontraron que propiedades físicas como la CAD, la capacidad de campo relativa (CCR), y la capacidad de aireación (CA) parecen ser los indicadores de calidad de suelos más importantes ya que directamente o indirectamente cuantifican el potencial del suelo para proveer agua, aire y nutrientes. Por otro lado, numerosos autores han utilizado la humedad del suelo ($\Theta_{\text{grav.}}$) para discernir entre manejos agrícolas (Quiroga et al., 2005) ya que es el resultado directo de los procesos hidrofísicos del suelo. Sin embargo, dicha variable es afectada por el tipo de suelo y la variabilidad espacial de las precipitaciones.

3.1.1.5 Capacidad de campo y capacidad de agua disponible

La capacidad de campo es una de las propiedades del suelo usualmente utilizada para evaluar la calidad del suelo (Reynolds et al., 2002). La cantidad de agua retenida a altos potenciales (mayores a -10 kPa) depende fundamentalmente de la DAP, la porosidad y la estructura (Rawls et al., 1991). Por otro lado, la CAD, si bien también está relacionada con las mismas variables, al depender también del agua retenida a bajos potenciales (e.g. PMP -1500 kPa), también está regulada por las características texturales y mineralógicas del suelo (Rawls et al., 1991). Aún cuando estas variables son de extrema importancia para los cultivos, brindan un valor estático de agua no vinculado a la dinámica hídrica del sistema

3.1.1.6 Capacidad de aire y capacidad de campo relativa

El intercambio de aire del suelo con la atmósfera está regulado por el volumen de poros no capilares (poros que determinan la CA). La CA está muy relacionada con el contenido de agua del suelo, su ingreso y tiempo de permanencia. Este aspecto está asociado con el drenaje debido a la posibilidad de generación de condiciones anaeróbicas en los suelos en SD. Por ello la aireación del suelo es esencial para obtener buenos rendimientos agrícolas y para una buena calidad general del suelo. La compactación del suelo que puede ocurrir en planteos bajo SD podría producir anaerobiosis, especialmente con altos CH. Sin embargo, Scott et al. (1975) mencionan que no se habrían verificado grandes disminuciones de oxígeno causadas por SD. Asimismo, la generación de un gran número de poros elongados orientados horizontalmente, como ocurre particularmente en SD podría contribuir a un inadecuado drenaje bajo condiciones muy húmedas. Sin embargo, también es posible que el mayor número de bioporos que se forman en SD contrarresten este efecto (Vandenbygaart et al., 1999).

Por otro lado, la capacidad de campo relativa (CCR) que indica la relación entre la CC y la aireación del suelo, relativo al volumen total del suelo (Reynolds et al., 2008) es un indicador relativamente nuevo utilizado con éxito, principalmente por Olness et al. (1998) y Reynolds et al. (2002). Este indicador expresa a través de sus umbrales (0,6-0,7), el balance óptimo entre la capacidad de campo en la zona radical y la capacidad de aireación del suelo (Reynolds et al., 2002, 2009). Se ha sugerido que este rango permite maximizar la producción de nitratos, el cual generalmente es considerado como una limitante en el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Doran et al., 1990). Valores menores a 0,6 resultarían en una actividad microbiológica más baja por falta de agua, mientras que suelos con valores mayores a 0,7 poseerían problemas por falta de aireación del suelo (Doran et al., 1990; Reynolds et al., 2009).

En resumen, de acuerdo a lo que surge de la literatura, para la región pampeana de Argentina, existen numerosos trabajos sobre la calidad del suelo en labranza convencional y en sistemas bajo SD. No obstante, estos trabajos son localizados y en la mayoría de los casos se evaluaron pocas variables a la vez. De esta forma no se logra explicar la disparidad de resultados encontrados bajo SD y se pierde de vista la importancia del análisis composicional del suelo. Por otro lado, son escasos los trabajos que han evaluado el efecto de distintos manejos agrícolas, especialmente distintas secuencias de cultivos, en la calidad del suelo bajo SD. Estos manejos que incluyen diferentes rotaciones, fertilización, manejo de plagas, etc. pueden conducir a diferentes conformaciones estructurales las cuales pueden surtir efecto sobre la calidad hidrofísica de los suelos. Como se mencionó con anterioridad, el tipo de secuencia de cultivo, en conjunto con una diferente intensidad de tránsito propia de cada secuencia, traen aparejadas modificaciones en la calidad hidrofísica del suelo.

Por todo lo mencionado con anterioridad, en esta tesis, se evaluará en primer lugar los procesos de compactación del suelo, a través de la determinación de la DAP y la RP. También a partir de la valoración de la compactación se analizará la PT y se discriminará la misma por su origen, porosidad textural (P_{tx}) y porosidad estructural (P_{estr}). También se evaluarán distintos tamaños de poros para luego evaluar la distribución de volumen de poros a través de las variables de ubicación y forma de poros. Luego se analizarán variables de almacenamiento de agua, como la CC y CAD y variables relacionadas como la CA, CCR y la Θ grav. (Figura 3.1). Finalmente se analizará la utilidad de distintas variables para diferenciar los manejos, principalmente mediante a su grado de interrelación con las variables de manejo y mediante el análisis de la correlación de dichas variables con las distintas propiedades del suelo.

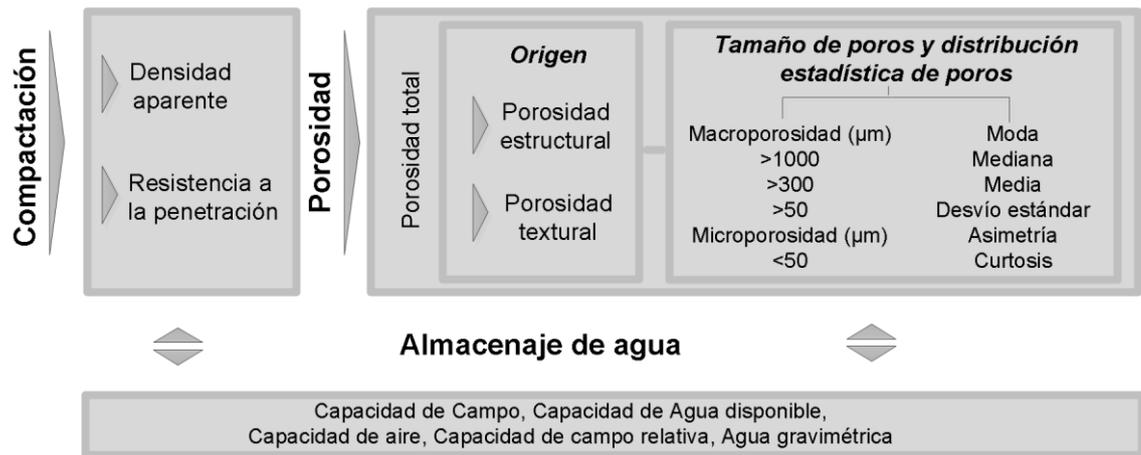


Figura 3.1 Esquema metodológico del capítulo IV.

Objetivos

- Evaluar el efecto de distintos manejos agrícolas en las variables hidrofísicas de suelos de textura y mineralogía contrastantes bajo SD.
- Establecer los indicadores de calidad hidrofísica que resulten adecuados para los distintos suelos estudiados.

Hipótesis

3. I - El mayor tránsito del suelo que se asocia a una rotación de cultivos intensificada afecta negativamente las variables hidrofísicas en todos los suelos evaluados.
3. II - Los posibles efectos negativos de la intensificación agrícola son más perjudiciales en los suelos limosos reflejados en los atributos relacionados con el movimiento de aire en el suelo debido a sus características composicionales (más rígidas y frágiles).
3. III - La sensibilidad de los indicadores de calidad hidrofísica depende del tipo del suelo debido a la interacción de los indicadores con la mineralogía y textura de cada suelo evaluado.

3.2 Materiales y Métodos

3.2.1 Compactación y porosidad (Sección A)

3.2.1.1 Densidad aparente

La densidad aparente del suelo (DAP) fue determinada a través del método del cilindro (Burke et al., 1986) ($138,5 \text{ cm}^3$) para tres profundidades (0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm). Se tomaron 3 muestras por profundidad para cada subsitio para contabilizar 9 muestras para cada combinación suelo/tratamiento/profundidad (tratamiento, $n=27$).

3.2.1.2 Porosidad total

La porosidad total (PT) se obtuvo para los mismos estratos que la DAP. La PT se calculó a partir de la ecuación (1.1):

$$(1.1) \text{PT} = (1 - (\text{DAP}/D_p)) * 100$$

Donde, DAP es la densidad aparente y D_p es la densidad de partícula determinada mediante el método del picnómetro para el estrato 0-20 cm.

3.2.1.3 Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) se determinó (cinco a diez repeticiones en cada subsitio) en intervalo de 0,025 m usando un penetrómetro digital de tipo estático (Fieldsout SC-900[®]) con un ángulo de punta igual a 30° . La profundidad de muestreo se estableció de 0 a 20 cm. Los valores obtenidos fueron promediados para los estratos 0-5, 5-10 y 10-20 cm. La RP fue corregida por el contenido hídrico encontrado a campo ($RP_{\text{corr } \theta}$). El CH del suelo se determinó a partir de la medición de la humedad gravimétrica (estufa a 105°C durante 48 hs) de las muestras de suelos obtenidos simultáneamente de cilindros utilizados para DAP.

3.2.1.4 Porosidad estructural y textural

Con el objetivo de poder determinar la porosidad textural (P_{tx}) y estructural (P_{estr}), en cada combinación sitio-tratamiento se tomaron 9 monolitos (2500 cm^3) de los primeros 20 cm del suelo. La determinación de P_{tx} se realizó siguiendo el protocolo planteado por Stengel (1979), utilizando la ecuación (1.2):

$$(1.2) P_{\text{tx}} = (1 - (\text{dag}/D_p))$$

Donde, P_{tx} es la porosidad textural (%); dag es la densidad aparente de los agregados de 2 a 3 mm (g cm^{-3}); D_p es la densidad de partícula (g cm^{-3}).

Considerando que la P_{tx} obtenida de los primeros 20 cm de suelo era similar en los tres estratos, se calculó la P_{estr} como la diferencia entre PT y P_{tx} .

3.2.2 Tamaño y distribución estadística de poros (sección B)

Para la determinación del tamaño de poros y su distribución de acuerdo a las medidas de tendencia central y forma de las curvas, se obtuvo primeramente la curva característica de retención hídrica (CRH) (placa de presión, Richards, 1965). El suelo no disturbado para dicho análisis se obtuvo mediante cilindros (135 cm^3) a las siguientes profundidades: 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Para cada combinación de tipo de suelo, tratamiento, subsitio y profundidad se recolectaron 3 cilindros ($n=27$). En todos los casos el suelo fue previamente saturado en agua destilada durante 48 h y luego, mediante sucesivos desecamientos de la muestra, se obtuvo el contenido de agua en

equilibrio a diferentes succiones (en cm de columna de agua): 0 - 10 - 30 - 60 - 90 - 330 - 2000 y 15000. Estos valores se ajustaron al modelo de retención hídrica de van Genuchten (1980) mediante la ecuación (1.3), considerando la restricción $m= 1-1/n$ (Mualen, 1986). Este procedimiento fue realizado mediante el programa RETC (van Genuchten et al., 1991), obteniéndose en todos los casos una estimación de los parámetros del modelo con un R^2 mayor a 0,96.

$$(1.3) \theta_g = (\theta_{gs} - \theta_{gr}) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{gr}; h \geq 0; h \text{ en cm}$$

Donde, θ_g es el contenido de agua gravimétrica; θ_{gs} es el contenido de agua gravimétrica en saturación; θ_{gr} es el contenido de agua gravimétrica residual; h es el potencial mátrico en columna de agua, mientras que α , m y n son parámetros empíricos de ajuste de la CRH.

3.2.2.1. Macroporosidad $>1000 \mu\text{m}$, $>300 \mu\text{m}$ y $>50 \mu\text{m}$, microporosidad $<50 \mu\text{m}$

La macroporosidad del suelo (P_{Mac}) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) está relacionada con la habilidad de drenar rápidamente el exceso de agua y facilitar el crecimiento de las raíces. Distintos límites de tamaño de poros han sido propuestos para cuantificar la macroporosidad (desde 3000 a $30 \mu\text{m}$), siendo aquellos delimitados por 1000, 300, 50 y $30 \mu\text{m}$ lo más utilizados (Reynolds et al., 2009; Imhoff et al., 2010). En esta tesis se eligieron los valores de 50 y $1000 \mu\text{m}$ (1.6 y 1.4). En este sentido, algunos autores han utilizado los poros mayores a $1000 \mu\text{m}$ como medida de macroporos de gran tamaño (Watson y Luxmoore, 1986; Buczko et al., 2006; Imhoff et al., 2010). Además la microporosidad también es comúnmente calculada mediante el límite de $50 \mu\text{m}$ (1.6). Por otro lado, también se han calculado los poros de $300 \mu\text{m}$ (1.5) ya que para ese tamaño de poros existen umbrales los cuales continúan bajo estudio (Reynolds et al., 2002; Castellini et al., 2013). Para la macroporosidad calculada a $300 \mu\text{m}$ se pueden encontrar en la literatura umbrales óptimos de $P_{\text{Mac}} \geq 0,05-0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ en suelos con un amplio rango textural mientras que valores $\leq 0,04 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ han sido encontrados en suelos degradados por compactación (Drewry et al., 2001; Drewry y Paton, 2005). Por ello, siguiendo a Reynolds et al. (2009), se seleccionaron los umbrales de $P_{\text{Mac}} \geq 0,07 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ y $P_{\text{Mac}} = 0,04 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ como valores óptimos y crítico respectivamente.

$$(1.4) P_{\text{Mac}(>1000 \mu\text{m})} = \theta_s - \theta_{\text{Mac} \geq 1000 \mu\text{m}} (h_{\text{Mac} \geq 1000 \mu\text{m}} = -0,03 \text{ m}); 0 \leq P_{\text{Mac} \geq 1000 \mu\text{m}} \leq \theta_s$$

$$(1.5) P_{\text{Mac}(>300 \mu\text{m})} = \theta_s - \theta_{\text{Mac} \geq 300 \mu\text{m}} (h_{\text{Mac} \geq 300 \mu\text{m}} = -0,1 \text{ m}); 0 \leq P_{\text{Mac} \geq 300 \mu\text{m}} \leq \theta_s$$

$$(1.6) P_{\text{Mac}(>50 \mu\text{m})} = \theta_s - \theta_{\text{Mac} \geq 50 \mu\text{m}} (h_{\text{Mac} \geq 50 \mu\text{m}} = -0,6 \text{ m}); 0 \leq P_{\text{Mac} \geq 50 \mu\text{m}} \leq \theta_s$$

$$(1.7) P_{\text{Mic}(>50 \mu\text{m})} = \theta_s - \theta_{\text{Mac} \geq 50 \mu\text{m}} (h_{\text{Mac} \geq 50 \mu\text{m}} = -0,6 \text{ m}); 0 \leq P_{\text{Mic} \leq 50 \mu\text{m}} \leq \theta_s$$

Donde, θ_s es el agua a potencial 0 (saturación).

3.2.2.2 Funciones de distribución de poros

Para cada muestra se calculó una función de distribución de poros. Esta puede ser definida como la pendiente de la CRH, expresada como contenido de agua volumétrica vs $\ln(h)$, y graficada respecto al diámetro de poros equivalente (d_{por}) en una escala \log_{10} (Jena y Gupta, 2002). La variable d_{por} puede ser determinada utilizando la ecuación de Or y Wraith (2000) (1.8).

$$(1.8) d_{\text{por}} = \frac{4\sigma \cos \alpha}{\rho_a g \psi_{\text{a poro}}}$$

Donde: σ es la tensión superficial del agua (m t^{-2}) (es igual a 73.4 mN m^{-1} a 15°C); α es el ángulo de contacto entre el agua y el poro ($\approx 0^\circ$); ρ_a es densidad del agua (kg m^{-3}); g es la aceleración gravitatoria ($=9.81 \text{ m s}^{-2}$) y $|\psi|_a$ es la succión aplicada (cm de columna de agua)

Para poder calcular las relaciones volumétricas de porosidad, los valores de θ_g fueron convertidos a θ_v utilizando los valores correspondientes de ρ_{ap} . De la misma forma que Reynolds et al. (2009) y Shahab et al. (2013), se utilizó una normalización de la función de distribución de poros (CRH_n) para que esta pueda ser comparada entre los distintos suelos analizados (1.9).

$$(1.9) \quad CRH_n = \frac{CRH_v}{CRH_{vi}} = \frac{m(\alpha h)^n(1+m^{-1})^{(m+1)}}{[1+(\alpha h)^n]^{(m+1)}}; 0 \leq CRH_n \leq 1$$

Donde, CRH_v es la curva de retención hídrica (en base volumétrica); CHR_{vi} es la pendiente de la curva de retención hídrica (en base volumétrica) en su punto de inflexión, h es la altura de la columna de agua y m , n , α parámetros empíricos de la fórmula de van Genuchten (RETC).

La normalización de estas curvas permitió calcular distintos parámetros que caracterizan la distribución de poros de cada combinación suelo, tratamiento y profundidad. De esta manera se obtuvieron parámetros de tendencia central: moda (d_{moda}), mediana ($d_{mediana}$) y media (d_{media}) (ecuaciones 1.11, 1.12 y 1.13) y parámetros de forma de la curva de distribución de poros: desvío estándar (DE), asimetría y curtosis (ecuaciones 1.14, 1.15 y 1.16)(Reynolds et al., 2009 adaptado de Blott y Pye, 2001).

$$(1.10) \quad d\theta = \frac{2980\alpha}{(\theta_n^{-1/m} - 1)^{1/n}}; 0 \leq \theta \leq 1$$

$$(1.11) \quad d_{moda} = \frac{2980\alpha}{m^{-1/n}}$$

$$(1.12) \quad d_{mediana-d_{0,5}} = \frac{2980\alpha}{0,5^{-1/m} - 1)^{1/n}}; \theta = 0,5$$

$$(1.13) \quad d_{media} = \exp\left(\frac{\ln d_{0,16} + \ln d_{0,50} + \ln d_{0,84}}{3}\right)$$

$$(1.14) \quad DE = \exp\left(\frac{\ln d_{0,84} + \ln d_{0,16}}{4} + \frac{\ln d_{0,95} - \ln d_{0,05}}{6,6}\right); 1 \leq DE \leq \infty$$

$$(1.15) \quad \text{Asimetría} = \frac{1}{2} \left[\frac{\ln d_{0,16} - \ln d_{0,84} - 2(\ln d_{0,50})}{(\ln d_{0,84} - \ln d_{0,16})} + \frac{\ln d_{0,05} + \ln d_{0,95} - 2(\ln d_{0,50})}{(\ln d_{0,95} - \ln d_{0,05})} \right]; -1 \leq \text{Asimetría} \leq +1$$

$$(1.16) \quad \text{Curtosis} = \frac{\ln d_{0,05} - \ln d_{0,95}}{2,44(\ln d_{0,25} - \ln d_{0,75})}; 0,41 \leq \text{Curtosis} \leq \infty$$

Donde, θ_n es el contenido de agua relativo al suelo saturado, mientras que $d_{0,05}$, $d_{0,16}$, $d_{0,5}$, $d_{0,75}$, $d_{0,84}$ y $d_{0,95}$ fueron calculados utilizando la ecuación (1.10).

La mediana ($D_{mediana}$) fue calculada mediante $d_{0,5}$ mientras que la moda (D_{moda}) corresponde al punto de inflexión de la CRH, siendo este el valor más frecuente de tamaño de poros. Para la variable dispersión estándar (DE), un valor de $DE=1$ indica homogeneidad de tamaño de poros mientras que valores crecientes indican un aumento en el rango de tamaño de poros. Por su parte, la asimetría=0 indica que la forma de la curva de distribución de poros se asemeja a una distribución log-normal, mientras que valores negativos indican un exceso de poros pequeños y viceversa. Por último, valores de curtosis >1 indican una distribución leptocúrtica, en la cual los datos están muy

concentrados en la media, dando como resultado una curva con punta pronunciada. Por su parte, valores <1 indican una distribución platicúrtica, en la cual la concentración de resultados alrededor de la media es menor, presentado la curva una forma achatada.

3.2.3 Almacenamiento de agua (sección C)

La capacidad de campo (CC), la capacidad de agua disponible (CAD), la capacidad de aire (CA) y la capacidad de campo relativa (CCR) fueron calculadas a partir de la CRH (Buczko et al., 2006, Reynolds et al., 2009; Imhoff, et al., 2010). Por su parte, el contenido hídrico gravimétrico del suelo (Θ grav.) fue medido a partir de la diferencia entre el contenido hídrico a campo y seco a 105°C hasta peso constante (≈ 48 h). Las determinaciones de esta sección se realizaron en todos los estratos evaluados (0-5, 5-10 y 10-20 cm)

3.2.3.1 Capacidad de campo

La capacidad de campo (CC) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), fue calculada a un potencial mátrico de -1 m.

3.2.3.2 Capacidad de agua disponible

La capacidad de agua disponible (CAD) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) es la capacidad del suelo para proveer y almacenar agua para las raíces (1.2). La CAD para mantener una buena provisión de agua para los cultivos debería encontrarse en el rango de $0,15-0,25 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Craul, 1999). Dicha variable fue calculada mediante la ecuación 1.17.

$$(1.17) \text{CAD} = \theta_{cc} - \theta_{pmp}; 0 \leq \text{CAD} \leq \theta_{cc}; (\theta_{cc} : -1 \text{ m}, \theta_{pmp} : -15 \text{ m})$$

Según Reynolds et al. (2009), el valor óptimo para la CAD debería superar los $0,20 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, mientras que $0,15 < \text{CAD} < 0,20 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ puede considerarse como bueno, $0,10 < \text{CAD} < 0,15 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ como limitado, mientras que $\text{CAD} < 0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ es considerado pobre.

3.2.3.3 Capacidad de aire

Según White (2006), la capacidad de aireación (CA) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) está determinada según la ecuación (1.18).

$$(1.18) \text{CA} = \theta_s - \theta_{cc}; 0 \leq \text{CA} \leq \theta_s; (\theta_{cc} : -1 \text{ m})$$

Diversos trabajos señalan que para evitar el daño o disminución en los rendimientos de los cultivos, en los primeros centímetros del suelo la CA debería ser mayor a $0,15 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Cockroft y Olsson, 1997; Mueller et al., 2008), mientras que otros investigadores proponen un valor mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Reynolds et al., 2009; Castellini et al., 2013).

3.2.3.4 Capacidad de campo relativa (CCR)

La capacidad de campo relativa (CCR) es la relación entre la CC y la aireación del suelo, relativo al volumen total del suelo (Reynolds et al., 2008) (1,19). Para los suelos minerales en secano ha sido propuesto un valor óptimo de $0,66$ (Olness et al., 1998), mientras que otros autores proponen un rango algo más amplio ($0,6-0,7$) (Reynolds et al., 2002).

$$(1.19) \text{CCR} = \left(\frac{\theta_{cc}}{\theta_s} \right); 0 \leq \text{CCR} \leq 1; (\theta_{cc} : -1 \text{ m})$$

3.2.4 Observaciones metodológicas sobre la curvas de retención hídrica

Uno de los presupuestos más importantes para el cálculo de estas funciones, es que el comportamiento físico del suelo sea rígido. Por consiguiente, el Haplustol éntico (Bengolea) es el suelo ideal para este tipo de estudio, ya que su potencial de expansión no supera los 17,5 %. Por otro lado, los Argiudoles de Monte Buey y Pergamino, principalmente los tratamientos con mayor contenido de materia orgánica (AN), poseen un grado de expansión (20,0 %), que si bien es leve, podría afectar los valores extremos de porosidad. Reynolds et al. (2002 y 2007) trabajando con suelos franco-arcillosos con contenidos de arcilla de 370 g kg^{-1} y un límite de contracción del $\approx 18\%$, pudieron utilizar con éxito esta metodología. Por último, el Hapludert, con un grado de expansión del 37,5 %, a priori no sería apto para este tipo de análisis. Sin embargo, experiencias previas han demostrado que la CRH sólo se ve seriamente afectada en suelos con contenidos de arcilla superiores a 570 g kg^{-1} (Nagpal et al., 1972). Si bien las muestras del Hapludert no presentaron fisuras o grietas en el PMP (-1500 kPa), y su contenido de arcilla máximo fue de 489 g kg^{-1} con un promedio general de 430 g kg^{-1} , se decidió utilizar dos aproximaciones metodológicas para poder realizar una mejor interpretación de los resultados. Para ello se utilizó el set de datos completos, es decir considerando todos los suelos y otro sin tener en cuenta los resultados correspondientes al Hapludert.

3.2.5. Análisis estadísticos

Para evaluar el efecto de los tratamientos y del tipo de suelo en las variables de compactación y porosidad (DAP , $RP_{corr\theta}$, P_{tx} , P_{est} y PT), en las variables de tamaño y distribución de poros ($P_{Mac >1000}$, >300 , >50 , $P_{Mic <50}$, D_{moda} , $D_{mediana}$, D_{media} , DE , asimetría y curtosis) y en las variables de almacenaje de agua e indicadores hidrofísicos (CC , CAD , CA , CCR y $\Theta_{grav.}$) se estimaron dos modelos mixtos (REML). En primer lugar se evaluó un modelo reducido contabilizando la influencia de los tratamientos (tres niveles: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) y profundidades (tres niveles: 0-5, 5-10 y 10-20 cm), así como la interacción de estos factores como un efecto fijo (promedio). Por otra parte, el tipo de suelo (Haplustol, Argiudol - Monte Buey, Argiudol - Pergamino y Hapludert) y subsitio de muestreo (1, 2, 3) fue analizado como efecto aleatorio. Además se modelizó el efecto del tratamiento en la heterostacididad de la varianza ($VarIdent$). También fue utilizado el criterio de Akaike (AIC) para cada una de las variables para comparar la calidad de cada modelo para detectar las diferencias entre los tratamientos y profundidades, considerando a su vez las variables aleatorias. Luego, fue evaluado el modelo completo incluyendo como efecto fijo además de los efectos del modelo reducido, la interacción suelo*tratamiento y la triple interacción suelo*tratamiento*profundidad. Como efecto aleatorio se consideró únicamente el subsitio de muestreo. La disimilitud de estos dos modelos (reducido vs. completo) fue analizada estadísticamente con un $p < 0,05$. Las variables $P_{Mac >1000}$ y $P_{Mac >300}$ y todas las variables de ubicación y distribución de forma de poros debieron ser transformadas (\log_{10}) ya que no revistieron de normalidad (Shapiro Wilkis, $p < 0,05$). La variable curtosis no logró ser normalizada por medios tradicionales por lo cual sólo se presentarán resultados descriptivos para la misma. Cuando existieron efectos significativos de los factores fijos, los contrastes fueron realizados mediante LSD Fisher ($p < 0,05$). Estos modelos fueron estimados mediante la función lmer del paquete lme4 Bates, Maechler, y Bolker, «lme4: Linear mixed-effects models using s4 classes» en el programa R.

Para complementar este análisis en relación a la utilidad de las distintas variables para discriminar los tratamientos, se realizó un análisis de componentes de varianza

para la profundidad 0-20 cm. De esta forma se determinó la proporción de varianza atribuible a los tratamientos y al tipo de suelo para las propiedades del suelo y así discriminar los comportamientos dinámicos o inherentes de cada variable.

Para evaluar el efecto de las distintas variables de manejo (CP1_manejo, ISI, ISI_{agr}, Soja/Cultivos, Maíz/Cultivos, Soja/Maíz y Soja único cultivo) sobre las variables de compactación y porosidad, tamaño de poros, distribución estadística de poros y variables de almacenaje de agua se realizaron análisis de correlación de Pearson. Para detectar correlaciones anómalas y analizar en detalle las relaciones entre estas variables y las variables de manejo, se realizaron regresiones lineales para distintas variables seleccionadas. Estos análisis se realizaron con el set de datos completos (Todos los suelos) y con un set de datos sin el Hapludert (Sin Hapludert). Como fuera mencionado en la introducción, dicha separación se debió a la importante diferencia mineralógica presentada por el Hapludert respecto a los Molisoles y al interrogante planteado debido a dicha característica, en la utilidad de las variables presentadas en este capítulo. Mediante la misma metodología se analizó el efecto de las propiedades físicas, químicas y reológicas y fraccionamiento de carbono. También se realizaron correlaciones de Pearson entre las variables hidrofísicas, de almacenamiento de agua y de ubicación y forma con las variables de manejo del suelo, propiedades físicas y químicas. Además se incluyeron distintas fracciones de carbono orgánico determinadas por el Grupo Dr. Galantini, perteneciente al proyecto BIOSPAS.

3.3 Resultados y Discusión

Sección A

3.3.1.1 Compactación y Porosidad

En esta sección del capítulo, la mayoría de las variables presentaron un comportamiento influenciado por el tipo de suelo. Es decir, cuando se compararon los modelos reducido (tipo de suelo como variable aleatoria) vs. completo (tipo de suelo como variable fija) se encontraron diferencias significativas entre dichos modelos ($p < 0,05$) (Tabla 3.1a). Por dicha razón, el modelo completo es más adecuado para comprender los procesos de compactación y porosidad. Sin embargo, para la DAP el modelo reducido no presentó diferencias con el completo, por lo cual, se pudo analizar el efecto del tratamiento de forma independiente al tipo de suelo (Tabla 3.1a). En este mismo sentido, considerando la profundidad 0-20 cm, el componente de varianza atribuible al tratamiento sólo fue alto para DAP, encontrándose para el resto de las variables, porcentajes de varianza del tipo de suelo y del residual muy altos (Tabla 3.1b). Para PT, P_{tx} y P_{estr} , parte de esa varianza residual tan alta está explicada por el efecto de la profundidad.

Tabla 3.1. Efectos fijos y aleatorios del modelo mixto completo, AIC y componentes de varianza para las variables de compactación y porosidad. DAP: densidad aparente, $RP_{corr \theta}$: resistencia a la penetración, PT: porosidad total, P_{estr} : porosidad estructural y P_{tx} : porosidad textural.

a)

	Efectos fijos [†]						Efectos aleatorios		Completo vs Reducido ^a
	Valor P						de [‡]	AIC	
	<i>Suelo</i>	<i>Trat.</i>	<i>Prof.</i>	<i>Suelo* Trat.</i>	<i>Trat.*Prof.</i>	<i>Suelo*Trat.* Prof.</i>	<i>Subsitio</i>		<i>Suelo</i>
DAP	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,11	0,13	0,32	-53,23	0,6
$RP_{corr \theta}$	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0027	<0,0001	0,00005	1104	<0,0001
PT	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,14	0,25	0,26	515	<0,001
P_{tx}	<0,0001	<0,0002	-	<0,0002	-	-	0,00002	143,27	<0,001
P_{estr}	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,88	0,50	0,21	564	<0,0001

[†] Efectos fijos y aleatorios para el modelo completo

[‡] Desvíos estándares relativos al residual

^a Diferencia (Probabilidad) entre modelo reducido y modelo completo con el factor *suelo* como efecto fijo.

b)

	Componentes de Varianza (%)		
	<i>Trat.</i>	<i>Suelo</i>	<i>Residual</i>
DAP	77,2	22,7	0,1
$RP_{corr \theta}$	0,0	0,0	100
PT	15,1	7	77,9
P_{tx}	24,1	32,7	43,3
P_{estr}	9,5	17,2	73,3

3.3.1.2 Densidad aparente y resistencia a la penetración

Considerando al suelo como aleatorio para la DAP, el tratamiento de manejo y la profundidad presentaron efectos significativos, sin presentar interacción entre ambos factores. Así todos los tratamientos se diferenciaron significativamente entre sí, con un ordenamiento BP>MP>AN con valores de 1,32, 1,25 y 1,18 g cm⁻³, respectivamente (Figura 3.2a) mientras que el estrato superficial (0-5 cm) presentó los menores valores

de DAP ($1,22 \text{ g cm}^{-3}$) diferenciándose significativamente de 5-10 y 10-20 cm (Figura 3.2b). Estas dos últimas profundidades no se diferenciaron significativamente.

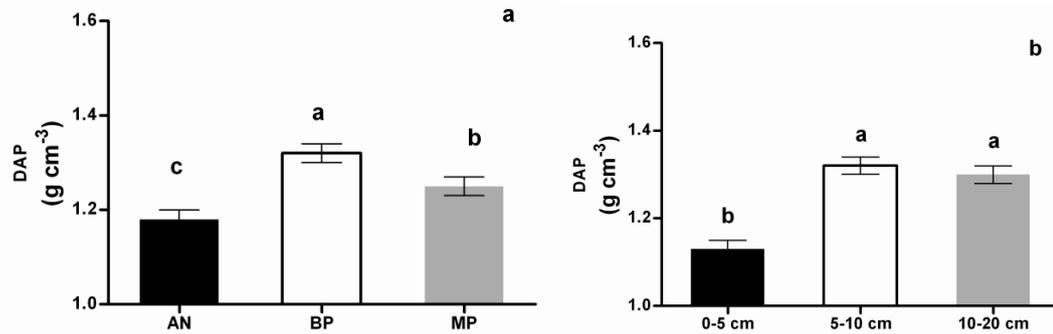


Figura 3.2 Densidad aparente (DAP) para (a) tratamientos de manejo AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) y (b) distintas profundidades evaluadas (0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm). Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$).

Si bien el modelo reducido, fue el más adecuado, se debe mencionar que el suelo Hapludert presentó un ordenamiento en los tratamientos de manejo diferente al resto de los suelos. En este suelo, como se observa en la Figura 3.3, los valores de DAP de AN son levemente inferiores a BP, sin diferencias significativas, mientras que MP presentó los valores más altos, diferenciándose significativamente de AN y BP. En el conjunto de suelos y tratamientos, el BP del Argiudol (Pergamino) fue el tratamiento que presentó un valor más alto en contraposición al bajo valor presentado por el AN del Hapludert. Esto comportamiento se reflejó también en las distintas profundidades medidas.

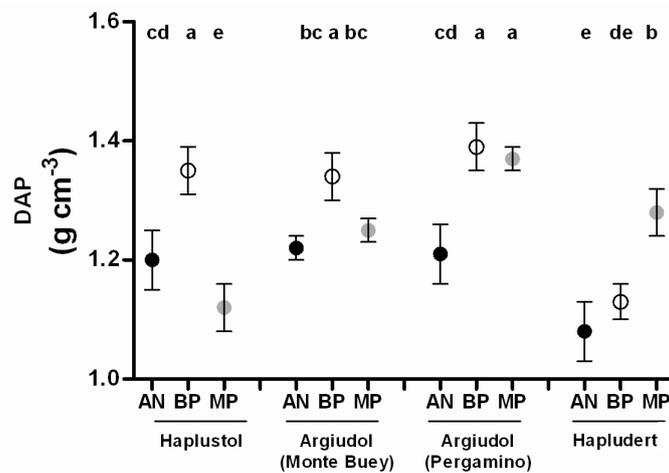


Figura 3.3 Densidad aparente (DAP) para los tratamientos de manejo AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para los distintos suelos evaluados, Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción suelo*tratamiento (LSD, $p < 0,05$).

Como segundo análisis de la compactación del suelo se determinó la $RP_{\text{corr } \theta}$. Como esta variable es fuertemente dependiente del contenido hídrico del suelo al momento de la determinación de RP, la misma fue corregida por la humedad. El efecto de la humedad en la RP y las pendientes de las funciones RP vs. Θ grav se presentan en la Figura A.4.

Los suelos presentaron valores medios para todas las profundidades según Haplustol (2127 kPa) > Argiudol (Monte Buey) (1950 kPa) > Argiudol (Pergamino) (1079 kPa) > Hapludert (935 kPa). De forma general, el suelo Haplustol y Argiudol (Monte Buey) presentaron valores sensiblemente mayores al resto de los suelos, siendo necesario el cambio de escala en la Figura 3.4. También, en este sentido, estos suelos para los dos estratos más profundos presentaron valores cercanos o superiores al umbral de 2000 kPa.

Como puede observarse en la Tabla 3.1, el modelo mixto detectó interacción entre todos los factores. Por consiguiente, se eligió mostrar los resultados para cada tipo de suelo y cada profundidad (Figura 3.4). En general los tratamientos presentaron resistencias a la penetración muy semejantes entre sí, con valores de 1510 kPa para AN, 1489 kPa para BP y 1570 kPa para MP.

Para el Haplustol, sólo se encontró una diferencia significativa en el estrato 10-20 cm en donde MP presentó mayores valores de RP con respecto a BP (Figura 3.4a). En cuanto al análisis por profundidad, se encontraron valores significativamente superiores de los estratos más profundos con respecto al estrato superficial. Dicho comportamiento se observó para todos los tratamientos (Figura 3.4a). En el Argiudol (Monte Buey) en el estrato superficial 0-5 cm se detectaron valores superiores de RP del AN con respecto a los suelos cultivados, mientras que para 5-10 cm los mayores valores fueron encontrados para BP y MP (Figura 3.4b). En el estrato más profundo (10-20 cm), MP presentó los valores más altos no encontrándose diferencias entre AN y BP. De la misma forma que en el suelo anterior, la RP aumentó significativamente en el estrato 5-10 cm con respecto a 0-5 cm, presentado el estrato 10-20 cm valores intermedios (Figura 3.4b). El Argiudol (Pergamino) presentó en el estrato 0-5 cm las mismas diferencias que el suelo anterior con valores superiores en AN con respecto a BP y MP. En los otros estratos no se detectaron diferencias entre tratamientos (Figura 3.4c). En relación a las diferencias entre los estratos, también en este suelo se pudo detectar un aumento de RP para 5-10 cm si bien sólo fue significativo en el AN. Por último, en el suelo Hapludert se observaron mayores valores de RP en el tratamiento MP, si bien estas diferencias sólo son significativas en el estrato 5-10 cm (Figura 3.4d). En este suelo también se observó un aumento en la RP en el estrato 5-10 cm. No obstante a lo presentado aquí, debe tenerse en cuenta que, como indican los componentes de varianzas, el mayor efecto está dado por las profundidades (mayor residual).

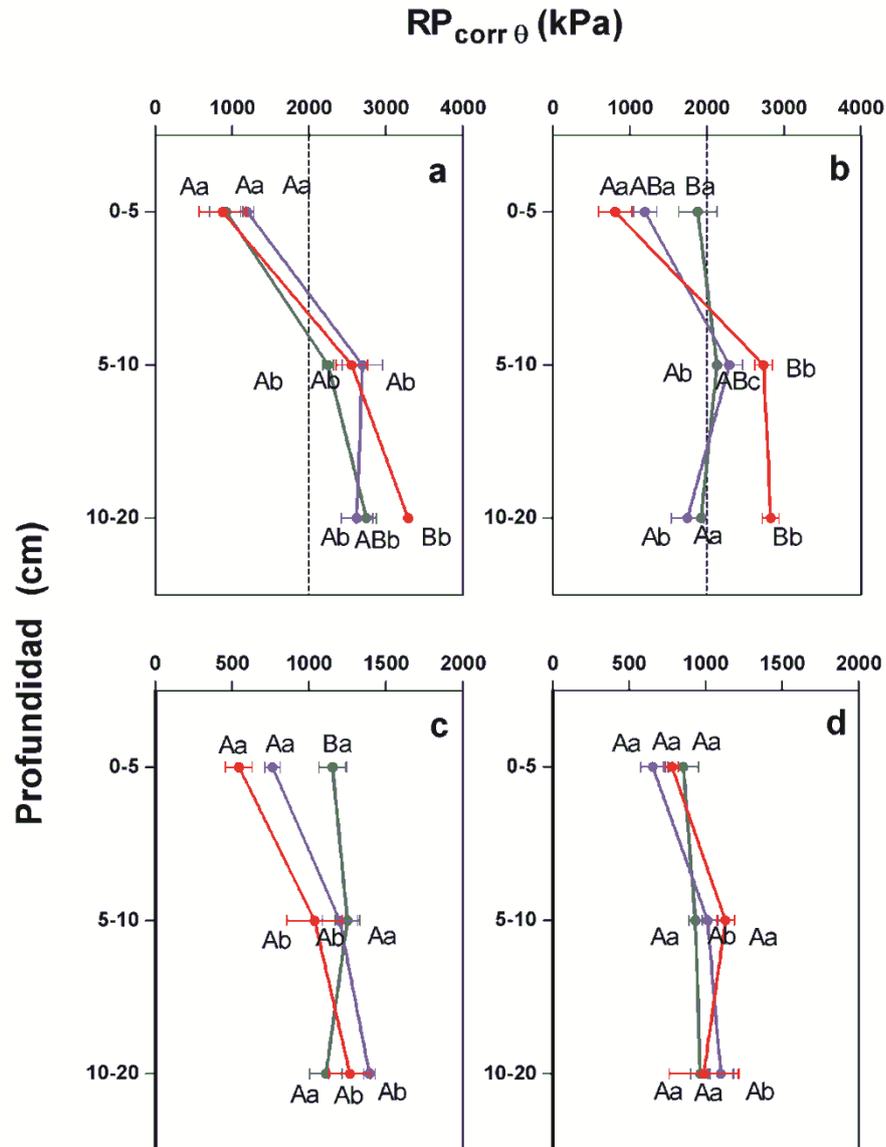


Figura 3.4. Resistencia a la penetración corregida por humedad del suelo ($RP_{corr\theta}$) para las profundidades 0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm para: a) Haplustol; b) Argiudol (Monte Buey); c) Argiudol (Pergamino); d) Hapludert; para Ambiente natural (verde), Buenas prácticas (azul) y Malas prácticas (rojo). Letras en mayúsculas indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$) entre tratamientos para cada profundidad, mientras que letras minúsculas indican diferencias significativas entre profundidades para cada tratamiento.

3.3.1.3 Porosidad total, textural, estructural

En cuanto a los resultados de PT, el modelo adecuado fue el que tomó en cuenta al factor tipo de suelo (Tabla 3.1a). En este sentido, se detectó una interacción tratamiento de manejo y tipo de suelo, no encontrándose interacción con la profundidad ni efectos significativos de la triple interacción (tipo de suelo*tratamiento de manejo*profundidad). En los suelos de textura más gruesa (Haplustol y Argiudol - Monte Buey-), el tratamiento MP presentó una PT más elevada con respecto a AN y BP, mientras que para los suelos de textura comparativamente más fina (Argiudol - Pergamino y Hapludert) los AN presentaron PT más altas con respecto a los tratamientos agrícolas no encontrándose diferencias entre los tratamientos dentro de cada tipo de suelo (Figura 3.6). En general se encontraron mayores valores de porosidad para el Haplustol y el Hapludert con valores de 52,7 % y 51,9 % respectivamente, mientras que los Argiudoles presentaron los valores más bajos, 47,8 % para Monte Buey y 46,3 % para Pergamino.

En cuanto a las profundidades se encontró mayores valores de PT en el estrato superficial (54,3%) diferenciándose significativamente de los estratos más profundos, siendo el estrato 5-10 cm el de menor valor (46,91%).

En cuanto a la P_{tx} , si bien existió una tendencia decreciente AN>BP>MP, las diferencias encontradas entre tratamientos fueron dependientes también del suelo considerado lo cual fue verificado al ser significativa la diferencia entre el modelo reducido y el modelo completo ($p<0,001$) (Tabla 3.1a). En este sentido el Haplustol, fue el que mayor diferencia presentó entre los tratamientos de manejo con valores más elevados, mientras que en el Hapludert los tratamientos no se diferenciaron entre sí, y presentaron los valores más bajos (Figura 3.5). Para el Haplustol, el AN presentó diferencias significativas con los tratamientos cultivados. A su vez BP presentó valores de P_{tx} significativamente mayores a MP (Figura 3.5). En el suelo Argiudol (Monte Buey) no existieron diferencias significativas entre AN y BP, los cuales presentaron valores significativamente mayores a MP. En el Argiudol (Pergamino) no se encontraron diferencias significativas entre AN y MP, mientras que BP se diferenció de ambos tratamientos, presentando valores inferiores.

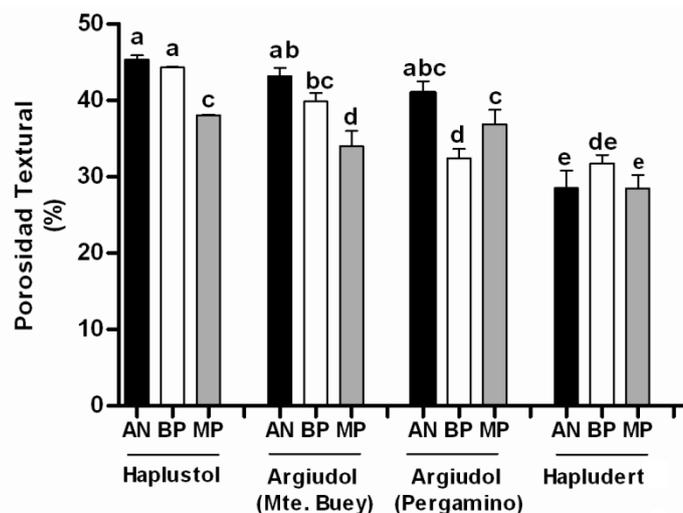


Figura 3.5 Porosidad textural del horizonte superficial (%) para la combinación de suelos: Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert y tratamientos: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). Letras diferentes significan diferencias significativas de la interacción tratamiento de manejo*tipo de suelo (LSD, $p<0,05$).

La P_{estr} presentó efectos de los factores muy similares a la PT (Tabla 3.1a) observándose un patrón de comportamiento casi idéntico a esta variable (Figura 3.5). En general, la proporción de P_{estr} fue menor a la de P_{tx} en todos los suelos y tratamientos, presentando en promedio un valor de 13,05 % con respecto 36,7 % de P_{tx} .

Tanto en el Haplustol como en el Argiudol (Monte Buey), MP presentó valores sensiblemente más altos de P_{estr} con respecto a AN y BP, no detectándose diferencias significativas entre estos tratamientos (Figura 3.6). En el Argiudol (Pergamino), los tratamientos de manejo se diferenciaron significativamente con un ordenamiento AN>BP>MP, mientras que en el Hapludert, el AN presentó valores superiores de P_{estr} con respecto a BP y MP que no se diferenciaron entre ellos (Figura 3.6). En general se pudo observar que el tipo de suelo presentó un ordenamiento de P_{estr} según, Hapludert (32,8 %) > Haplustol (17,5 %) > Argiudol-Monte Buey (15,4 %) \geq Argiudol – Pergamino (15,2 %). Por otro lado, se encontraron diferencias significativas entre los tres estratos evaluados. El estrato superficial presentó los mayores valores de P_{estr} (17,7%) mientras que el estrato 5-10 cm presentó los valores más bajos (10,65%).

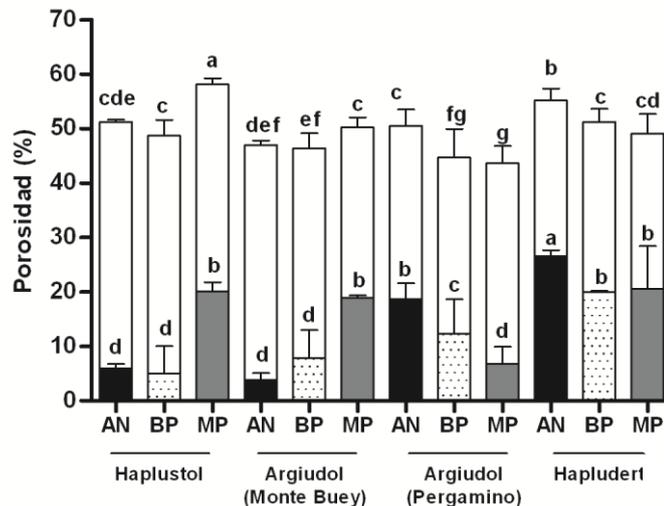


Figura 3.6 Porosidad Estructural (%) en barras en escala de grises y porosidad total (en barras blancas, sumatoria de ambas barras) para cada suelo: Haplustol; Argiudol (Monte Buey); Argiudol (Pergamino) y; Hapludert; y para los tratamientos: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). Diferentes letras significan diferencias significativas para la interacción tratamiento de manejo*tipo de suelo (LSD, $p < 0,05$).

3.3.1.4 Efecto de las variables de manejo sobre la compactación

Para evaluar el efecto específico de las variables de manejo (CP1_manejo, ISI, ISI_{agr}, Años bajo SD, Soja/Cultivos, Soja/Maíz, Maíz/Cultivos y Soja único cult.) sobre la compactación se realizaron correlaciones entre dichas variables y la DAP, $RP_{\text{corr } \theta}$, P_{tx} , P_{estr} y PT en conjunto para todos los suelos (Tabla 3.2). El mismo análisis se propuso pero removiendo los datos del Hapludert (Tabla 3.2). A priori, se eligió dicho mecanismo para evitar correlaciones espúreas y para evaluar indirectamente el efecto de este suelo (diferente mineralogía) en las correlaciones realizadas.

Como se puede observar en la Tabla 3.2, se encontraron numerosos coeficientes de correlación muy bajos y no significativos. Excluyendo la P_{tx} que fue medida de 0-20 cm, se encontró que la mayoría de las correlaciones significativas se encontraron en el

estrato 0-5 cm. Entre las correlaciones más destacables se puede nombrar la correlación negativa entre el DAP e ISI ($r = -0,52$) para todos los suelos y positiva del Maíz/Cultivos y el DAP ($r = 0,64$) para los suelos sin el Hapludert. En la Figura 3.7a, se presenta la regresión entre DAP e ISI, en donde si bien existe una tendencia a la disminución de la DAP ante mayores ISI, esto está influenciado fuertemente por el tratamiento AN ($ISI=1$). En cuanto a la $RP_{corr \theta}$, la misma presentó, para 0-5 cm, diversas correlaciones con el manejo aunque con baja significancia. Como se observa en la Tabla 3.2, la $RP_{corr \theta}$ se correlacionó positivamente con ISI, ISI_{agr} y de forma negativa con CP1_manejo, Soja/Cultivos y Soja único cultivo. En relación a PT y P_{estr} , no se encontraron coeficientes de correlación muy altos destacándose únicamente la correlación negativa del ISI y P_{estr} para el set de datos sin el Hapludert en el estrato 5-10 cm. Cuando se realizaron las correlaciones para 0-20 cm los coeficientes de correlación no mostraron una mejoría.

Por otro lado, la variable que mostró coeficientes de correlaciones más altas fue la P_{tx} (Tabla 3.2). Esta variable se correlacionó de forma positiva y altamente significativa tanto con ISI ($r = 0,71$) como con ISI_{agr} ($r = 0,60$). Al realizar las regresiones entre ambas variables se pudo observar que mientras los Molisoles presentaron una tendencia positiva del P_{tx} al aumento del ISI, el suelo Hapludert no presentó ningún efecto de esta variable de manejo como se presenta en el ejemplo de la Figura 3.7b.

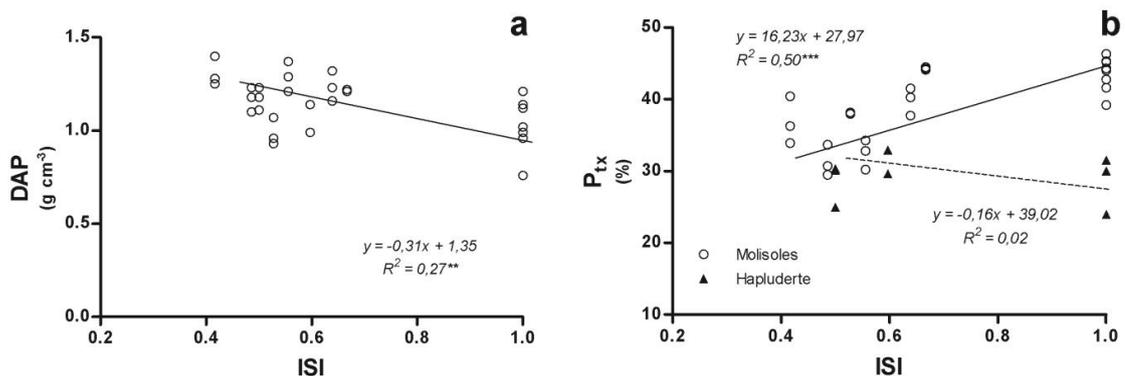


Figura 3.7 Regresiones lineales entre: (a) Densidad aparente (DAP) e ISI 0-5 cm; y (b) Porosidad textural (P_{tx}) e ISI (0-20 cm). Línea de tendencia punteada corresponde a Hapludert. ISI: Índice de intensificación del cultivo. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Tabla 3.2 Correlaciones (Pearson) entre las variables de compactación y porosidad y variables de manejo para las tres profundidades evaluadas (0-5, 5-10 y 10-20 cm) para todos los suelos y todos los suelos sin el Hapludert. * p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001.

	Prof. (cm)	CPI_Manejo	ISI		ISI _{agr}		Años bajo SD		Soja/Cultivos		Soja/Maíz		Maíz/Cultivos		Soja único cult.	
			Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert
DAP	0-5		-0,52 **	-0,46 *												
	5-10		-0,36 *								-0,47 *	0,48 *	0,64 **			
	10-20															
R _{p_{corr} 0}	0-5															
	5-10															
	10-20									0,51 *						
PT	0-5		0,37 *													
	5-10											-0,50 *	-0,55 *			
	10-20															
P _{estr}	0-5															
	5-10			-0,54 **												
	10-20			-0,44 *												
P _{tx}	0-20		0,39 *	0,71 ***	0,51 *	0,60 **	0,46 *									

Densidad aparente -DAP-, Resistencia a la penetración -R_{p_{corr} 0}-, Porosidad total -PT-, Porosidad estructural -P_{estr}-, Porosidad textural -P_{tx}-, CPI Manejo, Índice de intensificación de cultivo -ISI-, Índice de intensificación de cultivo para los manejos agrícolas -ISI_{agr}-, Años bajo siembra directa -años bajo SD-, Relación de años con soja sobre la cantidad total de cultivos -Soja/Cultivos-, Relación de años con soja sobre maíz -Soja/Maíz-, Relación de años con maíz sobre la cantidad total de cultivos -Maíz/Cultivos- y soja como único cultivo -Soja único. No se presentan las variables CPI Manejo, Soja/Cultivos y Soja como único cultivo -soja único cult.

3.3.1.5 Efecto de las propiedades del suelo y las fracciones de carbono orgánico sobre la compactación y porosidad

El tipo de suelo fue un factor decisivo en el efecto de los tratamientos sobre las variables. Esto se ve reflejado en las altas correlaciones encontradas entre las variables de compactación y porosidad y el CP1_suelo y CP2_suelo obtenidos (Tabla 3.3). También se puede advertir en esa misma tabla que la mayoría del efecto del tipo de suelo se debe a la presencia del Hapludert ya que cuando este se remueve del análisis, los coeficientes bajan sensiblemente. Si bien, los coeficientes de correlación no fueron muy altos para DAP, el mismo se correlacionó con ambos componentes principales (CP1_suelo y CP2_suelo).

En cuanto al efecto de las variables individuales, la DAP disminuyó con el aumento de las variables reológicas medidas, mientras que esto fue expresado de forma principal por E+I/E ($r= 0,57$, $p<0,001$). El mismo comportamiento fue observado para $RP_{corr\ \theta}$ pero la disminución de esta variable fue mejor explicada por el índice de plasticidad (I_p). Para esta variable la granulometría tuvo un importante rol, presentando coeficientes positivos para el contenido de arena y negativo para el contenido de arcilla y limo. Sin embargo, como se mencionó con anterioridad, con excepción del Lp, los coeficientes no fueron significativos cuando no se consideró el Hapludert. La PT, por su parte, presentó una correlación negativa con el contenido de limo, la cual permaneció estable cuando se removió el suelo Hapludert (Figura 3.8a). Sin considerar el Hapludert, el contenido de arcilla se correlacionó negativamente con la PT, mientras que el contenido de arena lo hizo a la inversa. La última correlación a destacar para esta variable es la correlación positiva de la actividad de arcillas (AA) ($r= 0,55$, $p<0,01$) la cuál es presentada en la Figura 3.8c. En cuanto a la P_{estr} , la misma se correlacionó positivamente con el contenido de arcillas y sus variables relacionadas como CIC, Lp, Ll, I_p , presentando una correlación máxima con E+E/I. De la misma forma que con las variables anteriores, dichas correlaciones perdieron significancia cuando el Hapludert fue removido. Por último, de igual forma que la PT, se detectó una correlación negativa con el contenido de limo y además de forma también estable con el contenido de arena pero con signo positivo. En general las propiedades reológicas y mineralógicas presentaron correlaciones negativas con la P_{tx} , si bien cuando se removió el suelo Hapludert, dichas correlaciones perdieron significancia, mientras que la AA presentó una fuerte correlación positiva. También de la misma forma que para la PT, la P_{tx} presentó una correlación negativa con el contenido de limos, aunque cuando se analizó dicha asociación con más detalle, se observó que la caída de la P_{tx} debido al aumento de los limos se verificó para los suelos Molisoles, pero no así para el Hapludert (Figura 3.8b).

En cuanto a las fracciones de carbono orgánico, tanto la DAP como la $RP_{corr\ \theta}$ se correlacionaron negativamente con el COT y sus fracciones. La DAP por su parte se correlacionó con fracciones más estables (COT, COM), así como con fracciones más lábiles (COP_g , COP_f), mientras que la $RP_{corr\ \theta}$ se correlacionó con las variables más lábiles. Sin embargo estas correlaciones estuvieron muy influenciadas por el suelo Hapludert, ya que al remover dicho suelo del análisis las correlaciones perdieron significancia. También, principalmente para $RP_{corr\ \theta}$ las correlaciones efectuadas por estrato arrojaron coeficientes con tendencias opuestas a las de 0-20 cm, indicando la complejidad de dichas interacciones y también la falta de una tendencia fuerte (Tabla A.5). Por otro lado la PT, presentó correlaciones positivas con las fracciones más lábiles, las cuales se mantuvieron al remover el Hapludert, lo que indicaría la estabilidad de las mismas (Tabla 3.3). Al observar con más detalle estas correlaciones mediante

regresiones lineales, se detectó que si bien para los Molisoles estas son de hecho positivas y significativas, en el Hapludert no se presenta dicha relación. Un ejemplo de lo mencionado se observa en la Figura 3.7d.

Para la P_{estr} , con excepción de CH_t , las correlaciones significativas fueron de signo positivo, es decir la P_{estr} aumentó con el aumento de las fracciones carbonadas, pero al igual que la DAP estas estuvieron influenciadas por el Hapludert, no encontrándose asociaciones claras cuando se removi6 este suelo. Adem6s, cuando estas correlaciones se realizaron por estrato, varios de los coeficientes cambiaron de signo, indicando la inestabilidad de estas relaciones (Tabla A.4, A.5).

Por 6ltimo, la P_{tx} , se correlacion6 positivamente con las fracciones m6s l6biles, con coeficientes muy similares para el COP_g y COP_f , mientras que tambi6n se correlacion6 positivamente con CH_s . En cuando a las fracciones de carbono org6nico particulado, las regresiones fueron diferentes entre los Molisoles y el Hapludert, mientras que se encontr6 una relaci6n significativa y positiva para los Molisoles, no se encontr6 efectos de las fracciones de carbono particulado sobre la P_{tx} en el Hapludert (Figura 3.8e). Para el CH_s , esta relaci6n fue posible modelizarla para todos los suelos en conjunto (Figura 3.8f).

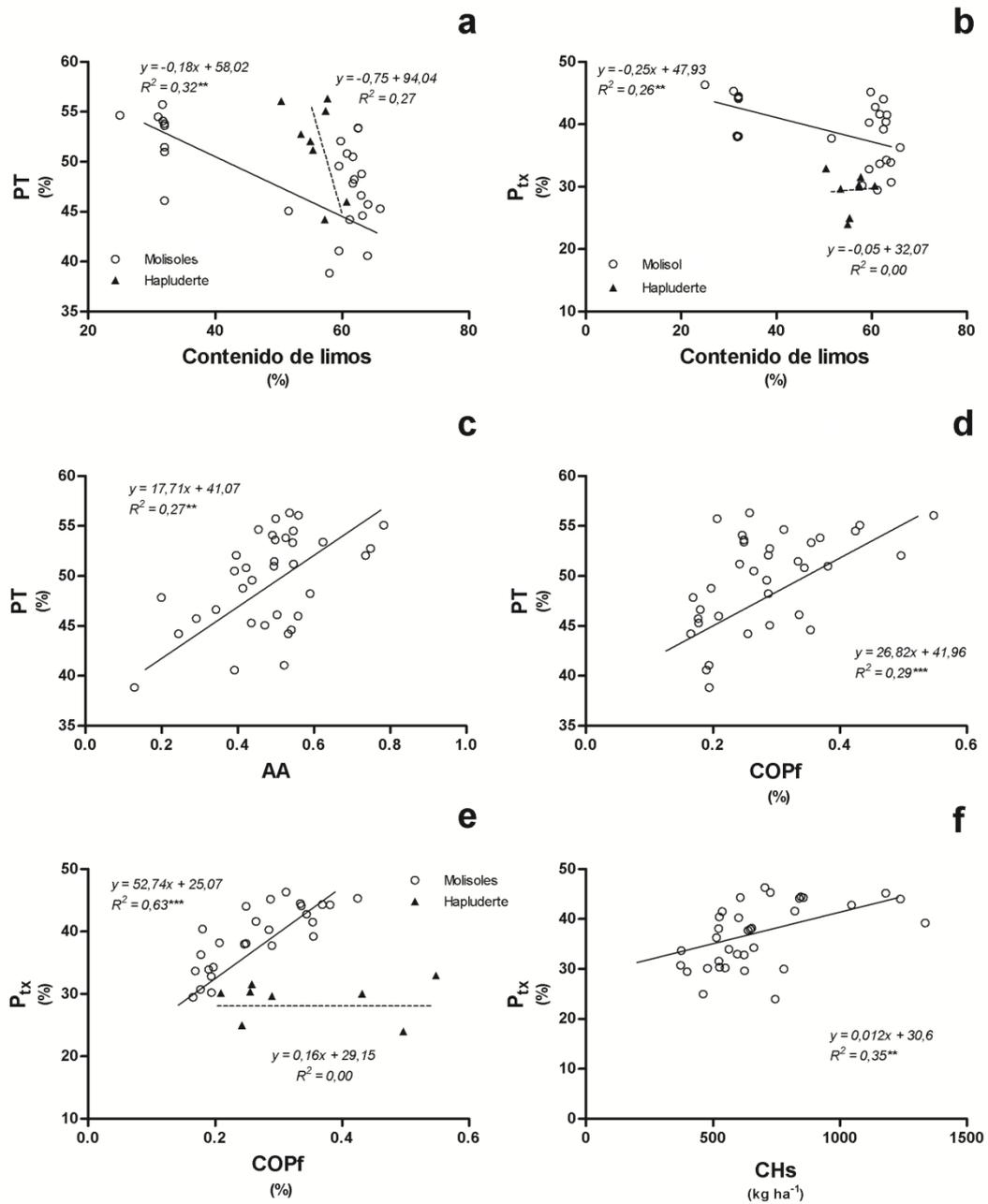


Figura 3.8 Regresiones lineales entre: (a) PT y contenido de limos; (b) P_{tx} y contenido de limos; (c) PT y AA; (d) PT y COP_f; (e) P_{tx} y COP_f; (f) P_{tx} y CH_s. Línea de tendencia punteada corresponde a Hapluderte. PT: Porosidad total; P_{tx}: Porosidad Textural; AA: Actividad de arcillas; COP_f: carbono orgánico particulado grueso y; CH_s: Hidratos de carbono soluble. *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

Tabla 3.3 Correlaciones (Pearson) entre las variables de compactación (Densidad Aparente - DAP) y Resistencia a la penetración ($RP_{corr \theta}$) y porosidad (Porosidad total -PT; Porosidad estructural - P_{estr} ; y; Porosidad textural - P_{tx}) y las propiedades del suelo, fracciones de carbono orgánico y estabilidad estructural para 0-20 cm. Se presentan las correlaciones para todos los suelos y para todos los suelos sin el suelo Hapludert -sin Hapludert-. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

	DAP		RP _{corr θ}		PT		P _{estr}		P _{tx}	
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert
<i>Propiedades del suelo</i>										
CP1_suelo	-0,39 *	-	-0,54 ***	-			0,63 ***	-	-0,61 ***	-
CP2_suelo	0,41 *	-		-	-0,62 ***	-		-		-
Arcilla		0,40 *	-0,57 ***			-0,54 **	0,64 ***		-0,70 ***	
Limo			-0,34 *		-0,47 **	-0,57 **			-0,46 **	-0,50 **
Arena			0,54 ***			0,59 **	-0,36 *		0,67 ***	0,48 *
CE			-0,42 *				0,47 **	-0,41 *	-0,38 *	
pH										
Ca ⁺²	-0,39 *		-0,37 *			-0,43 *	0,60 ***		-0,56 ***	
Na ⁺	-0,42 *		-0,53 **	-0,39 *	0,36 *		0,55 ***			
CIC	-0,41 *		-0,46 **				0,65 ***		-0,63 ***	
PSI						0,44 *			0,37 *	
SB										
HE	-0,37 *		-0,45 **					-0,42 *	-0,38 *	
LP			-0,37 *				0,39 *		-0,38 *	
LI	-0,42 *		-0,57 ***				0,65 ***		-0,56 ***	
Ip	-0,44 **		-0,61 ***	-0,40 *			0,71 ***		-0,59 ***	
AA	-0,46 **		-0,45 **		0,52 **	0,51 **	0,49 **			0,64 ***
E+I/E	-0,57 ***		-0,48 **		0,39 *		0,79 ***		-0,59 ***	
LBD			-0,40 *				0,44 *		-0,52 **	
<i>Fracciones de carbono orgánico</i>										
COT	-0,44 **		-0,49 **				0,53 **			
COP _g	-0,44 **				0,49 **	0,50 *	0,36 *		-0,36 *	0,75 ***
COP _f	-0,40 *				0,54 ***	0,50 **				0,80 ***
COM	-0,39 *		-0,56 ***				0,55 ***			
CH _t							-0,59 ***		-0,48 **	
CH _s						0,41 *			0,56 ***	0,59 **

CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, Lp: límite plástico, LI: límite líquido, Ip: índice plástico, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificadas illita-esmectita, LBD: limo de baja densidad, COT: carbono orgánico total, COP_g: Carbono orgánico particulado grueso, COP_f: carbono orgánico particulado fino, COM: carbono orgánico mineralizable, CH_t: hidratos de carbono total y CH_s: hidratos de carbono soluble.

3.3.1.6 Discusión compactación y porosidad

En la región pampeana existen numerosos reportes de degradación física en la cual la compactación es una de las principales causas de la misma (Taboada et al., 1998; Botta et al., 2007). Cómo se vio en esta sección, las variables que expresan la presencia de compactación y los cambios en porosidad del suelo fueron dependientes del tipo de suelo evaluado, y solamente la DAP pudo modelarse independientemente del tipo de suelo. También, esta variable fue la que presentó un componente de varianza más relacionado al tratamiento (Tabla 3.1b), mientras que la P_{tx} , fue la segunda variable que presentó mayor varianza debido al tratamiento. En este sentido, la DAP y en segundo lugar el P_{tx} fueron las variables que menor AIC presentaron, indicando también la superioridad de estas dos variables para describir el tratamiento y el efecto en profundidad, con respecto al resto de las variables. No obstante, la DAP, presentó un efecto aleatorio del subsitio mayor al resto de las variables (Tabla 3.1a), lo que podría indicar una variabilidad espacial acentuada de dicha determinación.

Como puede observarse, en las variables de compactación, los manejos agrícolas presentaron valores sensiblemente más altos que el ambiente natural. En este sentido, Reynolds et al. (2002), en suelos con diferentes texturas, encontraron mayor DAP en situaciones de cultivos bajo SD respecto de situaciones de referencia (cuasi-prístina). También, Ferreras et al. (2007) encontraron que la compactación del suelo (medida mediante compactación relativa) en los suelos cultivados fue notoriamente más elevada que en los suelos vírgenes. Además, dentro de los tratamientos agrícolas, se encontraron mayores densificaciones de BP con respecto a MP. Así, un mayor número de pasadas de maquinaria y con mayor peso, lo que ocurre en BP, especialmente en la operación de cosecha (Fernández et al., 2011), puede ocasionar síntomas de compactación como los observados en BP. Por otro lado, si bien en general se pudieron observar mayores valores de DAP en BP con respecto a MP, el comportamiento de la PT, y P_{estr} dependió del tipo de suelo analizado.

También debe mencionarse que los suelos bajo SD pueden tener menor porosidad total durante los primeros cinco años de iniciado el sistema (Voorhees y Lindstrom, 1984) o incluso hasta 10-15 años (Sasal, 2012) y luego comienza a incrementarse hasta llegar a un estado de equilibrio. Los agregados de estos suelos con el tiempo serían más porosos dado que contienen mayor proporción de restos orgánicos y canales como resultado de la actividad biológica (Morrás et al., 2004; 2012; Alvarez et al., 2014). Los sistemas analizados en esta tesis no superan los 13 años de SD con un rango de 5-13 años, con excepción de BP en Monte Buey (28 años). También, si bien los años bajo SD no presentaron correlaciones significativas con la DAP, puede observarse que las BP poseen un mayor número de años bajo SD (capítulo 1, Tabla 1.1) resultando en un asentamiento del suelo o *age-hardening* (Sasal, 2012).

En relación al tipo de suelo, el Haplustol y el Hapludert presentaron los menores valores de DAP y los mayores de PT. Una explicación a dichos resultados es que el Haplustol, debido a su granulometría (56,6% arena), poseería una mayor capacidad portante (Fernández et al., 2011).

El Hapludert con una mayor relación arcilla/arena con elevada proporción de esmectita en la fracción arcilla posee una mayor capacidad de resiliencia, por lo que los procesos de compactación se pueden revertir y los suelos cambiar su estado estructural luego de un stress (capítulo 2). También, este suelo fue el que presentó un mayor contenido de carbono en todas sus fracciones contribuyendo a la amortiguación de los procesos de compactación.

A la inversa, los suelos de Pergamino y Monte Buey, que son más limosos y contienen una proporción mayor de illita fueron los más vulnerables. Esto quedó evidenciado por la correlación negativa entre el contenido de limos y la PT (Tabla A.1, Figura 3.8a). En este sentido, los suelos limosos presentan mayores restricciones cuando son manejados bajo monocultivos de soja en sistemas de SD, debido a su baja capacidad de generar macroporos por mecanismos físicos (Stengel et al., 1984; Taboada, 1998).

La degradación por compactación ocurrida en los Argiudoles pudo estar también relacionada con la presencia de alta proporción de fitolitos, característico de estos suelos (Cosentino y Pecorari, 2002). Como se mencionó en el capítulo II, en los suelos estudiados se encontró un elevado porcentaje de limos de baja densidad en la fracción limo, el cual fue superior en los suelos Argiudoles. Si bien en esta tesis no se cuantificó la presencia de fitolitos en los LBD, inspecciones preliminares sugieren una elevada proporción de los mismos (Osterrieth, comunicación personal).

De forma particular, en el suelo Haplustol, AN presentó menor compactación que BP, lo que puede ser explicado por el mayor contenido de MO, la mayor actividad de la biota edáfica y el tránsito nulo en AN. Por otro lado, en este suelo BP presentó procesos de compactación mayores que MP. Esto puede ser explicado, además de la presencia del tránsito más acentuado, por la inclusión en el tratamiento MP del cultivo de maní en la rotación 2 años antes del realizar el muestreo del suelo, cuya cosecha implica la inversión de los primeros 15 centímetros del suelo y una importante aireación y descompactación del suelo (Tabla 1.1). Si bien esto ocasiona un aumento en la porosidad edáfica (PT y P_{estr}), fue acompañado de una disminución en la estabilidad estructural del suelo (capítulo V, sección C).

En el Argiudol (Monte Buey) los resultados tampoco fueron los esperados ya que BP presentó procesos de compactación más severos ($>DAP$, $<PT$, $<P_{\text{estr}}$) y AN presentó compactaciones muy similares a MP mientras que además presentó valores de P_{estr} muy bajo en contraposición a los altos valores encontrados en MP (Figuras 3.3b, 3.6). Además del efecto de la intensidad agrícola que conlleva una mayor presión de tránsito, se observó además, que también el AN se encontraba muy transitado debido a la cercanía del casco del campo y por el corte periódico de la cobertura vegetal. Por otro lado, la mayor P_{estr} encontrada en MP puede deberse a estructuras laminares fuertemente desarrolladas que fueron verificadas a campo y en cortes delgados (capítulo V, sección A y B); es probable que los poros horizontales de gran tamaño sean la causa de la mayor P_{estr} de este tratamiento.

En cuanto al Argiudol (Pergamino) las diferencias entre los tratamientos podrían estar explicadas también por el mayor tránsito de maquinaria en BP y estructuras desfavorables, las cuales serán objeto del próximo capítulo.

Por último, el Hapludert, fue el suelo que presentó menores diferencias en todas las variables analizadas, seguramente debido a su textura y mineralogía, como se mencionó con anterioridad. Además, debido a los mayores valores de E+I/E encontrados en BP, los posibles efectos de un mayor tránsito de maquinaria (principalmente observado en la DAP), podrían haber sido revertidos por un intenso proceso de expansión y contracción del suelo, encontrado en el capítulo II.

Por otro lado, en todos los suelos existió un incremento significativo de DAP desde el estrato 0-5 a 5-10 cm. Esto podría deberse a la fuerte estratificación estructural y principalmente de MO que se produce en sistemas bajo SD (Wander y Bollero, 1999; De Battista et al., 2005; Alvarez et al., 2009). Dichos autores atribuyen este efecto a la acumulación de rastros en los primeros centímetros del perfil (Havlin et al., 1990)

causada por la falta de remoción y la ausencia de incorporación de los residuos de cosecha al suelo (Musso et al., 2004), sumado a la falta de exposición de los mismos a los microorganismos del suelo (Salinas-García et al., 1997). También, el peso de la capa superior es una de las cuestiones que determinan el incremento de la compactación en profundidad. En los tratamientos bajo agricultura (BP y MP) los valores de DAP en el estrato 5-10 cm fueron mayores respecto a AN y esto pudo deberse a consecuencias del manejo. Esto coincide con lo observado por De Battista et al. (2005) quienes a través de la metodología del perfil cultural, encontraron entre los 3–10 cm una estructura de características masivas, con muy baja porosidad visual. De la misma forma, Ferreras et al. (2007) encontraron en esos estratos una densificación superior en el estrato 7-14 cm con respecto al estrato superficial.

En cuanto a la P_{tx} se encontraron valores más altos de esta variable (Figura 3.5) en los Molisoles que en el suelo Hapludert. Una de las explicaciones de este comportamiento podría deberse a las diferencias observadas en la mineralogía ya que este último suelo presentó un importante porcentaje de esmectitas en la fracción arcilla (capítulo 2). Fiès y Stengel (1981) mencionan que para un determinado contenido hídrico la porosidad textural es bastante estable en el tiempo, pero cuando se compara la P_{tx} en suelos con mineralogías diferentes, cobra importancia la humedad a la cual se realiza la determinación de este parámetro. En este sentido, Castiglioni (2005a) pudo determinar para distintos Argiudoles de la pradera pampeana, que la P_{tx} variaba de acuerdo al contenido hídrico del suelo, siendo modificada por los procesos de contracción y expansión. A su vez, este autor comprobó que las diferencias en la mineralogía de los suelos se manifestaban fundamentalmente durante el proceso de contracción, a bajos valores de contenido hídrico (Castiglioni et al., 2005b). Por lo mencionado, dado que las mediciones de P_{tx} se realizaron con suelo seco al aire, es probable que el menor valor de esta propiedad en el suelo Hapludert se deba a un proceso más intenso de contracción y una mayor disminución del volumen ocupado por estos pequeños poros, respecto a lo sucedido en los restantes suelos. Por otro lado, según la bibliografía, la P_{tx} generalmente no está afectada por el manejo, pero en éste trabajo se observaron valores superiores de P_{tx} en BP con respecto a MP en 3 de los 4 suelos evaluados. Además, esto se vio reflejado en la correlación significativa y positiva presentada entre la P_{tx} con el ISI y con el ISI_{agr} , indicando un impacto del diferente uso de la tierra sobre esta variable (Tabla 3.2). Estos resultados estarían sugiriendo modificaciones composicionales del suelo resultantes del manejo que estarían influenciando cambios en la P_{tx} , entre los que podrían considerarse diferencias en los procesos de humificación y formación de complejos arcillo-húmicos entre BP y MP y procesos de erosión selectiva de partículas finas.

En síntesis, los síntomas de la compactación del suelo evaluados a través de la DAP y $RP_{corr\theta}$, demostraron ser más marcados en BP que en MP. No obstante, si bien PT, P_{tx} y P_{estr} , presentaron una tendencia a la compactación similar que la DAP, demostraron estar también condicionados fundamentalmente por el tipo de suelo. En estos resultados no se podría descartar el efecto de tránsito de maquinaria ya que dicho factor podría explicar el aumento de procesos de compactación en tratamientos con una rotación más variada y con contenidos de MO más elevados. Por ello, es necesario asociar los estudios de compactación a análisis estructurales más detallados para poder entender las causas y la dinámica de estos procesos y las divergencias de los resultados de porosidad entre los diferentes tipos de suelos.

Sección B

3.3.2 Variables de tamaño y distribución estadística de poros

En cuanto a las *variables de tamaño de poros y su distribución estadística* el modelo completo (suelo como efecto fijo) resultó el modelo más adecuado para analizar la mayoría de las variables. Sin embargo para $P_{Mac>300}$ y D_{moda} el modelo más adecuado fue considerar el suelo como un efecto aleatorio para así poder independizarse de este efecto. (Tabla 3.4a).

Tabla 3.4. a) Efectos fijos y aleatorios del modelo mixto, AIC y b) componentes de varianza para las variables de tamaño y distribución de poros. $P_{Mac >1000 \mu m}$: macroporosidad $>1000 \mu m$, $P_{Mac >300 \mu m}$: macroporosidad $>300 \mu m$, $P_{Mac >50 \mu m}$: macroporosidad $>50 \mu m$, $P_{Mic <50 \mu m}$: microporosidad $<50 \mu m$, D_{moda} , $D_{mediana}$ y D_{media} : diámetro medio de poros para el tamaño de poro más frecuente, para la mediana y la media respectivamente, DE: desvío estándar del tamaño de poros.

a)

	Efectos fijos [†]						Efectos aleatorios		Completo vs Reducido ^a
	Valor P						de [‡]	AIC	
	<i>Suelo</i>	<i>Trat.</i>	<i>Prof.</i>	<i>Suelo* Trat.</i>	<i>Trat.* Prof.</i>	<i>Suelo*Trat. *Prof.</i>			
log $P_{Mac >1000 \mu m}$	<0,0001	<0,0001	0,0041	<0,0001	0,0003	0,0008	0,29	144	0,01
log $P_{Mac >300 \mu m}$	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0001	0,0008	0,000021	96	0,08
$P_{Mac >50 \mu m}$	<0,0001	<0,0001	0,0001	0,0042	0,0079	0,2887	0,000008	-100	0,0009
$P_{Mic <50 \mu m}$	<0,0001	0,0002	0,0114	0,0689	0,0015	0,4933	0,000001	-87	0,0005
Log D_{moda}	0,0215	<0,0001	0,2821	0,0002	0,0011	0,7332	0,000028	114	0,5
Log $D_{mediana}$	<0,0001	0,7715	0,1834	0,0003	0,0162	0,005	0,000012	281	0,0004
Log D_{media}	<0,0001	0,9444	0,176	0,0003	0,0182	0,0039	0,000016	321	0,0001
Log DE	<0,0001	0,4152	0,1496	0,0003	0,0318	0,0038	0,000013	322	0,0001
Log Asimetría	<0,0001	0,6057	0,7668	0,0022	0,1576	0,1643	0,000024	-147	0,0005
Curtosis	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[†] Efectos fijos y aleatorios para el modelo completo; [‡] Desvíos estándares relativos al residual; ^aDiferencia (Probabilidad) entre modelo reducido y modelo completo con el factor *suelo* como efecto fijo.

b)

	Componentes de Varianza (%)		
	<i>Trat.</i>	<i>Suelo</i>	<i>Residual</i>
log $P_{Mac >1000 \mu m}$	74,5	17,4	8,1
log $P_{Mac >300 \mu m}$	96,1	0,9	3,0
$P_{Mac >50 \mu m}$	81,4	18,4	0,1
$P_{Mic <50 \mu m}$	50,9	49	0,0
Log D_{moda}	95,5	0,0	4,5
Log $D_{mediana}$	48,1	39,2	12,7
Log D_{media}	41,6	39,32	19,0
Log DE	15,2	34,5	50,3
Log Asimetría	29,9	70,1	0,0
Curtosis	-	-	-

En relación a las *variables de tamaño* la macroporosidad en las diferentes fracciones presentó los mayores componentes de varianza atribuible al tratamiento (Tabla 3.4b). La $P_{Mac>300}$ presentó el mayor valor con un componente de varianza para el tipo de suelo y residual muy bajo. También mostró un efecto aleatorio más importante

del suelo con respecto al subsitio. La $P_{Mac >50}$ presentó el AIC más bajo, indicado un buen ajuste del modelo para evaluar las diferencias entre tratamientos y profundidad.

Dentro de las *variables de tendencia central de la distribución estadística* (D_{media} , $D_{mediana}$, D_{moda}), la D_{moda} presentó el mayor componente de varianza en el tratamiento y la menor AIC con respecto a $D_{mediana}$ y D_{media} (Tabla 3.4b). Como se puede observar en la misma tabla, la D_{moda} presentó un efecto aleatorio del tipo de suelo menor al resto de las variables, mientras que el efecto de subsitio únicamente fue importante para $D_{mediana}$ y D_{moda} .

Las *variables de forma de la curva de distribución* (dispersión estándar, asimetría y curtosis) presentaron bajos valores de la componente de varianza del tratamiento y altos valores de AIC, lo cual significa una baja performance del modelo para resolver el efecto de los factores. Por otra parte, la variable curtosis, presentó una distribución no normal ($p < 0,001$, Shapiro - Wilkis), aun siendo esta corregida mediante distintas metodologías, por lo que sólo se presentará sus resultados a nivel descriptivo.

3.3.2.1 Tamaño de poros

Para el tamaño de poros estudiados se encontró que la $P_{Mac >1000}$, $P_{Mac >300}$ y la $P_{Mac >50}$ presentaron un comportamiento muy similar. Para las profundidades 0-5 y 5-10 cm las tres variables presentaron un ordenamiento $AN > BP > MP$ mientras que en el estrato más profundo (10-20 cm). BP presentó los mayores valores con respecto a AN y MP. Sin embargo se puede considerar que la variable $P_{Mac >300}$ fue levemente más efectiva en separar los distintos tratamientos ya que presentó un AIC levemente menor para el primer y segundo estrato respectivamente con respecto al valor de $P_{Mac >1000}$ y a $P_{Mac >50}$.

Como se mencionó con anterioridad, la variable $P_{Mac >300}$ es posible interpretarla para todos los suelos de forma conjunta (Tabla 3.4a, Figura 3.9). En este modelo, los tratamientos de manejo presentaron interacción con la profundidad ($p < 0,05$). Para el estrato 0-5 cm, BP presentó valores significativamente mayores con respecto a MP mientras que AN y BP no presentaron diferencias significativas. En el estrato 5-10 cm, si bien la tendencia del ordenamiento continúa siendo $AN > BP > MP$ (no significativo), sólo se encontraron diferencias entre el AN y los tratamientos cultivados. Por último en el estrato 10-20 cm, el tratamiento BP presentó el mayor valor diferenciándose significativamente de AN y MP.

Esta variable ($P_{Mac >300}$), la cuál fue la más efectiva para discriminar los tratamientos, posee límites o umbrales descritos en la literatura. En todos los estratos, el tratamiento MP presentó valores inferiores al límite crítico para el desarrollo radicular y drenaje rápido de agua, establecidos por Reynolds et al. (2009) ($0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) mientras que lo mismo sucedió para BP en el estrato 5-10 cm. También se puede observar en la Figura 3.8, que el AN en los estratos superiores presentó valores de $P_{Mac >300}$ muy cercanos al límite máximo del rango óptimo propuesto por Reynolds et al. (2009) ($0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) mientras que en el estrato 10-20 AN y BP se encontraron muy cerca de los niveles inferiores de dicho rango (suelo compactado o degradado).

Al considerar el modelo completo, se pudo observar que para $P_{Mac >50}$ y $P_{Mic <50}$, el modelo presentó interacciones sitio*tratamiento y tratamiento*profundidad, con una triple interacción sitio*tratamiento*profundidad no significativa (Figura 3.10). Como se presentó con anterioridad, el sitio no afectó la $P_{Mac >300}$ mientras que para la $P_{Mac >1000}$, si bien presentó tendencias muy parecidas al $P_{Mac >300}$, se encontraron efectos

significativos de la triple interacción, por lo que sus resultados descriptivos son presentados en la Tabla A.5.

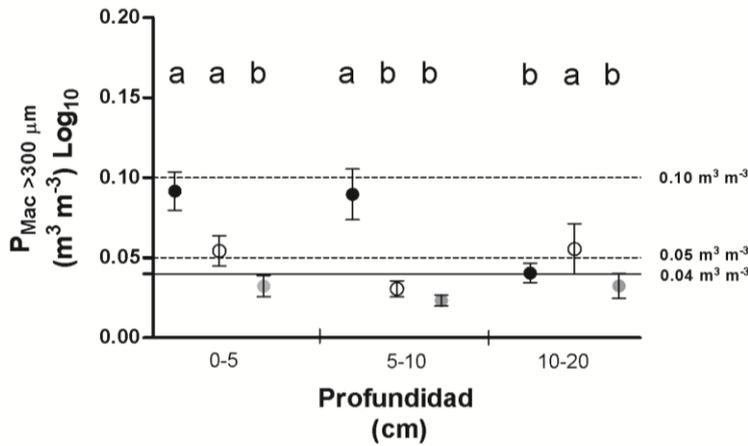


Figura 3.9. Macroporosidad >300 µm ($P_{Mac} >300$) para Ambiente natural (AN - círculo negro), Buenas prácticas (BP - círculo blanco) y Malas prácticas (MP - círculo gris) para 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Letras diferentes corresponden a diferencias significativas entre tratamientos para cada profundidad (Tukey, $p < 0,05$).

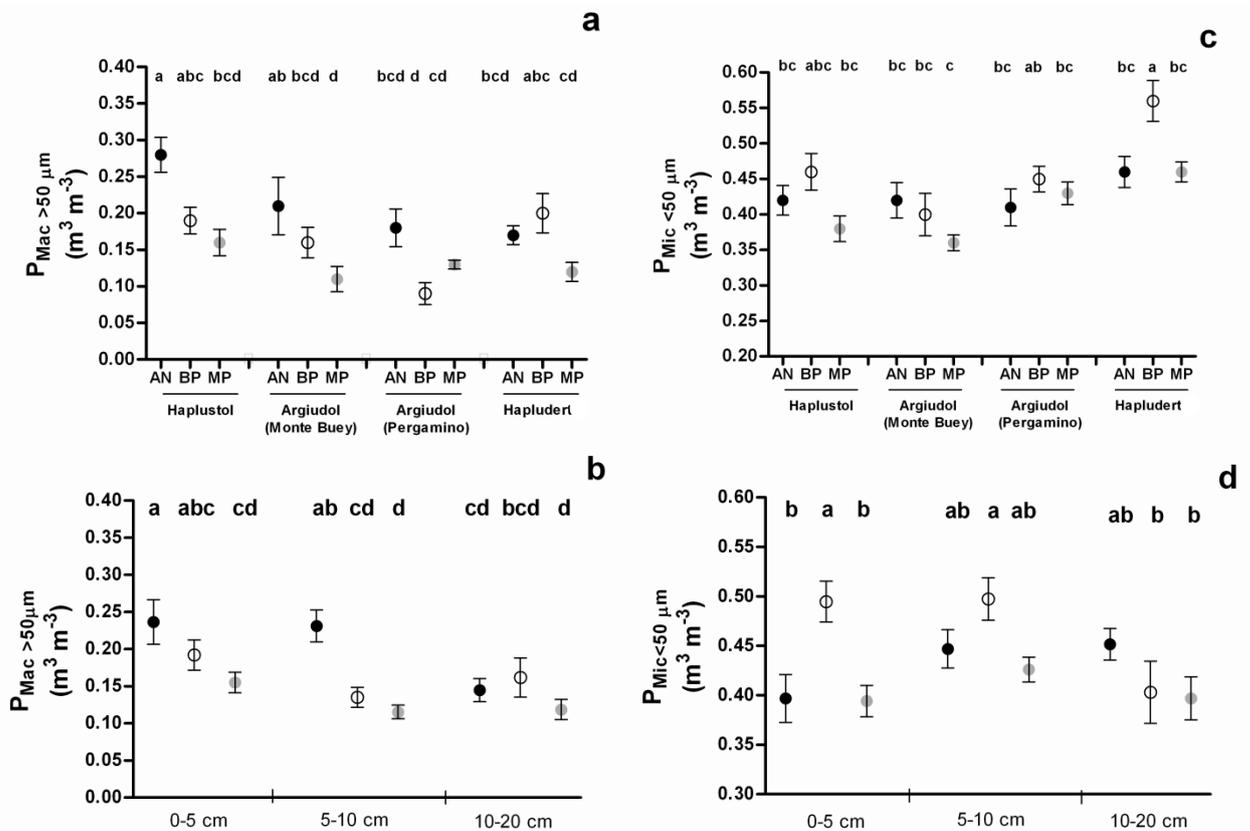


Figura 3.10 a y c) Valores promedio (0-20 cm) de macroporosidad >50 µm ($P_{Mac} >50 \mu m$) y microporosidad <50 µm ($P_{Mic} <50 \mu m$) para cada suelo evaluado (Haplustol, Argiudol -Monte Buey, Argiudol -Pergamino y Hapludert, b y d) Valores promedio (suelos) para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm para el Ambiente natural (AN - círculo negro), Buenas prácticas (BP - círculo blanco) y Malas prácticas (MP - círculo gris). Letras diferentes corresponden a diferencias significativas entre las interacciones entre los factores de cada gráfico (LSD, $p < 0,05$).

La $P_{Mac >50}$, tanto en el Haplustol como en el Argiudol (Monte Buey), el AN se diferenci6 significativamente de MP (Figura 3.10a). Por otro lado, en el Argiudol (Pergamino) y en el Hapludert, no se encontraron diferencia significativas entre los tratamientos. Tambi6n se puede mencionar que el AN del Haplustol present6 la $P_{Mac >50}$ m6s elevadas del estudio, mientras que BP del Argiudol (Pergamino) present6 los valores m6s bajos (Figura 3.10a). Cuando se tuvo en cuenta las profundidades se pudo observar que AN se diferenci6 significativamente de MP en las profundidades m6s superficiales, siendo BP levemente superior a MP, sin presentar diferencias estadística entre ambos. En profundidad (10-20 cm) no existieron diferencias entre tratamientos (Figura 3.10b).

En cuanto a la microporosidad ($P_{Mic <50}$), el tratamiento BP present6 valores superiores al MP, siendo esta diferencia significativa 6nicamente para el Hapludert. Por otro lado, el AN present6 valores intermedios para el Haplustol y Hapludert, m6s altos para el Argiudol (Monte Buey) y m6s bajos para el Argiudol (Pergamino) (Figura 3.10c). Cuando se consider6 las profundidades, se pudo observar que para los estratos superficiales (0-5 y 5-10 cm), BP present6 valores mayores con respecto a AN y MP, siendo esta diferencia significativa en 0-5 cm. Por otro lado, en el estrato 10-20 cm no existieron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 3.10c).

3.3.2.2 Variables de distribuci6n de tama6o de poros

De forma descriptiva, se puede mencionar que en los dos primeros estratos para todas las variables de *tendencia central de la distribuci6n de poros* presentaron un ordenamiento de tratamientos de manejo de acuerdo a AN>BP>MP mientras que para el estrato 10-20 cm el ordenamiento result6 BP>AN>MP (Tabla 3.6, Figura 3.11). Tambi6n se pudo observar una cierta homogeneizaci6n en el comportamiento de las curvas hacia el estrato m6s profundo. Mientras que todas las variables disminuyeron su valor de 0-5 a 5-10 cm, en el estrato 10-20 cm se encontr6 valores ligeramente superiores a 5-10 cm (Tabla 3.5).

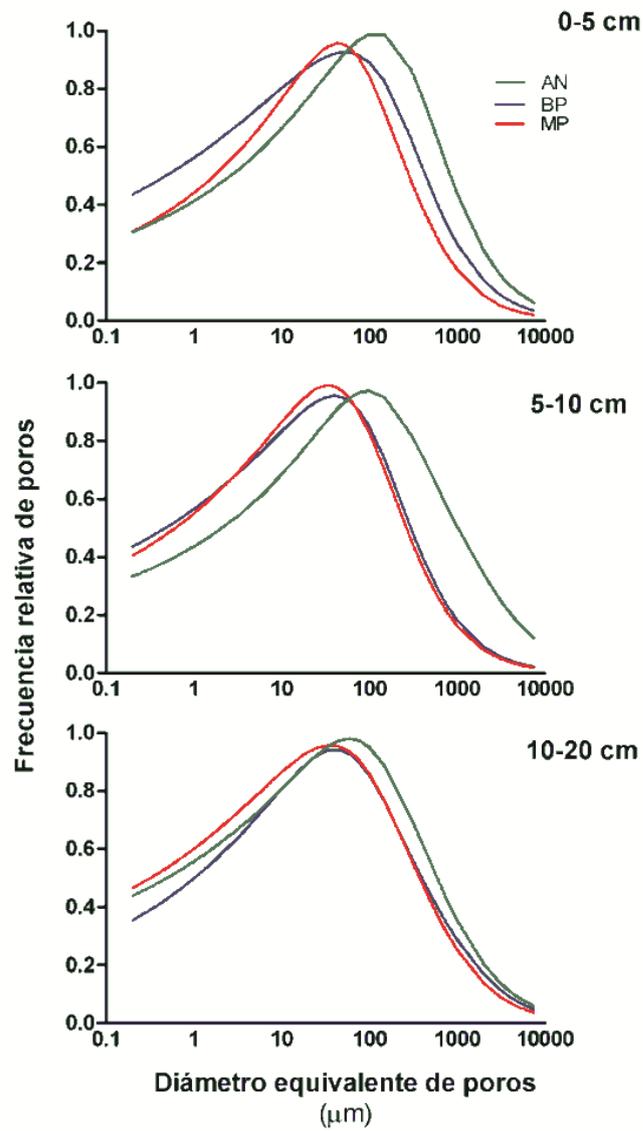


Figura 3.11 Distribución volumétrica de poros (normalizada) para el manejo Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para cada profundidad evaluada, 0-5, 5-10 y 10-20 cm (Promedio de todos los suelos).

Tabla 3.5 Promedio para todos los suelos de las variables de distribución de tamaño de poros (Moda - D_{moda} -, Mediana - $D_{mediana}$ -, Media - D_{media} -, Dispersión estándar -DE-, Curtosis y Asimetría) para los tratamientos Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm.

Profundidad (cm)	Trat. de Manejo	Variables de tendencia central			Variables de forma de la curva		
		D_{moda} (μm)	$D_{mediana}$ (μm)	D_{media} (μm)	DE (-)	Asimetría (-)	Curtosis (-)
0-5	AN	103,9 8,3†	24,5 8,1	15,6 6,1	6785 5183	-0,374 0,020	1,142 0,004
	BP	64,1 12,4	16,3 9,2	11,8 8,1	1413 674	-0,383 0,022	1,139 0,003
	MP	51,4 7,3	16,2 5,2	11,5 4,7	876 816	-0,336 0,026	1,146 0,003
5-10	AN	161,1 36,7	26,1 7,8	15,6 4,9	33218 29790	-0,368 0,023	1,140 0,005
	BP	42,5 6,6	11,4 4,8	8,0 3,8	8019 5197	-0,375 0,023	1,140 0,004
	MP	36,6 3,4	7,7 2,4	4,7 2,0	6236 5680	-0,370 0,020	1,144 0,003
10-20	AN	72,1 9,3	15,7 6,7	11,4 5,9	5472647 5454329	-0,374 0,029	1,135 0,005
	BP	104,4 33,2	29,7 11,3	18,7 8,2	2507 2454	-0,343 0,019	1,149 0,003
	MP	54,6 13,7	11,9 3,3	6,7 2,0	346434 232323	-0,374 0,017	1,142 0,006
Rango óptimo	Shahab et al. 2013	10-45	3-13	1-7	8-95	-0,25 a -0,40	1,15 - 1,16
	Reynolds et al. 2002	60 -140	3-7	0,7 - 2	400 - 1000	- 0,43 a - 0,41	1,13 - 1,14

† Corresponde al error estándar

Como se mencionó con anterioridad únicamente la D_{moda} respondió a un modelo reducido (Tabla 3.4). Así, la D_{moda} presentó para todos los estratos valores superiores en BP con respecto a MP aunque estas diferencias no fueron significativas. Por otro lado, el AN presentó una D_{moda} mayor en los dos primeros estratos diferenciándose de los tratamientos agrícolas, en el estrato 10-20 cm (Figura 3.12).

En el estrato 5-10 cm, los tratamientos agrícolas presentaron valores por debajo del rango óptimo propuesto para suelos agrícolas por Shahab et al. (2013) (10-45 μm) mientras que en el resto de los estratos y para AN se encontraron valores por encima de dicho rango. Según el rango propuesto por Reynolds et al. (2002) (60-140 μm) para suelos agrícolas en suelos con un amplio espectro textural (arenosos hasta arcillosos), todos los estratos de MP presentaron valores inferiores a dicho rango mientras que AN y BP presentaron valores dentro del mismo (Tabla 3.5).

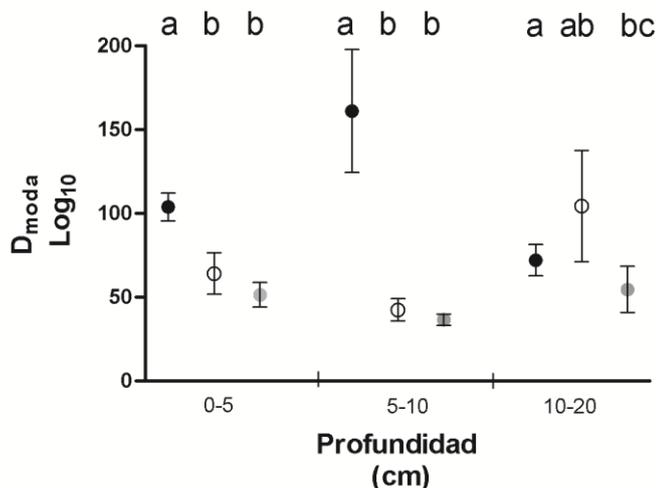


Figura 3.12 Diámetro de la moda de poros (D_{moda}) para Ambiente natural (AN - círculo negro), Buenas prácticas (BP - círculo blanco) y Malas prácticas (MP - círculo gris) para 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Letras diferentes corresponden a diferencias significativas entre tratamientos para cada profundidad (Tukey, $p < 0,05$).

Considerando el modelo completo, (Tabla 3.6, Figura A.5), se puede observar que el D_{mediana} y D_{media} presentaron patrones similares a D_{moda} , si bien en el Haplustol, Argiudol (Pergamino) y Hapludert dichos valores son exponencialmente menores entre sí ($D_{\text{moda}} > D_{\text{mediana}} > D_{\text{media}}$) mientras que para el Argiudol (Monte Buey), los valores de D_{mediana} y D_{media} son relativamente altos no presentando dicha caída (Tabla 3.6). Además estas variables presentaron para el Argiudol (Pergamino) y el Hapludert valores inferiores (en diversos tratamientos y profundidades) a los propuestos como rangos óptimos (Tabla 3.6). El modelo resultante, responde a la triple interacción suelo*tratamiento*profundidad, por dicha razón, y porque los resultados, como acaba de mencionarse presentan un comportamiento muy similar a D_{moda} , no se presentarán los resultados *in extenso*.

En las *variables de forma de la curva de distribución de tamaños*, también se encontró una triple interacción suelo*tratamiento*profundidad. De forma resumida, se pudo advertir que el Haplustol y Argiudol (Monte Buey) presentaron valores de DE sensiblemente inferiores a los presentado por los suelos más pesados (Argiudol - Pergamino y Hapludert). También se puede observar en los suelos franco limosos (Argiudoles), que la DE disminuye exponencialmente en el sentido AN>BP>MP, presentando una homogeneización de los tamaños de poros hacia MP (Tabla 3.6). La asimetría y la curtosis no presentaron un patrón claro de acuerdo a los tratamientos evaluados.

Además, se pudo encontrar un ordenamiento para la DE de AN>BP>MP para 0-5 y 5-10 cm, mientras que el ordenamiento para 10-20 cm fue AN>MP>BP. En todos los casos dicha variable superó el rango propuesto por Shabab et al. (2013) y Reynolds et al. (2009) (rangos descriptos para una amplio rango textural), superando en algunos casos por varios órdenes de magnitud. Por otro lado, la asimetría y la curtosis no presentaron un patrón claro de comportamiento. La asimetría en general presentó valores intermedios según el rango propuesto por Shabab et al. (2013) siendo estos levemente inferiores al propuesto por Reynolds et al. (2009). En el sentido inverso para la curtosis, los valores presentaron valores levementes superiores encuadrándose mejor con los rango de este último autor (Tabla 3.6).

Tabla 3.6 Valores promedio de las variables de tendencia central (Moda - D_{moda} -, Mediana - $D_{mediana}$ -, Media - D_{media} -) y de forma de la curva de distribución de tamaño de poros (Dispersión estándar -DE-, asimetría y curtosis) para los tratamientos Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para las para los suelos, Haplustol, Argiudol – Monte Buey -, Argiudol -Pergamino- y Hapludert, para cada profundidad evaluada, 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada profundidad/suelo. †Error estándar.

Suelo	Prof. (cm)	Tratamiento	Variables de tendencia central						Variables de forma de la curva de tamaño					
			D_{moda} (μm)		$D_{mediana}$ (μm)		D_{media} (μm)		DE (-)		Asimetría (-)		Curtosis (-)	
Haplustol	0-5	AN	115,7	27,5 [†]	12,6	5,4	4,6	2,5	162,5	58,3	-0,40	0,01	1,14	0,003
		BP	31,2	4,4	3,9	0,9	1,5	0,6	129,0	61,6	-0,39	0,02	1,15	0,004
		MP	42,4	32,9	6,4	4,5	2,7	1,8	95,0	51,3	-0,38	0,02	1,15	0,004
	5-10	AN	227,8	245,9	35,0	40,9	14,5	17,5	96,1	16,8	-0,39	0,01	1,15	0,001
		BP	31,5	7,0	3,3	0,8	1,2	0,3	163,2	61,8	-0,40	0,01	1,14	0,003
		MP	29,8	5,2	3,9	0,5	1,5	0,2	109,7	9,1	-0,39	0,00	1,15	0,001
	10-20	AN	44,1	22,5	5,4	2,3	2,0	0,8	117,0	19,4	-0,39	0,00	1,15	0,001
		BP	145,5	205,9	19,2	26,9	7,4	10,4	102,2	7,6	-0,39	0,00	1,15	0,001
		MP	79,1	100,5	11,8	14,1	4,8	5,6	75,8	15,5	-0,38	0,01	1,15	0,001
Argiudol (Monte Buey)	0-5	AN	71,6	12,5	7,8	12,7	4,0	6,9	5779,7	5707,1	-0,41	0,05	1,13	0,020
		BP	100,3	39,1	49,4	56,0	40,7	50,8	1625,9	2800,4	-0,31	0,13	1,14	0,020
		MP	62,1	26,9	38,2	26,1	31,8	23,9	17,9	23,1	-0,25	0,11	1,15	0,010
	5-10	AN	79,2	15,6	44,7	9,5	34,0	7,9	8,1	1,4	-0,26	0,01	1,15	0,001
		BP	72,9	1,9	32,3	19,7	23,7	17,9	34,9	47,2	-0,30	0,08	1,15	0,004
		MP	40,8	10,8	13,0	11,7	8,2	9,5	47,6	33,0	-0,34	0,06	1,15	0,004
	10-20	AN	64,5	15,6	36,9	34,8	32,8	32,3	2583,5	4467,7	-0,27	0,16	1,13	0,010
		BP	159,3	101,0	79,9	50,5	57,3	36,1	13,3	0,2	-0,25	0,00	1,15	0,000
		MP	48,1	24,4	20,2	13,1	13,4	9,4	21,2	12,4	-0,31	0,04	1,16	0,002
Argiudol (Pergamino)	0-5	AN	103,3	13,6	19,6	31,0	13,0	21,9	21181,9	35967,8	-0,39	0,09	1,13	0,020
		BP	25,3	17,1	0,7	0,8	0,2	0,2	2839,6	3699,4	-0,43	0,01	1,13	0,010
		MP	33,4	9,5	11,9	5,2	8,0	4,9	38,6	50,0	-0,31	0,07	1,15	0,005
	5-10	AN	163,9	44,2	1,5	1,6	0,2	0,3	123743,7	204599,1	-0,45	0,01	1,12	0,010
		BP	21,4	17,8	8,5	14,2	6,5	11,2	939,6	1163,4	-0,37	0,10	1,14	0,010
		MP	28,9	4,6	10,7	10,4	7,9	10,0	54,5	57,5	-0,32	0,10	1,15	0,004
	10-20	AN	74,7	32,9	1,5	1,2	0,3	0,3	64489,3	109570,8	-0,44	0,02	1,13	0,010
		BP	27,0	9,6	9,6	4,3	5,9	2,9	20,6	3,4	-0,33	0,01	1,16	0,000
		MP	53,9	0,1	15,6	1,3	8,6	1,0	28,8	4,1	-0,34	0,01	1,15	0,001
Hapludert	0-5	AN	125,0	31,3	58,2	28,2	40,9	24,1	14,6	8,8	-0,30	0,04	1,16	0,001
		BP	99,8	22,6	11,1	11,9	5,0	6,6	1058,0	1629,1	-0,40	0,04	1,14	0,010
		MP	67,6	21,8	8,2	9,5	3,6	4,6	3353,1	5624,2	-0,41	0,04	1,14	0,020
	5-10	AN	173,5	97,1	22,9	26,7	13,8	19,0	9024,4	15525,8	-0,38	0,08	1,14	0,020
		BP	44,2	15,4	1,6	2,6	0,5	0,9	30937,4	27020,3	-0,44	0,03	1,13	0,020
		MP	46,9	15,9	3,2	5,0	1,3	2,1	24730,8	38014,6	-0,43	0,04	1,13	0,020
	10-20	AN	105,1	31,0	19,0	25,2	10,5	15,4	2182339,1	3779904,0	-0,40	0,07	1,13	0,030
		BP	85,8	58,3	10,1	9,2	4,1	3,6	9891,8	16981,3	-0,40	0,04	1,14	0,020
		MP	37,3	18,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1385609,5	1184274,8	-0,46	0,00	1,11	0,002
Rango óptimo	Shahab et al. 2013		10-45		3-13		1-7		8-95		-0,25 a -0,40		1,15 - 1,16	
	Reynolds et al. 2002		60 -140		3-7		0,7 - 2		400 - 1000		- 0,43 a - 0,41		1,13 - 1,14	

3.3.2.3 Efecto de las variables de manejo en los parámetros de tamaño y distribución de tamaño de poros.

En esta tesis, el efecto de las *variables de manejo* sobre los variables de tamaño y distribución de tamaño de poros se encontró principalmente en el estrato 0-5 cm y en menor medida en el estrato 5-10 cm (Tabla 3.7). En el estrato 0-5 cm, se encontraron correlaciones significativas para el tamaño de poros entre casi todas las variables, destacándose las diversas correlaciones de dichas variables y el CP1_manejo, variable que expresa las diferencias totales entre los distintos tratamientos (Tabla 3.7). También, se encontraron mayores coeficientes de correlación cuando se removió el Hapludert, si bien este aumento no es muy marcado. Las variables que presentaron coeficientes de correlación más altos y con mayor cantidad de variables de manejo fueron $P_{Mac >300}$, $P_{Mac >1000}$ mientras que en segundo lugar se podría señalar a la $P_{Mac >50}$ y $P_{Mic <50}$. En este sentido, se observó una regresión con un valor elevado de R^2 entre $P_{Mac >300}$ y $P_{Mac >1000}$ y el ISI (e.g. Figura 3.13a). En la regresión presentada en esta figura, se puede observar un aumento en el valor de la $P_{Mac >300}$ ante aumentos en el ISI en los suelos Molisoles. Por otro lado, no se encontraron estos efectos en el suelo Hapludert. También dichos tamaños de poros presentaron una regresión negativa y significativa con el número de cultivos de soja en la rotación (Soja/Cultivos) observándose en ese caso una relación única para todos los tipos de suelos (Figura 3.12b). En estas regresiones se puede observar valores ligeramente más altos en el coeficiente de determinación para $P_{Mac >300}$ con respecto a $P_{Mac >1000}$.

Cuando se analiza el siguiente estrato (5-10 cm) para las *variables de tamaño de poros*, se observa que aquellas determinaciones más dinámicas que dependen de la composición de la rotación pierden significancia. No obstante, tanto el ISI como el ISI_{agr} aumentaron el coeficiente de correlación y significancia. En la Figura 3.12c se observa en detalle el comportamiento de la $P_{Mac >300}$ y el ISI_{agr} , contemplándose una relación única para todos los suelos. Por otra parte, el efecto del manejo prácticamente desaparece en el estrato 10-20 cm, mientras que si se analiza el efecto del manejo en promedio para todos los estratos (0-20 cm) el efecto se diluye presentando para las variables de tamaño de poros coeficientes de correlación menores a los encontrados en el estrato 0-5 cm (Tabla 3.7)

A diferencia de los parámetros anteriores, las *variables de tendencia central y forma de las curvas de distribución del tamaño* no se correlacionaron en ningún estrato con el CP1_manejo. En general se encontraron correlaciones significativas con el ISI y con los Años bajo SD, mientras que la composición de los cultivos no estuvieron reflejadas en las correlaciones para estas variables (Tabla 3.7). Solamente el DE se correlacionó negativamente con la variable Soja/Maíz en el estrato 0-20 cm, mientras que también se correlacionó de forma positiva en este mismo estrato con Maíz/Cultivos determinado sobre todos los suelos. La variable que más correlaciones y más altos coeficientes de correlación presentó fue la D_{moda} principalmente en el estrato 5-10 cm. Esta variable presentó una alta correlación con el ISI y con los Años bajo SD. Mientras que para el ISI fue posible modelizar dicha variable con todos los suelos (Figura 3.13d), para los Años bajo SD se debió modelizar dichos comportamientos discriminando entre Molisoles y el Hapludert. Como se observa en la Figura 3.12e, los Molisoles presentaron una tendencia positiva entre los años bajo SD y la D_{moda} mientras que el Hapludert no presentó relación alguna. Para las variables relacionadas con la distribución de tamaños de poros, el efecto del manejo fue

relativamente homogéneo en los estratos más superficiales (0-5 y 5-10 cm), logrando correlaciones similares al considerar el estrato 0-20 cm (Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Correlaciones (Pearson) entre las variables de tamaño y distribución de tamaño de poros y variables de manejo para las tres profundidades evaluadas (0-5, 5-10 y 10-20 cm). TS: Todos los suelos, SH: Sin Hapludert. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

	CPI Manejo	ISI		ISI _{agr}		Años SD		Soja/Cultivos		Soja/Maíz		Maíz/Cultivos		Soja único cult.	
		TS	SH	TS	SH	TS	SH	TS	SH	TS	SH	TS	SH	TS	SH
0-5 cm															
log P _{Mac >1000 μm}	-0,55**	0,61***	0,80***	0,47*	0,56*			-0,58**	-0,60**	-0,62**	-0,51*	0,50*		-0,51*	-0,60**
log P _{Mac >300 μm}	-0,60**	0,64***	0,81***	0,50*	0,60**	0,59*		-0,61**	-0,60**	-0,64***	-0,55*	0,46*		-0,55**	-0,60**
P _{Mac >50 μm}	-0,41*	0,41*	0,52**			0,45*	0,53*	-0,4*							
P _{Mic <50 μm}	-0,47*			0,43*				-0,45*		-0,55**	-0,59*	0,42*	0,51*	-0,41*	
log D _{moda}		0,55***	0,60***			0,47*	0,63***								
log D _{mediana}															
log D _{media}															
log DE			0,42*							-0,5*					
log Asimetría			-0,40*												
5-10 cm															
log P _{Mac >1000 μm}		0,74***	0,74***	0,66***	0,50*			-0,46*							-0,41*
log P _{Mac >300 μm}		0,68***	0,79***	0,72***	0,55*			-0,43*							
P _{Mac >50 μm}		0,73***	0,74***	0,5*	0,50*										
P _{Mic <50 μm}															
log D _{moda}		0,76***	0,75***			0,58**	0,72***								
log D _{mediana}							0,48*								
log D _{media}															
log DE															
log Asimetría															
10-20 cm															
log P _{Mac >1000 μm}															
log P _{Mac >300 μm}															
P _{Mac >50 μm}				0,43*											
P _{Mic <50 μm}							-0,48*								
log D _{moda}			-0,40*			0,51*	0,5*								
log D _{mediana}			-0,40*			0,46*	0,58*								
log D _{media}			0,47*			0,44*	0,58*								
log DE			-0,80***												
log Asimetría						0,55**	0,6**						0,55*		
0-20 cm															
log P _{Mac >1000 μm}	-0,44*	0,48***	0,64***		0,57*	0,52*		-0,45*	-0,50*	-0,44*					-0,50*
log P _{Mac >300 μm}	-0,49*	0,58***	0,67***	0,51*	0,57*	0,41*	0,55*	-0,51*	-0,50*					-0,46*	-0,50*
P _{Mac >50 μm}		0,55***	0,64***	0,50*	0,50*										
P _{Mic <50 μm}															
log D _{moda}		0,61***	0,59**	0,56***	0,62**										
log D _{mediana}				0,58***	0,59*	0,58***	0,59*								
log D _{media}				0,54***	0,55*	0,54***	0,55*								
log DE			0,52**							-0,50***	-0,50*	0,51*			
log Asimetría				0,41*		0,41*									

Macroporosidad >1000 μm -log P_{Mac >1000 μm}, Macroporosidad >300 μm -log P_{Mac >300 μm}, Macroporosidad >50 μm -P_{Mac >50 μm}, Microporosidad <50 μm -P_{Mac <50 μm}, Moda -D_{moda}, Mediana -D_{mediana}, Media -D_{media}, Dispersión estándar -DE-, Índice de intensificación de cultivo -ISI-, Índice de intensificación de cultivo para los manejos agrícolas -ISI_{agr}-, Años bajo siembra directa -años SD-, Relación de años con soja sobre la cantidad total de cultivos -Soja/Cultivos, Relación de años con soja sobre maíz -Soja/Maíz, Relación de años con maíz sobre la cantidad total de cultivos -Maíz/Cultivos y soja como único cultivo -Soja único cultivo.

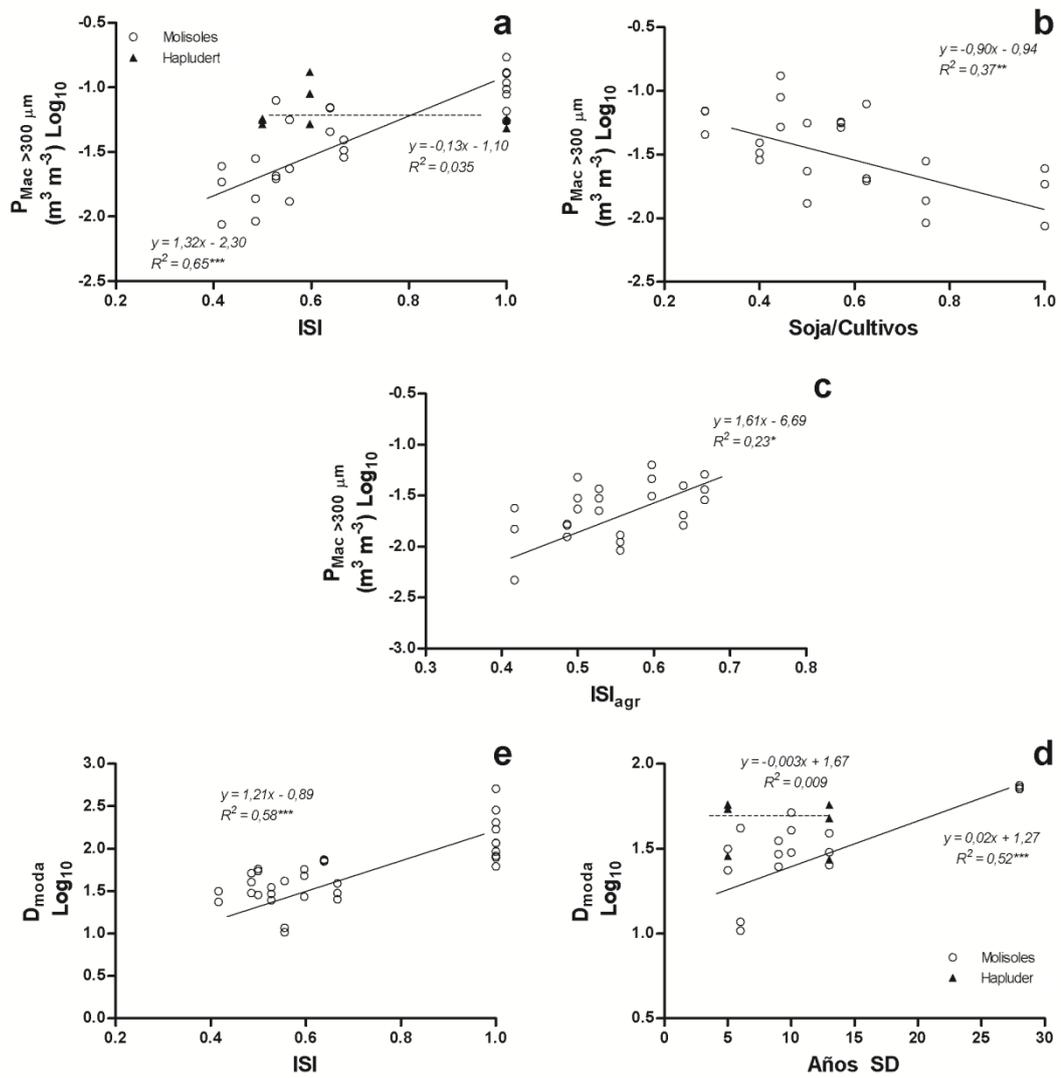


Figura 3.13 Regresiones lineales entre a) $P_{Mac >300 \mu m}$ e ISI, b) $P_{Mac >300 \mu m}$ y Soja/Cultivos, c) $P_{Mac >300 \mu m}$ e ISI_{agr} para la profundidad 0-5 cm. d) D_{moda} e ISI y e) D_{moda} y Años SD para la profundidad 5-10 cm. Línea de tendencia punteada corresponde a Hapludert. $P_{Mac >300 \mu m}$: Macroporosidad mayor a 300 μm , ISI: Intensificación de la secuencia agrícola, Años SD: Años bajo siembra directa. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

3.3.2.4 Efecto de distintas propiedades del suelo en las variables de tamaño y distribución de tamaño de poros

Para las *variables de tamaño de poros*, se puede señalar en primer lugar la correlación significativa de la $P_{Mic < 50}$ con el CP1_suelo, mientras que el resto de las variables de tamaño se correlacionaron con el CP2_suelo (Tabla 3.8). Por consiguiente, como se ve reflejado en la misma tabla, dichas variables se correlacionaron con numerosas propiedades físicas y químicas del suelo. Por ejemplo, el limo se correlacionó de forma negativa para todos los tamaños de poros mientras que también presentaron una correlación muy alta y positiva con la AA. Además se correlacionaron de forma positiva con el contenido de E+I/E, si bien, con excepción de la $P_{Mic < 50}$, este efecto desapareció cuando se removió del análisis el suelo Hapludert. Para los poros de mayor tamaño, $P_{Mac > 1000}$ y $P_{Mac > 300}$, se encontraron correlaciones positivas con la HE.

Las propiedades físicas y químicas del suelo afectaron de forma diferente la *variables de tendencia central y forma de la curva de distribución de tamaño de poros* (Tabla 3.9). Por un lado no se observaron correlaciones significativas entre el CP1_suelo y las *variables de tendencia central*, mientras que las correlaciones con las variables individuales fueron más asiduas y con mayor coeficiente de correlación siguiendo el ordenamiento $D_{moda} < D_{mediana} < D_{media}$, es decir que a medida que los poros decrecían de tamaño el rol del suelo estuvo más reflejado en dichas correlaciones (Tabla 3.9). Para la D_{moda} , que corresponde a los poros más frecuentes (y mayor tamaño), sólo se encontraron correlaciones con la HE y con la AA con tendencias positivas para ambos casos. Mientras que para $D_{mediana}$ y D_{media} , el Na^+ y el PSI disminuyeron significativamente los valores de dichas variables mientras que el Ca^{+2} las incrementó. También se puede observar que la mayoría de estas correlaciones aumentaron su coeficiente al remover el Hapludert.

Por otro lado, dentro de las variables de forma de la curva de distribución de poros, la DE se correlacionó positivamente con CP1_suelo indicando una fuerte relación del gradiente textural/mineralógico con dichas variables mientras que la asimetría se correlacionó significativamente con CP2_suelo (Tabla 3.9). Por ello, se puede observar numerosas correlaciones con las variables individuales siguiendo el mismo patrón de este gradiente textural y mineralógico expresado por los componentes principales.

3.3.2.5 Efecto de distintas fracciones de carbono orgánico del suelo en las variables de tamaño y distribución de poros

Las *variables de tamaño de poros*, presentaron correlaciones altas y positivas con el COP_g , y COP_f (Tabla 3.8). Ejemplo de ello se destacan en las regresiones entre COP_g y $P_{Mac > 300}$ y COP_g y $P_{Mac > 1000}$ (Figuras 3.14 a y b) donde puede observarse una tendencia positiva y significativa para los Molisoles, mientras que en el Hapludert, los distintos tamaños de poros no fueron afectadas por el COP_g . También los dos tamaños de poros mayores, $P_{Mac > 1000}$ y $P_{Mac > 300}$ se correlacionaron de forma positiva con el CH_s cuando el Hapludert fue removido del análisis (Tabla 3.8).

Para las *variables de tendencia central* sólo se encontraron efectos fuertes del COP sobre el D_{moda} , principalmente para el COP_g para el set de datos sin el Hapludert (Tabla 3.9). Al igual que para $P_{Mac > 1000}$ y $P_{Mac > 300}$, los Molisoles presentaron una tendencia positiva, mientras que si bien en el Hapludert este efecto siguió siendo positivo, el mismo no fue significativo (Figura 3.14c). También, la D_{moda} presentó una correlación positiva con el CH_s , si bien esta no fue de gran expresión. Además existió

una correlación también débil entre el CH_t y la $D_{mediana}$ y la D_{media} . Dentro de las variables de forma de distribución de poros se encontraron diversas correlaciones con las distintas fracciones orgánicas abarcando ahora también fracciones más estables como el COT y el COM. El mayor coeficiente de correlación fue encontrado entre la DE y CHs ($r= 0,70$). Mientras que únicamente en los Molisoles el aumento de CHs se tradujo en un aumento de DE (Figura 3.14d).

Tabla 3.8 Correlación de Pearson entre las variables de tamaño de poros y propiedades del suelo y fracciones de carbono orgánico. Se presentan las correlaciones para todos los suelos y para todos los suelos sin el suelo Hapludert -sin Hapludert-. *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

	$\log P_{Mac > 1000 \mu m}$		$\log P_{Mac > 300 \mu m}$		$P_{Mac > 50 \mu m}$		$P_{Mic < 50 \mu m}$	
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert
Propiedades del suelo								
CP1_suelo		-		-		-	0,57***	-
CP2_suelo	-0,55***	-	-0,59***	-	-0,59***	-	-0,37*	-
Arcilla			0,18				0,62***	
Limo		-0,39*	-0,34*	-0,41*	-0,52**	-0,55**		
Arena					0,38*	0,52*	-0,33*	
CE						0,08	0,53***	
pH								
Ca ⁺²		-0,47*		-0,40*			0,62***	
Na ⁺	0,52**	0,41*	0,41*		0,22*		0,47**	
CIC					0,58**			
PSI		0,40*			0,35*	0,41*		
SB								
HE	0,46**	0,40*	0,46**	0,41*			0,61***	
Lp							0,52**	
Ll	0,37*						0,65***	
Ip	0,42*		0,36*				0,64***	
AA	0,60***	0,61***	0,59***	0,58**	0,33*	0,41*	0,45**	
E+I/E	0,41*		0,35*		0,17	0,51*	0,58***	
Fracciones de carbono orgánico								
COT							0,60***	
COPg	0,39*	0,60**	0,38*	0,64***		0,62***	0,51**	
COPf	0,43**	0,62***	0,47**	0,63***		0,48*	0,60***	
COM							0,54***	
CHt							-0,49**	
CHs		0,47*		0,49**				

Macroporosidad >1000 μm : $\log P_{Mac > 1000 \mu m}$, Macroporosidad >300 μm : $\log P_{Mac > 300 \mu m}$, Macroporosidad >50 μm : $P_{Mac > 50 \mu m}$, Microporosidad <50 μm : $P_{Mac < 50 \mu m}$, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, Lp: límite plástico, Ll: límite líquido, Ip: índice plástico, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificadas illita-esmectita, LBD: limo de baja densidad, COT: carbono orgánico total, COPg: Carbono orgánico particulado grueso, COPf: carbono orgánico particulado fino, COM: carbono orgánico mineralizable, CHt: hidratos de carbono total y CHs: hidratos de carbono soluble.

Tabla 3.9 Correlación de Pearson entre las variables de tendencia central y forma de la curva de distribución de poros y propiedades del suelo y fracciones de carbono orgánico. Se presentan las correlaciones para todos los suelos y para todos los suelos sin el suelo Hapludert -sin Hapludert-. *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

	log D _{moda}		log D _{mediana}		log D _{media}		Log DE		log asimetría	
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert
Propiedades del suelo										
CP1_suelo							0,53***			
CP2_suelo								0,52**		
Arcilla							0,58***			
Limo										0,44*
Arena							-0,50*			-0,40*
CE							0,47**			
pH										
Ca ⁺²				0,55**		0,61***				0,74***
Na ⁺				-0,60**	-0,40*	-0,70***	0,61***		-0,60***	-0,80***
CIC				0,46*		0,49**	0,50**			0,61***
PSI			-0,40*	-0,50*	-0,41*	-0,60**			-0,50**	-0,70***
SB							-0,41*			
HE	0,44*	0,49**					0,48**			
LP							0,37*			
LL							0,58***	0,47*		
Ip							0,62***	0,57**	-0,30*	
AA	0,42*	0,39*					0,51**	0,42*	-0,50**	-0,50*
E+I/E							0,46*			
Fracciones de Carbono orgánico										
COT							0,43**	0,43*		
COP _g	0,36*	0,61***					0,38*	0,46*		
COP _f	0,39*	0,59**								
COM							0,44**			0,38*
CH _t		0,38*		0,46*		0,45*	-0,40*		0,51**	0,47*
CH _s	0,33*	0,44*						0,70***		

Moda: Log D_{moda}, Mediana: Log D_{mediana}, Media: Log D_{media}, Dispersión estándar: Log DE, Log Curtosis y Log Asimetría, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, Lp: límite plástico, Ll: límite líquido, Ip: índice plástico, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificadas illita-esmectita, LBD: limo de baja densidad, COT: carbono orgánico total, COP_g: Carbono orgánico particulado grueso, COP_f: carbono orgánico particulado fino, COM: carbono orgánico mineralizable, CH_t: hidratos de carbono total y CH_s: hidratos de carbono soluble.

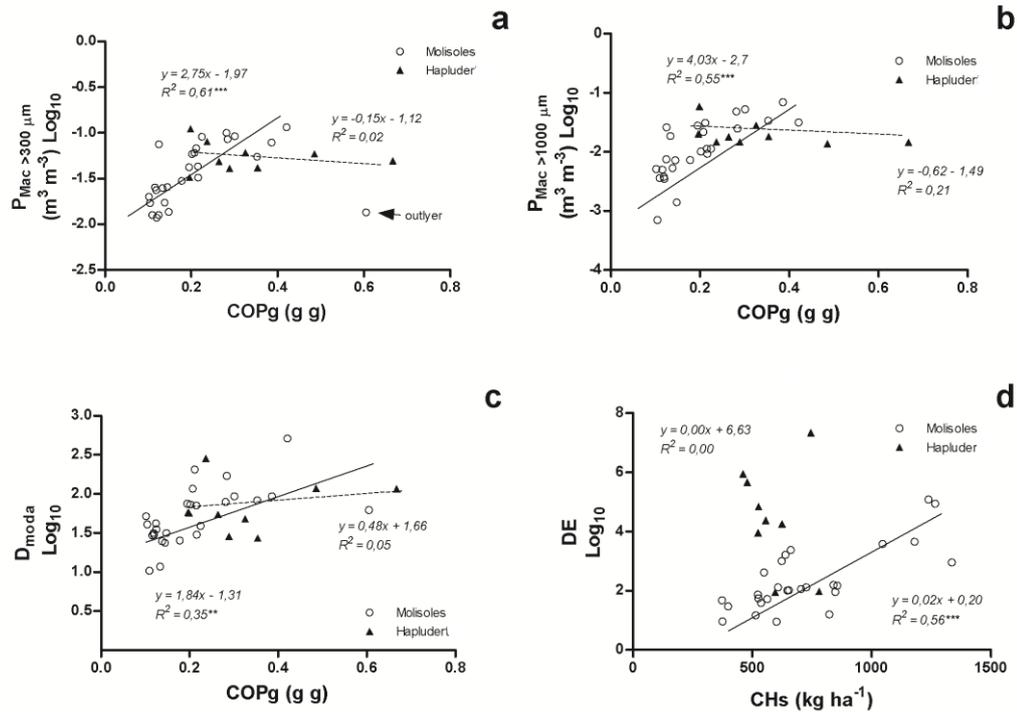


Figura 3.14 Regresiones lineales entre a) $P_{Mac >300 \mu m}$ y COP_g , b) $P_{Mac >1000 \mu m}$ y COP_g , c) D_{moda} y COP_g y d) DE y CHs . $P_{Mac >300}$ y $>1000 \mu m$: Macroporosidad mayor a 300 y 1000 μm respectivamente. Línea de tendencia punteada corresponde a Hapludert. DE : Dispersión estándar, COP_g : carbono orgánico particulado grueso, CHs : Hidratos de carbono soluble. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

3.3.2.6 Discusión sobre las variables de tamaño y distribución de tamaño de poros.

En esta sección se analizó el comportamiento de numerosas variables relacionadas con el tamaño y la curva de distribución de poros. Así a través de las distintas metodologías utilizadas, las variables de tamaño de poros y la D_{moda} (variable de tendencia central), se configuraron como las variables más eficaces para distinguir el efecto de las BP de las MP. Entre las variables de tamaño de poros, la $P_{Mac >300}$ fue la única que logró ser modelizada por los tratamientos de manera independiente al suelo. Esto también se ve reflejado en el alto componente de varianza atribuible al tratamiento encontrado (96,1%) con respecto a los otros tamaños. Las mayores diferencias entre BP y MP fueron encontradas en el estrato superficial y en el estrato más profundo. Además, al existir rangos óptimos para este variable, pudo comprobarse la utilidad, ya que para todas las profundidades, MP presentó valores por debajo del umbral crítico propuesto en la literatura ($0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Reynolds et al., 2002). En contraposición, si bien las variables $P_{Mac >50}$ y $P_{Mic <50}$ también presentaron diferencias entre BP y MP, los mayores valores de porosidad para ambas variables de MP sobre BP en el suelo Argiudol (Pergamino), no permitieron remover el efecto del sitio, disminuyendo la utilidad de estas variables. Otra de las razones de la preponderancia de este tamaño de poros puede radicar en que se trata de un tamaño que se halla ligado al tamaño de raíces y la actividad biológica, los cuales están afectados por el manejo del suelo (secuencia de cultivo, años bajos SD, etc.). Como se presentó en la Tabla 3.7, para 0-5 cm, todas las variables de tamaños de poros, pero especialmente la $P_{Mac >300}$ se correlacionaron de forma significativa con el $CP1_{manejo}$, indicando el aumento de los distintos tamaños de poros hacia las mejores prácticas agrícolas. Por otro lado, este tamaño de poros no

está muy influenciado de forma intensa por aspectos intrínsecos del suelo. Sólo se puede destacar la influencia negativa del contenido de limo sobre la macroporosidad en general y la influencia positiva de la AA sobre estos poros de mayor tamaño. Por último, la dinámica de un tamaño de poros mayor ($P_{Mac >1000}$) puede ser más errático y estar influenciado por grietas o artefactos.

Además se debe destacar que las *variables de tamaño de poros* fueron las únicas variables de esta sección en presentar asociaciones con las variables de manejo, las cual indican cambios en la secuencia de cultivos. No obstante, dichas asociaciones desaparecen en profundidad. En este sentido el ISI e ISI_{agr} fueron las variables de manejo que presentaron los coeficientes de correlación más altos y que mantuvieron o aumentaron dicho coeficiente también en 5-10 cm. Así una mayor ocupación del lote en el estrato 5-10 cm ($>ISI$) derivó en una porosidad mayor para todos los suelos con excepción del Argiudol (Pergamino).

Por último se debe mencionar que la $P_{Mac >300}$ y $P_{Mac >1000}$ fueron las variables que presentaron correlaciones más altas con el COP_g . Esta fracción se considera una de las fracciones más lábiles de carbono y es utilizado para evaluar cambios relativamente rápidos en el manejo del suelo. Así, la correlación positiva y significativa entre estas variables indica nuevamente la sensibilidad de estos tamaños de poros en detectar cambios en las prácticas agrícolas. No obstante, como fuera mencionado, no se encontró en el Hapludert ninguna relación de las distintas fracciones orgánicas con los distintos tamaños de poros. Esto puede deberse a que la formación y estabilización de la estructura en dichos suelos depende más de las características mineralógicas y texturales que del contenido de las fracciones carbonadas.

La D_{moda} fue la única *variable de tendencia central de la curva de distribución de tamaños* que presentó un comportamiento único considerando todos los suelos, en donde dicha variable presentó una tendencia $AN > BP > MP$, si bien las diferencias estadísticas sólo fueron significativas entre AN y los tratamientos cultivados. Considerando los rangos de D_{moda} menos estrictos (Reynolds et al., 2002), solamente el tratamiento MP presentó un D_{moda} por debajo de dichos límites. Esto confirma la utilidad de esta variable para demostrar el efecto de las buenas y malas prácticas sobre la calidad del suelo. Además, la estrecha relación encontrada entre la COP_g y la D_{moda} sugieren una alta sensibilidad de esta variable ante cambios en las prácticas de manejo, del mismo modo que con $P_{Mac >300}$. En particular, la D_{moda} fue efectiva en detectar cambios en la intensidad de cultivos (ISI) y fue sensible a los años bajo SD (Tabla 3.7). En este sentido, mediante el empleo de la D_{moda} , Castellini et al. (2013), logró separar distintos tipos de labranza (SD y labranza superficial), mientras que Shahab et al. (2013) lograron relacionar la D_{moda} con grupos de suelos que presentaban distintas calidades.

Por otro lado, tanto la D_{moda} como el resto de las variables de tendencia central, presentaron valores comparables con los umbrales propuestos por Shahab et al. (2013) y Reynolds et al. (2002), lo cual sería positivo para encuadrar dichos estudios en un contexto más amplio. En cuanto a las *variables de forma de la curva*, la DE presentó varios órdenes de magnitud de diferencia entre los valores encontrados en esta tesis y los rangos de literatura, lo cual indica a su vez, la alta heterogeneidad estructural de los suelos evaluados. El mayor valor encontrado de DE para AN sugiere que la actividad de la biota del suelo se refleja en una mayor diversidad de tamaños de poros. Por el contrario los bajos valores encontrados en las MP, indicarían una homogeneización del sistema poroso y una pérdida de actividad biológica.

También, de la misma forma que para las variables analizadas con anterioridad (DAP; PT, P_{estr}), los menores valores de D_{moda} fueron encontrados en el estrato 5-10 cm. Esto estaría en concordancia a lo encontrado por diversos autores (Alvarez et al. 2009; Bonel et al., 2005; Morrás et al., 2001) donde reportan inconvenientes físicos y estructurales especialmente en dicho estrato.

En síntesis, el perfil de la porosidad expresado principalmente por la $P_{\text{Mac}>300}$, D_{moda} y DE, lograron explicar el efecto de la intensidad de manejo, la cual para estas variables fue positivo. Por otro lado, si bien existió un efecto importante del suelo (principalmente debido al Hapludert), se logró modelizar algunas variables de forma independiente al suelo.

Sección C

3.3.3 Variables de almacenamiento de agua

Las distintas variables analizadas en esta sección presentaron una fuerte influencia del tipo de suelo, encontrándose diferencias significativas entre el modelo reducido y el modelo completo. Por dicha razón, es más adecuado el análisis de las variables considerando el efecto del tipo de suelo (Tabla 3.10a). En cuanto al efecto aleatorio del modelo (subsitio), se pudo observar que el desvío estándar relativo al residual presentó valores mayores para CA y CCR con respecto al resto de las variables medidas. Por otro lado, el componente de varianza atribuible al tratamiento fue alto para las variables relacionadas con el movimiento de aire en el suelo (CA y CCR) y Θ grav. y bajo para CC y CAD y (Tabla 3.10b).

Tabla 3.10 a) Efectos fijos y aleatorios del modelo mixto, AIC y b) componentes de varianza para las variables de almacenamiento de agua. CC: capacidad de campo, CAD: capacidad de agua disponible, CA: capacidad de aire, CCR: capacidad de campo relativa y Θ grav.: humedad gravimétrica.

a)

	Efectos fijos [†]						Efectos aleatorios		Completo vs Reducido ^a
	Valor P						DE [‡]	AIC	
	<i>Suelo</i>	<i>Trat.</i>	<i>Prof.</i>	<i>Suelo*Trat</i>	<i>Trat.*Prof</i>	<i>Suelo*Trat*Prof.</i>			
CC	<0,0001	0,0002	0,1	0,04	0,007	0,7	0,00017	-82,6	0,001
CAD	<0,0001	0,02	0,01	0,003	0,6	0,3	0,00021	-140,1	0,007
CA	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0042	0,007	0,3	0,29	-100,9	0,001
CCR	<0,0001	0,0002	0,002	0,13	0,005	0,6	0,18	-42,2	0,001
Θ grav.	<0,0001	<0,0001	0,0011	<0,0001	<0,0001	0,0001	0,00009	1104	0,0001

[†] Efectos fijos y aleatorios para el modelo completo

[‡] Desvíos estándares relativos al residual

^aDiferencia (Probabilidad) entre modelo reducido y modelo completo con el factor *suelo* como efecto fijo.

b)

	Componentes de Varianza		
	(%)		
	<i>Trat.</i>	<i>Suelo</i>	<i>Residual</i>
CC	12,1	87,9	0,0
CAD	12,6	87,4	0,0
CA	85,4	14,5	0,1
CCR	51,1	48,8	0,2
Θ grav.	78,4	21,6	0,0

Considerando el modelo completo (Tabla 3.10a), para todas las variables con excepción de la CCR se encontraron efectos significativos para la interacción tratamiento*suelo, mientras que también se encontraron efectos de la interacción tratamiento*profundidad, con excepción de la CAD. Por último, sólo se registró efecto de la triple interacción (suelo*tratamiento*profundidad) para la Θ grav.

Para la CC, si bien no hay una tendencia clara entre suelos y tratamientos puede observarse que los mayores valores le correspondieron al Hapludert y los menores al Haplustol (Figura 3.15a). En general el tratamiento que presentó los mayores valores

promedios de CC fue BP, excepto para el Argiudol (Monte Buey). La CC en general presentó una tendencia BP>AN>MP, en donde BP presentó diferencias significativas con MP en el Haplustol y Hapludert. Por otro lado, el AN presentó valores muy similares entre los suelos estudiados.

En relación a la profundidad (Figura 3.15b), la CC, presentó un comportamiento muy similar para los estratos más superficiales, encontrándose mayores valores en BP, los cuales se diferenciaron significativamente de AN y MP, sin presentar diferencias entre ellos. Ya en el estrato 10-20 cm, el AN presentó valores más elevados respecto a BP y MP, diferenciándose significativamente únicamente con MP.

Para la CAD, se observó que los tratamientos de manejos del Haplustol presentaron los valores más altos, mientras que los tratamientos del Argiudol (Monte Buey) presentaron los valores más bajos (Figura 3.15c). La CAD del Haplustol se diferenció significativamente de todos los tratamientos del resto de los suelos, con excepción del BP del Hapludert. A su vez este tratamiento se diferenció significativamente de AN y BP, mientras que también AN del Argiudol (Monte Buey) se diferenció de BP y MP. En el suelo Haplustol y Argiudol (Pergamino), no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos. Como se observa en la Figura 3.15c, solamente BP del Argiudol (Monte Buey) se encontró cercano al límite inferior propuesto para la CAD, encontrándose para el suelo Haplustol valores muy superiores al umbral óptimo.

Considerando las profundidades (Figura 3.15d) no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos.

En cuanto a la CA, en todos los suelos con excepción del Argiudol (Pergamino), el tratamiento BP presentó valores superiores a MP presentando diferencias significativas en el Argiudol (Monte Buey) y en el Hapludert (Figura 3.15e). En el suelo Argiudol (Pergamino), la CA de MP fue más elevada con respecto a BP aunque sin diferencias significativas. El AN por su parte, presentó valores significativamente más altos con respecto a los tratamientos agrícolas de los suelos Molisoles. En el Hapludert, el AN presentó valores intermedios (Figura 3.15e). Por otra parte, existe una clara tendencia de disminución de la CA, en sentido oeste-este, encontrándose diferencias más notorias entre el AN del Haplustol y el resto de los suelos, y entre el Argiudol (Monte Buey) y el Hapludert (Figura 3.15e).

Respecto a la interacción tratamiento*profundidad, los dos estratos superficiales siguieron un ordenamiento AN>BP>MP con diferencias significativas entre el AN y los tratamientos agrícolas (Figura 3.15f). En el estrato 10-20 cm, BP presentó el mayor valor observándose diferencias significativas únicamente con MP.

Considerando las profundidades, la CA presentó valores altos muy por encima del umbral superior recomendado ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), sin embargo para 10-20 cm el valor de CA fue apenas menor a dicho umbral (Figura 3.15f). Por su parte, BP presentó valores superiores a este umbral en 0-5 cm y 10-20 cm, pero no así en 5-10 cm, mientras que MP presentó un valor de CA apenas por encima de este umbral en el estrato superficial e inferior al mismo en los estratos más profundos. Por otro lado, y con excepción de BP del Argiudol (Pergamino), todos los otros tratamientos AN y BP presentaron valores por encima del nivel crítico propuesto por varios autores (Cockroft and Olsson, 1997; Mueller et al., 2008) ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), mientras que los tratamientos de MP, se encontraron dentro de los límites mínimo para la aireación del suelo ($0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) y el límite mencionado con anterioridad. El único tratamiento que presentó valores menores –pero muy próximos– al límite mínimo de CA fue el BP del Argiudol (Pergamino) (Figura 3.15e)

Por último, para el CCR, si bien la interacción tratamiento*suelo no fue significativa, el tipo de suelo tuvo una gran influencia en esta variable (Tabla IV.10a). Así el Argiudol (Pergamino) presentó los mayores valores de CCR (0,77), diferenciándose significativamente del Argiudol (Monte Buey) (0,71) y el Haplustol, siendo este suelo el que presentó los valores más bajos (0,67). El Hapludert por su parte, se diferenció únicamente del Haplustol, presentando un valor de 0,75.

De forma descriptiva se puede mencionar que el tratamiento de MP de los Argiudoles y el Hapludert y BP del Argiudol (Pergamino) y el Hapludert se encontraron fuera del rango óptimo propuesto para esta variable, indicando fuerte problemas de aireación del suelo. Por su parte el Haplustol, se encontró dentro de los rangos óptimos (0,6-0,7) presentando un balance entre la aireación del suelo y la retención de agua (Figura 3.15g).

Considerando las profundidades, se observó que para 0-5 y 5-10 cm, el AN presentó los valores más bajos de CCR diferenciándose significativamente de los tratamientos agrícolas, pero no entre los mismos (Figura 3.15h). En el estrato más profundo (10-20 cm) no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. En cuanto a los umbrales, únicamente los dos estratos más superficiales de los AN estuvieron dentro del rango óptimos de CCR (Figura 3.15g).

Para la Θ grav, como se mencionó con anterioridad (Tabla 3.10a), existió una triple interacción (suelo*tratamiento*profundidad). En el Haplustol, no se detectaron diferencias significativas ni entre tratamientos ni entre las profundidades, si bien BP presentó valores levemente mayores a AN y a MP. Por otro lado, el comportamiento de la Θ grav. fue muy semejante en los Argiudoles (Figuras 3.15 b y c). En el estrato superficial se encontró un ordenamiento AN>BP>MP con diferencias significativas entre todos los tratamientos, mientras que en el estrato 5-10 cm, el AN se diferenció de BP y MP para el Argiudol (Pergamino) y solamente de MP para el Argiudol (Monte Buey). En este último suelo, no se encontraron diferencias entre las profundidades para cada tratamiento, mientras que en el Argiudol (Pergamino) el estrato superficial presentó una mayor humedad con respecto a 5-10 y 10-20 cm. Por su parte, el Hapludert presentó el mismo comportamiento en superficie que los Argiudoles (AN>BP>MP), mientras que en el estrato 5-10 cm AN y BP se diferenciaron de MP, el cual presentó valores menores (Figura 3.15d). En el estrato más profundo no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. En cuanto a las profundidades, sólo AN presentó una menor Θ grav. de 0-5 cm a 5-10 cm, mientras que de 5-10 a 10-20 cm solamente el tratamiento MP disminuyó su valor (Figura 3.16d).

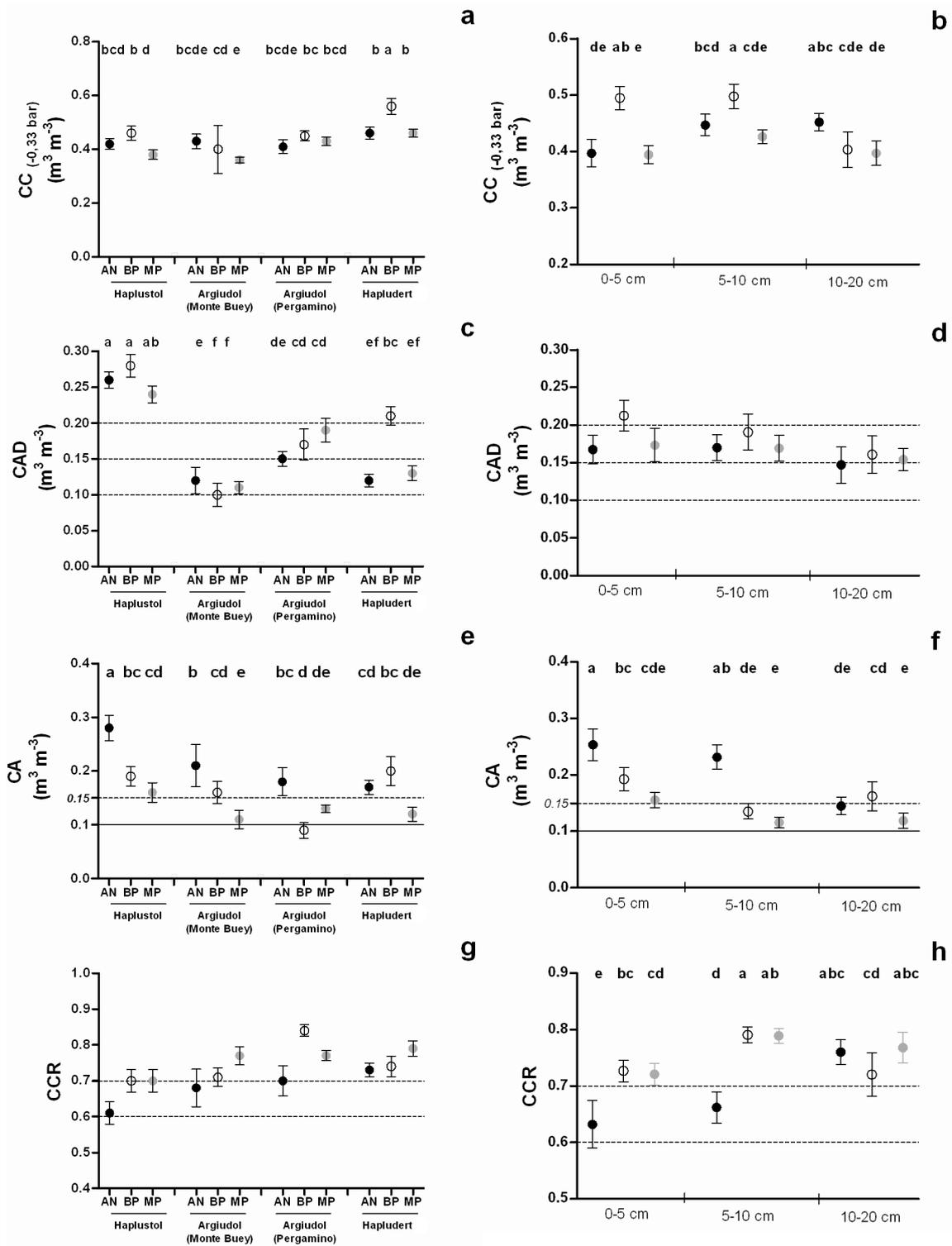


Figura 3.15 a y b) Capacidad de campo (CC), c y d) Capacidad de agua disponible (CAD), e y f) Capacidad de aire (CA) y g y h) Capacidad de campo relativa (CCR) para la interacción suelo (Haplustol, Argiudol -Monte Buey, Argiudol -Pergamino y Hapludert) y tratamiento el Ambiente natural (AN - círculo negro), Buenas prácticas (BP - círculo blanco) y Malas prácticas (MP - círculo gris) (a, c, e y g) y la interacción suelo*profundidad (0-5 cm, 5-10 y 10-20 cm) (b, d, f y h). Letras diferentes corresponden a diferencias significativas para la interacción (LSD, p<0,05).

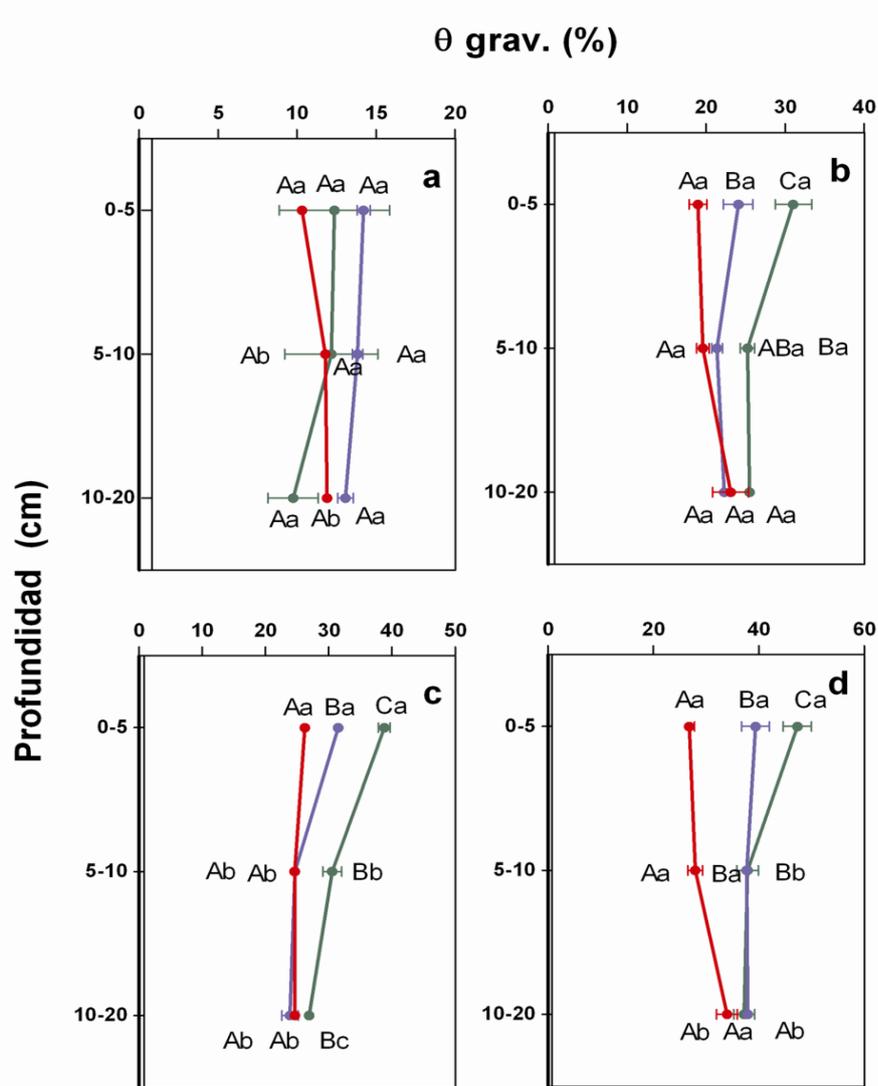


Figura 3.16 Humedad gravimétrica (%) para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm para a) Haplustol, b) Argiudol (Monte Buey), c) Argiudol (Pergamino) y d) Hapludert para Ambiente natural (verde), Buenas prácticas (azul) y Malas prácticas (rojo). Letras en mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, LSD) entre tratamientos para cada profundidad, mientras que letras minúsculas indican diferencias significativas entre profundidades para cada tratamiento.

3.3.4 Efecto de las variables de manejo sobre las variables de almacenaje de agua

En este trabajo, el efecto de las variables de manejo sobre las variables de almacenamiento de agua se encontró principalmente en el estrato 0-5 cm y 5-10 cm (Tabla 3.11). Para la profundidad 0-5 cm, el CP1_manejo se correlacionó con la CC y con la CA. La CC también se correlacionó negativamente con las variables que indican una mayor presencia de soja en la rotación (Soja/Cultivos, Soja/Maíz y Soja único cultivo) y de forma positiva con Maíz/Cultivos, si bien cuando se removió el Hapludert del análisis las correlaciones perdieron significancia. La CA se correlacionó positivamente con el ISI y con Años SD, mientras que lo hizo de forma negativa con la Soja/Cultivos, solamente cuando se consideraron en el análisis todos los suelos. Por último, en esta profundidad, la CCR presentó un comportamiento análogo a la CA con respecto al ISI.

Para el estrato 5-10 cm, la CA y CCR también presentaron correlaciones positivas con el ISI con coeficientes de correlación superiores al estrato 0-5 cm. Por otra parte, la CA también se correlacionó con el ISI_{agr}. En el estrato 10-20 cm, se presentaron pocas correlaciones significativas (CC y CCR con años bajo SD). Cuando se consideró toda la profundidad evaluada (0-20 cm) se destaca las correlaciones de la CA y CCR con el ISI y ISI_{agr}. No obstante como se observa en las Figuras 3.17a y 3.17b, la correlación es positiva y significativa únicamente para los Molisoles, mientras que el ISI no afectó de forma significativa a la CA para el Hapludert (Figura 3.17a). Cuando se consideró la correlación únicamente con los tratamientos agrícolas (ISI_{agr}) se logró modelizar esta relación para todos los suelos en su conjunto (Figura 3.17b). Por último, la Θ grav, presentó en todos los estratos una correlación negativa con la relación Soja/Maíz y positiva con Maíz/Cultivos cuando se analizó todo el set de datos.

Tabla 3.11 Correlaciones (Pearson) entre las variables de almacenamiento de agua e indicadores hidrofísicos y variables de manejo. Se presentan las correlaciones para todos los suelos (TS) y todos los suelos sin el Hapludert (SH). *p <0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

	CPI_ Manejo	ISI		ISI _{agr}		Años bajo SD		Soja/Cultivos		Soja/Maíz		Maíz/Cultivos		Soja único cult.	
		TS	SH	TS	SH	TS	SH	TS	SH	TS	SH	TS	SH	TS	SH
0-5 cm															
CC	-0,47*									-0,45*	-0,55*		0,51*		-0,41*
CAD															
CA	-0,41*	0,51**	0,65***			0,45*	0,53*	-0,40*							
CCR		-0,50***	-0,60***												
Θ grav.										-0,52*		0,45*			
5-10 cm															
CC															
CAD															
CA		0,73***	0,74***	0,50*	0,51*										
CCR		-0,70***	-0,70***												
Θ grav.										-0,46*		0,40*			
10-20 cm															
CC															
CAD															
CA															
CCR								-0,43*							
Θ grav.										-0,44*		0,43*			
0-20 cm															
CC															
CAD															
CA		0,58***	0,52***	0,50*	0,50*		0,30*		-0,28*						-0,29*
CCR			-0,42***	-0,39	-0,36		-0,32*								
Θ grav.										-0,51*		0,42*			

Capacidad de campo -CC-, Capacidad de agua disponible -CAD-, Capacidad de aire -CA-, Capacidad de campo relativa -CCR-, Humedad gravimétrica -Θ grav.-, Índice de intensificación de cultivo -ISI-, Índice de intensificación de cultivo para los manejos agrícolas -ISI_{agr}-, Años bajo siembra directa -años bajo SD-, Relación de años con soja sobre la cantidad total de cultivos -Soja/Cultivos-, Relación de años con soja sobre maíz -Soja/Maíz-, Relación de años con maíz sobre la cantidad total de cultivos -Maíz/Cultivos- y soja como único cultivo -Soja único.

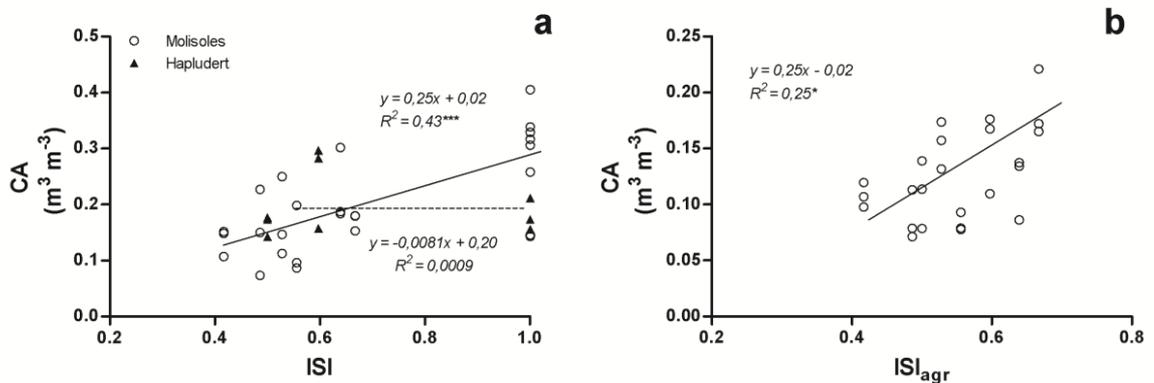


Figura 3.17 Regresiones lineales para 5-10 cm entre a) CA e ISI y b) CA e ISI_{agr}. CA: Capacidad de aire, ISI: Índice de intensificación de cultivos y ISI_{agr}: Índice de intensificación de cultivos para los tratamientos agrícolas. *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. Línea de tendencia punteada corresponde a Hapludert.

3.3.5 Efecto de distintas propiedades del suelo, fracciones de carbono orgánico en las variables de almacenamiento de agua

Como se puede observar en la Tabla 3.12, la CC, CAD y θ grav. presentaron correlaciones significativas con el CP1_suelo. Por consiguiente, como se ve reflejado en la misma tabla, dichas variables se correlacionaron con numerosas propiedades físico-químicas del suelo. Por otra parte, todas las variables, con excepción de la θ grav., se correlacionaron con el CP2_suelo. Esto indica que si bien están afectadas por las propiedades edáficas intrínsecas del suelo tienen un comportamiento menos afectado por los factores composicionales. No obstante, existió una correlación negativa y significativa del limo y la CA y positiva con la CCR.

En cuanto a las fracciones carbonadas se encontraron correlaciones altas de la CC y CAD con el COT, COM y CH_t aumentado sensiblemente dicho coeficiente al remover el Hapludert. También, la CA presentó correlaciones altas con las fracciones más lábiles de carbono orgánico (COP_g , COP_f y CH_s) cuando se removió el suelo Hapludert. Al analizar en detalle el comportamiento de la CA y la COP_g (Figura 3.18a), puede observarse una tendencia positiva y significativa para los Molisoles, mientras que el COP_g en el Hapludert no afectó la CA. Por otro lado, la relación CA y CH_s , pudo ser modelizarla considerando todos los suelos (Figura 3.18b). La humedad edáfica también presentó valores de correlación elevados y positivos para COT y COM, mientras que cuando se analizaron dichas correlaciones sin el Hapludert, también se encontraron correlaciones positivas con las fracciones más lábiles (CH_t y CH_s)

Tabla 3.12 Correlaciones (Pearson) entre las variables de almacenamiento de agua y las propiedades del suelo y fracciones de carbono orgánico. Se presentan las correlaciones para todos los suelos y para todos los suelos sin el suelo Hapludert -sin Hapludert-. *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

	CC		CAD		CA		CCR		Θ grav.	
	Todos los suelos	Sin Hapludert								
Propiedades del suelo										
Arcilla	-0,40*	-0,74***	0,67***	0,60***					0,82***	0,80***
Limo	-0,80***	-0,82***	0,39*	0,53**	-0,51**	-0,54**	0,49**	0,50**	0,61***	0,80***
Arena	0,72***	0,84***	-0,62***	-0,57**	0,37*	0,51*	-0,47**	-0,48*	-0,85***	-0,84***
CIC	0,41**	0,61***		-0,54*					0,79***	0,55**
pH									0,22	-0,19
Ca ⁺²		-0,75***	0,59***						0,63***	0,36
Na ⁺		0,79***							0,35*	-0,25
PSI	0,78***	0,88***	-0,42*	-0,44*	0,33*	0,38*			-0,48**	-0,51**
SB	0,50**	0,62***	-0,38*	-0,73***					-0,50**	-0,70***
HE			0,62***	0,41*					0,69***	0,31
Lp	-0,53**	-0,71***	0,72***	0,65***					0,79***	0,71***
Ll	-0,37*	-0,67***	0,72***	0,71***					0,85***	0,80***
Ip		-0,40*	0,63***	0,57***					0,78***	0,67***
AA			0,35*			0,41*		-0,38*	0,40*	-0,05
E+I/E		0,48*	0,46*			0,51*		-0,50*	0,61***	-0,62***
CPI_suelo	-0,48**		-0,48**						0,86***	0,78***
CP2_suelo	-0,71***		-0,70***		-0,58***		0,45*		0,15	0,66
Fraciones de carbono orgánico										
COT	-0,37*	-0,66***	-0,37*	-0,66***					0,83***	0,74***
COP _g						0,67***			0,42*	-0,10
COP _f						0,47*			0,29	-0,23
COM	-0,46**	-0,71***	-0,47**	-0,71***					0,89***	0,86***
CH _t	-0,34*	-0,75***	-0,33*	-0,75***					-0,07	0,70***
CH _s					0,35*	0,42*			0,22	0,51**

Capacidad de campo -CC-, Capacidad de agua disponible -CAD-, Capacidad de aire -CA-, Capacidad de campo relativa -CCR-, Humedad gravimétrica -Θ grav. (CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, Lp: límite plástico, Ll: límite líquido, Ip: índice plástico, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificadas illita-esmectita, carbono orgánico total -COT-, Carbono orgánico particulado grueso -COP_g-, carbono orgánico particulado fino -COP_f-, carbono orgánico mineralizable -COM-, hidratos de carbono total -CH_t- y hidratos de carbono soluble -CH_s-.

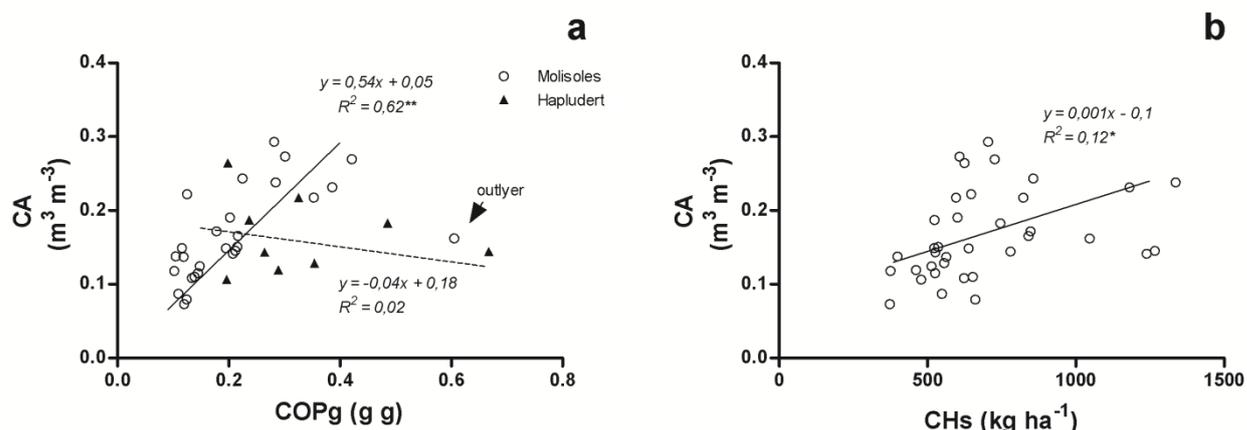


Figura 3.18 Regresiones lineales entre a) CA y COP_g, b) CA y CH_s. CA: Capacidad de aire, COP_g: carbono orgánico particulado grueso, CH_s: Hidratos de carbono soluble. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Línea de tendencia punteada corresponde a Hapludert.

3.3.6. Discusión sobre las variables de almacenamiento de agua

Como se vio a lo largo de esta sección, todas las variables respondieron al modelo que tuvo en cuenta al tipo de suelo. No obstante, tanto la CA como la CCR fueron las variables más importantes en cuanto a la evaluación de los tratamientos. Entre ellas, la CA presentó uno de los AIC más negativos y un componente de varianza más orientado al tratamiento, siendo la misma más efectiva para discriminar los tratamientos. Además esta variable presentó una correlación significativa con el CP1_manejo la cual expresa de forma global la diferencia entre los tratamientos (Tabla 3.11), también esta variable se correlacionó con el ISI_{agr} indicando su utilidad para diferenciar los manejos entre los sitios cultivados. En este sentido, la alta correlación de la CA con las fracciones orgánicas más lábiles (COP_g y CH_s), afirman el rol de la CA como una variable de alta sensibilidad a los cambios de manejo.

A partir del análisis de ambas variables se logró detectar inconvenientes en la aireación (CA) y en el balance de aire/retención de agua (CCR) a partir de 5-10 cm principalmente para los tratamientos cultivados. Además se pudo detectar que el Argiudol (Pergamino) fue el suelo que presentó más inconvenientes en este sentido. De acuerdo a la correlación negativa encontrada entre CA y el contenido de limos era de esperar que fuera dicho suelo el más afectado. Diversos trabajos en la región pampeana, han manifestado la existencia de problemas de aireación y degradación del suelo con la presencia de limo (Taboada et al., 2008; Alvarez et al., 2009).

En contraposición, CC y CAD presentaron un perfil más orientado al suelo, ya que su componente de varianza fue muy alto (Tabla 3.10b). Sin embargo tanto la CC como la CAD, lograron detectar diferencias entre los manejos cultivados. No obstante, la alta correlación entre estas variables y el contenido de arcilla (principalmente para CAD), disminuye la efectividad de dichas variables. Por otra parte, como se presentó con anterioridad, los valores de CC y CAD fueron altos, no encontrándose limitantes en cuanto al almacenaje de agua en el suelo para ninguna de las situaciones evaluadas.

Por último, si bien la humedad edáfica depende de las precipitaciones ocurridas antes del muestreo, con excepción de los tratamientos del Haplustol, los cuales recibieron lluvias bajas previo al muestreo, se encontró una clara tendencia de mayores humedades en BP con respecto a MP, lo que sería debido a una mayor cobertura de

rastrajo. Dicha hipótesis se sustenta en que fueron las variables relacionadas a la cantidad de maíz en la rotación (Soja/Maíz y Maíz/Cultivos, Tabla 3.11) las que presentaron correlaciones significativas con la humedad edáfica. Una mayor presencia del maíz aumentó la humedad edáfica en todos los estratos evaluados.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se analizaron numerosas variables físicas para poder explicar el efecto de la intensificación agrícola en suelos de textura y mineralogía contrastantes. Como se detalló con anterioridad, el comportamiento de las variables dependió tanto del tratamiento de manejo y como del tipo de suelo. De forma general se pudo observar que suelos limosos presentaron serios inconvenientes físicos, mientras que el comportamiento de algunas variables en el Hapludert fue independiente del manejo agrícola propuesto. También se puede destacar que si bien algunas variables como CC y CAD, presentaron valores mayores en BP con respecto a MP, esto se debió, por ejemplo, a una mayor cantidad de arcillas en BP. Así, se puede concluir que para la mayoría de las variables existió un efecto fuerte del tipo de suelo, sólo lográndose modelizar de forma independiente al suelo la DAP, $P_{Mac>300}$ y D_{Moda} . Por ello, se corrobora la *hipótesis 3.III* ya que la sensibilidad de los indicadores de calidad hidrofísica fue dependiente del tipo del suelo, principalmente debido a sus características texturales y mineralógicas.

Con respecto a la intensificación agrícola, se observó que para la mayoría de las variables de compactación (DAP, RP, PT y P_{estr}) el aumento de la misma, en donde el tránsito de maquinaria es mayor, produjo efectos negativos sobre el estado del suelo. De la misma forma, Steinbach y Álvarez (2006) al realizar una recopilación de ensayos desarrollados en el área pampeana, observaron que la producción bajo SD manifiesta un incremento en la densidad aparente. No obstante, las variables relacionadas a la distribución de tamaño de poros presentaron una relación con la intensificación agrícola positiva. Es decir, el mayor tiempo de permanencia de raíces y una secuencia de cultivos más diversificada (e.g. más trigo y maíz), fueron más beneficiosos para dichas variables a pesar del efecto negativo de un mayor tránsito de maquinaria.

Esta divergencia señala la importancia de la utilización de más de una variable para medir un proceso físico y la necesidad de tener en cuenta la precisión diferencial de las distintas variables utilizadas. Además debe señalarse que las escalas de análisis derivadas del diferente tamaño de las muestras utilizadas para ambos grupos de variables (sección A vs sección B y C) son levemente diferentes, abarcando las variables de compactación grietas y fisuras de mayor tamaño. Además, es posible que variables como la $P_{Mac>300}$, la D_{moda} y el DE, capten de forma más detallada el efecto de actividad biológica del suelo, generando por ejemplo un mayor bioporosidad. En este sentido, como destaca Rubio et al. (2012), sistemas con una buena rotación de cultivos producen aumentos en el carbono orgánico, aumento de la bioporosidad y regeneración de la biota del suelo, factores que afectan y modifican diferentes compartimentos de la porosidad edáfica.

Además, esta tensión entre los efectos benéficos y perjudiciales de la intensificación agrícola puede ser discutida según el estrato analizado. En este capítulo se pudo encontrar que los efectos positivos de la intensificación agrícola se produjeron principalmente en 0-5 cm, reflejado en las variables $P_{Mac>300}$, la D_{moda} , la CA y la CCR. En contraposición la mayoría de las variables físicas medidas empeoran a partir de 5-10 cm. En esta profundidad el efecto de la DAP, RP, PT, CA y CCR se vuelve críticos

evidenciando un importante efecto del tránsito de maquinaria, especialmente en los suelos limosos.

Por consiguiente, la *hipótesis 3.I* se rechaza ya que el mayor tránsito del suelo asociado a una rotación de cultivos intensificada no afectó de forma negativa a todas las variables hidrofísicas y su efecto no fue el mismo en todos los tipos de suelos. El balance entre los efectos benéficos y perjudiciales de la intensificación agrícola en cultivos en SD dependió tanto de la variable analizada como de la profundidad del suelo considerado, así como por el hecho que ese balance está supeditado a las características composicionales de los suelos.

En este sentido, debe señalarse que el Argiudol (Pergamino), que es el suelo con mayor cantidad de limo, con los valores más altos de limos de baja densidad (biolitos, vidrios volcánicos, etc.) y valores no muy altos de CO, presentó condiciones físicas negativas en prácticamente todas las variables físicas, siendo las variables relacionadas con la aireación del suelo las más comprometidas (eg. CA). En este caso, la influencia de la intensificación agrícola presentó efectos negativos, no logrando el mayor contenido de rastrojo, un mayor tiempo de duración de raíces vivas y una rotación más diversificada mejorar las características físicas. Por consiguiente, en este tipo de suelos parecería necesario implementar prácticas adicionales (biológicas y/o mecánicas) para superar ciertas restricciones físicas derivadas del cultivo en SD.

No obstante, en el otro suelo limoso (Argiudol -Monte Buey-), si bien sus características composiciones eran un poco más favorables a la formación y regeneración de la estructura (eg. pendientes más altas de la curva de contracción, mayor CIC, etc.), el efecto del tránsito intensificado, no fue tan marcado. Además, la mayor intensidad de cultivos, incluyendo un gran porcentaje de cultivos de cobertura (40%) en comparación con 0% del Argiudol (Pergamino), pudo haber revertido parcialmente el deterioro físico producido por una mayor presión de tránsito. De esta forma se acepta parcialmente la *hipótesis 3.II*, ya que si bien los efectos negativos de la intensificación agrícola fueron más perjudiciales en el Argiudol (Pergamino), en el otro suelo limoso, no lo fue tanto. Es decir pequeños cambios en la composición y en el manejo de estos suelos limosos pueden conducir a un estado físico diferente, aún en suelos limosos con una rigidez aparente baja.

Capítulo 4

**CALIDAD ESTRUCTURAL EN DIFERENTES ESCALAS
ESPACIALES DE SUELOS DE TEXTURA Y MINERALOGÍA
CONTRASTANTES BAJO SIEMBRA DIRECTA**

Introducción

En la Región Pampeana se ha difundido la SD con numerosas ventajas ya mencionadas; sin embargo, los suelos pampeanos continúan mostrando en algunos casos, una tendencia a la degradación (Urricariet y Lavado, 1999, Micucci y Taboada, 2006; Alvarez et al. 2014), la cual se traduce en la disminución de la MO y de nutrientes, aumento de la erosión hídrica y eólica y aumentos en la compactación del suelo del suelo (Ferrerías et al., 2007). Asociado a la difusión de manejos bajo SD, se produjo un incremento marcado del área destinada al cultivo de soja (*Glycine max L., Merr.*) (Novelli et al., 2011), El predominio del cultivo de soja representa un riesgo desde el punto de vista de la sustentabilidad, ya que su rastrojo aporta no sólo una menor cantidad de residuos al suelo (Studdert y Echeverría, 2000), sino que también poseen una baja relación C/N que favorece su descomposición. En el caso de que sea el único cultivo en la rotación (soja de primera), existe la posibilidad de que el suelo permanezca con baja cobertura durante gran parte del año (Sanford, 1982; Bathke y Blake, 1984).

Por otro lado, la SD conduce a condiciones del suelo que difieren marcadamente de las existentes bajo labranza convencional (Bonel et al., 2005). Esas nuevas características físicas y biológicas de los suelos cultivados en SD, según la literatura, son coincidentes y otras divergen notoriamente según los casos estudiados. Estas divergencias podrían estar explicadas en términos de un balance de la intensificación agrícola, es decir mayor cantidad de cultivos por año que redundaría en una actividad radical y aporte de rastrojo más importante y sostenida a lo largo del año, y una mayor presión de tránsito de maquinaria por otro. El resultante de estas dos fuerzas contrapuestas bajo SD puede evaluarse mediante la estructura del suelo.

La estructura del suelo tiene influencia en la mayoría de los factores de crecimiento de las plantas, siendo, en determinados casos, un factor limitante en la producción (Montenegro, 1991). Una estructura desfavorable puede acarrear problemas en el desarrollo de las plantas, tales como el exceso o deficiencia de agua, la falta de aire, la incidencia de enfermedades, la baja actividad microbiana, el impedimento para el desarrollo de las raíces, etc; por el contrario, una estructura favorable, permitirá que los factores de crecimiento actúen eficientemente y se obtengan, en consecuencia, mayores rendimientos de las cosechas.

Una forma de aproximarse al estudio de la dinámica de la estructura es a través de tres aspectos principales (Kay, 1990). El primer aspecto es la descripción de la forma estructural del suelo (aspecto geométrico), la cual abarca el arreglo y tamaño del espacio poroso. El segundo aspecto es la estabilidad estructural, la cual expresa la habilidad del suelo para mantener la distribución y tamaño de agregados luego de exponerlos a agentes externos como el impacto de la gota de agua, estallido, abrasión etc., lo que nos indica un aspecto más dinámico de la estructura. Así, el mantenimiento y formación de la estructura, el análisis del factor biológico puede ser de gran utilidad para la comprensión de estos procesos. Por ejemplo, el desarrollo de la hidrofobicidad del suelo ha sido señalada por diversos autores (Vogelman et al., 2013, Debano, 2000) como un factor que regula tanto la formación como la estabilización de los agregados del suelo. El análisis de estos aspectos de forma conjunta permite tener una visión más integral de los procesos de degradación de la estructura y de modo de poder evaluar de forma más precisa el rol del manejo del suelo en diferentes tipos de suelos.

En el análisis del estado de evolución y degradación de la estructura es necesario también identificar y cuantificar las variables particulares de cada ambiente, a fin de documentar los cambios que se suceden en el corto y largo plazo, como consecuencia de las prácticas de manejo que se aplican (Gregorich et al., 1997). En este sentido, generalmente la dinámica de la estructura es analizada en una sola escala espacial y generando contradicciones y malas interpretaciones en los estudios sobre este tema. A través del estudio de la estructura en varias escalas es posible lograr un entendimiento más preciso de los factores físicos, químicos, biológicos y de manejo que intervienen en la estructuración del suelo. Asimismo, este conocimiento permitirá relacionar los distintos manejos bajo SD y la calidad estructural del suelo para el desarrollo de prácticas agronómicas sostenibles.

Por todo lo mencionado en este capítulo se presentarán los resultados de estudios de la macroestructura hasta la microestructura del suelo (Figura 4.1) contemplando aspectos geométricos o de forma de la estructura y la estabilidad de la misma. Además la evaluación de la estructura en diversas escalas permitirá la evaluación de propiedades emergentes a estas escalas brindando nuevos enfoques al estudio de la SD. Así este capítulo consta de 3 secciones: A) Descripción estructural, B) Descripción micromorfológica y C) Estabilidad Estructural. Además en el Apéndice 1, se analizará el efecto de la hidrofobicidad del suelo sobre la estabilidad estructural. En la Figura 4.1, se puede observar el ordenamiento conceptual de este capítulo.

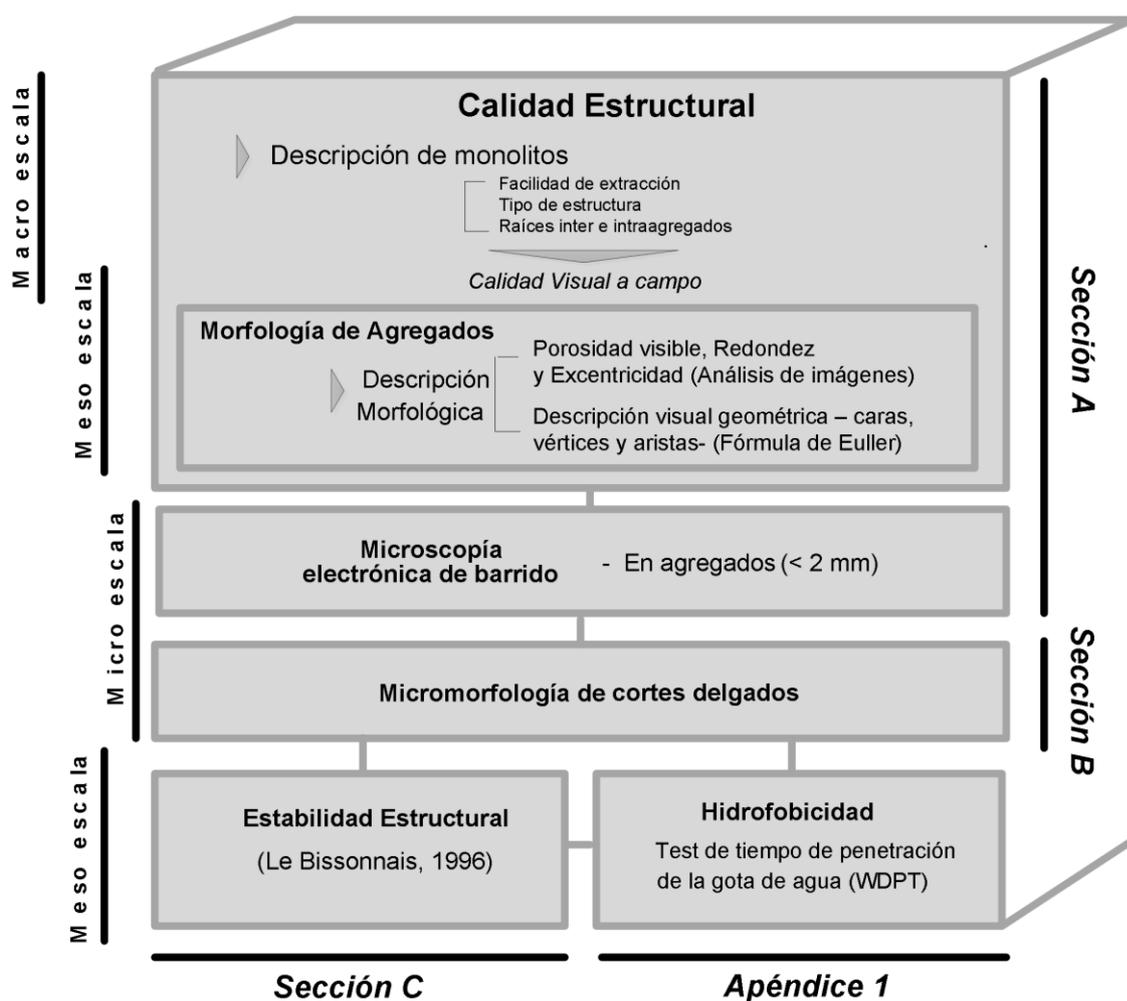


Figura 4.1 Escalas espaciales y metodologías a utilizar para el estudio de la calidad estructural del suelo.

Objetivos Generales

- Evaluar la estructura del suelo en todas sus escalas de percepción para manejos agrícolas de distinta intensidad bajo SD en los diferentes tipos de suelos.
- Estudiar la relación existente entre las variables estructurales y la estabilidad de agregados e hidrofobicidad del suelo. Determinar el grado de asociación entre estas variables y las variables hidrofísicas estudiadas en el capítulo IV.

Hipótesis

4. I - Los efectos de la intensificación agrícola y tipo del cultivo en la rotación se manifiestan de manera similar en todas las escalas de organización estructural.
4. II - Las buenas prácticas agrícolas que conllevan una mayor intensificación de cultivos, mejoran las propiedades estructurales de suelos con diferencias composicionales.
4. III - El nivel de intensificación agrícola aumenta la estabilidad estructural en todos los tipos de suelo analizados.
4. IV - La estabilidad estructural permite una mejor discriminación de las prácticas agrícolas en suelos rígidos en donde el principal mecanismo de agregación son los factores biológicos.

Sección A - Descripción Estructural del Suelo

4.1 Introducción

En los principales países productores de *commodities* del mundo la siembra directa (SD) constituye una alternativa muy importante de manejo, llegando en países como la Argentina a más del 75% del área cultivada (AAPRESID, 2012). Entre los beneficios comprobados del sistema se encuentra, la reducción de los riesgos de erosión del suelo así como un menor costo de la producción agrícola. Además, numerosos trabajos demuestran que la SD promueve la conservación del contenido de carbono orgánico y el aumento de la estabilidad estructural (Derpsch et al., 2010), mejorando de esta manera la capacidad de captación del agua para los cultivos. Sin embargo, cada vez son más frecuentes reportes de inconvenientes relacionados a este manejo como el aumento de la densidad aparente, de la resistencia a la penetración (Nesmith et al., 1987; Mahboubi et al., 1993; Chagas et al., 1994) y de la formación de estructuras laminares (Ball y Robertson, 1994; Sasal et al., 2006; Morrás et al., 2012).

Algunos autores han evaluado los aspectos macroestructurales derivados de la SD mediante la descripción del perfil cultural (e.g. De Battista et al., 1994, 1997) Gerster y Vidal (1997) observando que un tratamiento de maíz en SD sobre pastura presentó un mejor estado estructural que otros sistemas con labranza. Sin embargo Gerster et al. (2003) mencionan que en lotes con SD continua -algunos con 20 años- en el sur de Santa Fe, presentan sectores con una estructura superficial de tipo laminar, que estaría asociada al alto contenido de limo de esos suelos pampeanos. Por su parte Sasal et al. (2006) reportan una estructura laminar en SD visible a simple vista que constituiría la principal restricción al ingreso del agua en el suelo. Igualmente Senigagliaesi y Ferrari (1993), Barbosa et al. (1997), Moraes Sá (2002), Sasal et al. (2004; 2006) y Alvarez et al. (2004; 2014) encontraron que la disposición preferencial de los poros superficiales bajo SD es en sentido horizontal.

En los últimos años, se realizaron avances importantes en lo que respecta a evaluar la calidad estructural a campo en forma visual y manual que tiene la ventaja de ser sencilla y económica (Peerlkamp, 1959; Shepherd, 2000, 2009). A partir del consenso de varias metodologías, Ball et al. (2007) propusieron la “Calificación visual a campo de la estructura” (Cvc). A diferencia de la metodología del perfil cultural, esta técnica evita la construcción de trincheras en el lote y consume mucho menos tiempo. Mediante la aplicación de esta metodología, Liesh et al. (2011) encontraron que la calidad del suelo mejoró en un 57% en situaciones con doble cultivo mientras que Imhoff et al. (2009), obtuvieron buenos resultados en la evaluación de diferentes manejos agrícolas en la región pampeana de Argentina. Sin embargo, todavía existen dudas debido a la subjetividad y aplicabilidad de la Cvc en suelos con diferentes texturas y mineralogías (Askari et al., 2013, Guimarães et al., 2013) y en diversos estados de humedad edáfica (Ball et al., 2007). Si bien la metodología propuesta por Ball et al. (2007) restringe la utilización del Cvc en suelos arcillosos, Guimarães et al. (2013) no encontraron influencia de los suelos de texturas arcillosas y franco arenosas en el Cvc. También, Mueller et al. (2013) mediante métodos visuales, lograron realizar correctas evaluaciones de la calidad del suelo con contenidos de arcillas superiores al 30%. Sin embargo, tanto en el trabajo de Guimarães et al. (2013) como en el de Mueller et al. (2013) no eran suelos con minerales expansibles. Además, la porosidad visible en la Cvc es determinada de una forma subjetiva la cual puede ocasionar una disminución de la efectividad de esta técnica. Así, es necesario continuar con el estudio de Cvc en

diferentes tipos de suelo con mineralogías contrastantes y en diferentes manejos bajo SD.

La evaluación estructural a campo del suelo depende de la correcta evaluación de la morfología de las unidades estructurales (agregados). Los agregados pueden ser descritos visualmente según su tamaño, forma y porosidad, los cuales presentan cambios importantes dependiendo de las rotaciones y el sistema de labranza utilizado produciendo modificaciones en las interrelaciones del suelo, aire y agua (Carter, 2004). Por ejemplo, este concepto fue tomado en el trabajo de Guimarães et al. (2011), en donde se propone el análisis del tamaño y forma de agregado para mejorar la efectividad del Cvc.

Algunos trabajos (Morrás et al., 1999; Olszewski et al., 2004, Alvarez et al., 2008; Cremon et al., 2011) proponen la morfología de agregados como un importante indicador de la estructura y calidad de suelos. En estos trabajos se menciona que la presencia de formas esféricas y la escasa rugosidad de los agregados indican un uso más intensivo del suelo. Morrás et al. (1999) pudieron evidenciar, a través del análisis de la morfología de agregados, cambios en el manejo del suelo, el cual permitió una interpretación más clara sobre los procesos de degradación en Ultisoles bajo distintos manejos de yerbatales. También Bonel et al. (2005) utilizó la morfología de agregados en una Argiudol típico encontrando diferencias entre situaciones de ambiente natural, labranza reducida y SD. De la misma forma, Baver (1956) consideró que las formas con predominancia del eje horizontal sobre el vertical están ligadas a procesos de degradación estructural. Utilizando la fórmula poliédrica de Euler, Hartge et al. (1999) pudieron distinguir agregados, de distintas profundidades, manejados con y sin labranza mediante la descripción de las caras, aristas y vértices de agregados. Esta metodología sencilla puede relacionarse a los procesos de pedoturbación y labranzas ya que las mismas destruyen las aristas y vértices de los agregados. Además, la creación de caras por contracción y fuerzas de corte es considerada como un proceso formador de agregados (Hartge et al., 1999). También las evaluaciones morfológicas pueden realizarse mediante análisis de imágenes, siendo este un método eficiente y preciso para evaluar distintos manejos agrícolas (Olsewski et al., 2004).

La modificación morfológica de la estructura del suelo y su variabilidad temporal, no son de naturaleza aleatoria sino que son el resultado de la interacción de las prácticas agrícolas y los agentes climáticos sobre un tipo de suelo. Es posible distinguir los efectos recientes de los acumulados conociendo los agentes o factores que causaron la variación (Gastroneau y Manichon, 1987). La estructura del suelo es una propiedad compleja del suelo parcialmente relacionada a las características inherentes del suelo como el tamaño de partícula, mineralogía de arcilla, etc.; y también a las influencias antropogénicas relacionados al manejo de la tierra (Ball et al., 2007). No obstante, todavía son muy pocos los trabajos que evalúan los cambios morfológicos de los agregados como indicador de manejo bajo SD para distintos tipos de suelo con texturas y mineralogías diferentes y aún menos de forma cuantitativa. En términos generales, evaluar la calidad estructural del suelo mediante indicadores en distintos tipos de suelos, climas y sistemas de manejo es complicado (Schjønning et al., 2002); sin embargo la combinación de diferentes sets de variables morfológicas y estructurales pueden ser de gran utilidad para la evaluación de la calidad en un rango amplio de tipos de suelos y manejos agrícolas.

El objetivo de esta sección es evaluar el comportamiento de diversos parámetros morfológicos en suelos de distinta intensidad agrícola bajo SD y de textura y

mineralogía contrastantes. Para esto se analizará la utilidad de cada variable de acuerdo a su asociación con los parámetros físicos y químicos del suelo y su capacidad de separar los manejos evaluados. Las variables estructurales y morfológicas serán correlacionadas con variables de manejos para entender su comportamiento ante cambios de las rotaciones agrícolas. También se evaluará comparativamente la morfología de agregados y la calidad de suelos según su textura y mineralogía.

4.2 Materiales y Métodos

4.2.1 Evaluación estructural del suelo

Para caracterizar el efecto del manejo en los rasgos morfo-estructurales del suelo se llevaron a cabo determinaciones a campo y en laboratorio a través de un abordaje múltiple y multiescalar.

4.2.1.1 Calificación visual a campo de la estructura

Como primera aproximación se determinó la *Calificación visual a campo de la estructura (Cvc)*, propuesta por Ball et al. (2007). De cada sitio-tratamiento se obtuvieron de 3 a 4 monolitos de 15x15x25 cm en 3 subsitios de muestreos distanciados no menos de 50 metros, asegurándose que en una de las caras no haya sido empleada la pala. De esta forma se obtuvieron alrededor de 10 réplicas por tratamiento. Esta metodología consistió en evaluar la dificultad de extracción del monolito y luego identificar capas de acuerdo a características estructurales como forma, tamaño y dureza, porosidad visible, presencia de zonas de anaerobiosis y por la distribución de las raíces (intra y inter agregado). Mediante la ayuda de una cartilla fotográfica (Ball et al., 2007) se les asignó un puntaje y se calculó el índice de calidad visual (Icv), correspondiendo el valor 1 a calidades estructurales favorables y el valor 5 a calidades estructurales pobres. Esta asignación de valores tuvo en cuenta el número y tipo de capas encontradas así como su espesor. Dichos monolitos y su desagregación fueron fotografiados para una mejor evaluación posterior en laboratorio.

4.2.1.2 Porosidad visible, excentricidad y redondez

En laboratorio, se obtuvieron agregados de 3 a 5 cm desagregando los monolitos evaluados a campo de forma manual siguiendo los planos de debilidad. Esto fue realizado cuando los monolitos se encontraban con una humedad cercana a capacidad de campo. Se seleccionaron al azar tres agregados por subsitio de muestreo los cuales fueron fotografiados en microscopía en luz incidente (Wild MZ8 Leica photomicroscope). Luego se confeccionó una imagen de alta calidad, combinando 7 a 10 fotografías por agregado mediante el software combineZ (<http://www.hadleyweb.pwp.blueyonder.co.uk/CZP>), lo cual permitió su posterior análisis. La porosidad visible (Pv) se determinó a través de la evaluación del diámetro promedio de los poros mayores a 50 μm mediante el programa *JMicrovision*^r. Para ello se trazó un cuadrado de 1 cm^2 posicionado en el centro del agregado donde se determinó el diámetro de los 50 poros de mayor tamaño. De esta forma se evaluó entre un 60 y 80% de todos los poros dentro de esa sección. Mediante las mismas imágenes se procedió a calcular el perímetro y el área de cada agregado. Así se obtuvo la excentricidad (Ecc) y redondez (Rd). La excentricidad se obtiene como salida en el programa *JMicrovision*^r y se calcula según la ecuación (1). La excentricidad varía desde 0 hasta el infinito y cuanto mayor sea, menor será la similitud de la sección cónica con respecto a un círculo. Una sección cónica con una excentricidad de 0 es un círculo. La

redondez, es un factor de forma que depende de la rugosidad de la superficie externa del agregado. La misma varía entre 0 y 1, donde a mayores valores mayor el grado de redondez (2).

(1) $Exc = (1 - b^2/a^2)^{(1/2)}$ donde, a: longitud del eje semi-mayor, b: longitud del eje semi-menor.

(2) $R = (4\pi A)/p$ donde, A: área del polígono, p: perímetro del polígono.

4.2.1.3 Morfología tridimensional de los agregados

A partir de la rotura de los monolitos por su planos de fragilidad, se seleccionaron 15 agregados entre 3-5 cm por tratamiento para determinar su morfología mediante la metodología propuesta por Hartge et al. (1999). Luego de dejar secar al aire los agregados se procedió a contabilizar visualmente bajo microscopio con luz incidente el número de caras, aristas y vértices de cada uno. Aquellas caras sensiblemente inferiores en tamaño a las restantes no fueron contabilizadas. De la misma forma no se contabilizaron las aristas y vértices no pronunciados. Cada agregado fue contabilizado tres veces en tres momentos distintos para disminuir el error del operador.

4.2.2 Análisis estadísticos

Modelos mixtos fueron construidos para estudiar el efecto de los tratamientos (AN, BP y MP) sobre las variables estructurales del suelo (Icv, Pv, Exc, Rd, Caras, Vértices y Aristas). La Pv fue transformada (\log_{10}) para obtener una distribución normal y fue retransformada para su presentación en resultados. En cuanto al Icv se asignaron números decimales para las diferentes categorías a través del método VESS (Icv 1–5) el cual permitió al Icv ser tratado como una variable continua (Munkholm et al., 2013). Para la Pv, Exc y Rd se creó una identificación para cada agregado (id) para una mejor evaluación de la estructura de datos. Este id fue considerado como una variable aleatoria dentro del modelo mixto. Una estrategia de simplificación de los modelos fue adoptada cuando fue posible para la construcción de modelos más compactos. Se inició con los modelos completos y luego las interacciones fueron removidas. También se utilizó un análisis de componentes de varianza para determinar la proporción de varianza atribuible a los tratamientos y al tipo de suelo para las propiedades del suelo como Proxy, para discriminar los comportamientos dinámicos o inherentes de cada variable estructural. Además se realizaron correlaciones (Pearson) para evaluar la asociación entre las características del suelo (CP1_suelo y CP2_suelo) y otras características seleccionadas, y las variables estructurales. Todos los análisis estadísticos fueron realizados con R excepto las correlaciones de Pearson que fueron hechas mediante el programa Infostat/P v1.1, 2002.

4.3 Resultados

4.3.2 Análisis de la estructura del suelo

4.3.2.1 Descripción estructural y clasificación visual a campo

Haplustol (Bengolea).

Los monolitos del AN presentaron una importante isotropía vertical (hasta los 15 cm) con una estructura granular fina muy débil y grano suelto (Figura 4.2a). Los monolitos tendieron a permanecer intactos al retirarse con la pala principalmente por efectos de las raíces de gramíneas presentes en toda la extensión de los monolitos. No se observaron capas endurecidas en profundidad. Debido a esto, los monolitos mostraron muy poca resistencia a la desagregación. Las raíces se encontraron en posiciones inter e intraagregados. En los agregados de tamaño 1 a 5 cm (Figuras 4.3a y 4.4a) se puede observar la importante cantidad de raíces presentes en los mismos y cómo dichas raíces envuelven los agregados de este suelo. Los monolitos de BP presentaron tres capas que se diferenciaron muy bien en la extracción de los monolitos (Figura 4.2b). De 0 a 5 cm se observó una estructura mixta con presencia de estructura de grano suelto y una débil estructura granular en superficie con abundante presencia de raíces sobre estructuras laminares débiles y no continuas en posiciones inferiores de esta capa. En la estrato 5-10 cm se observó una capa compactada con presencia de bloques subangulares de clase gruesa y de grado moderado con baja presencia de raíces, las cuales se desarrollan entre agregados. Para la profundidad 10-15 cm se encontró una disminución del tamaño de los agregados formando pequeños bloques subangulares de poco desarrollo y muy débiles. La distribución y abundancia de las raíces fueron similares a la capa anterior. Si bien se pudo distinguir la porosidad visible en los agregados de estas tres capas, fue menor a la del AN (Figuras 4.3b y 4b). La extracción de los monolitos de MP presentó menor resistencia, con un plano de debilidad muy neto entre los 3 y 5 cm (Figura 4.2c). La capa superficial presentó un bajo desarrollo estructural con pocos agregados estables los que rompían muy fácilmente. A partir de este límite se encontraron agregados de diversos grados de desarrollo y clase. También se encontraron estructuras laminares, si bien estas eran más débiles y discontinuas en comparación a BP. Las raíces se distribuyeron uniformemente en todo el monolito, sin embargo, la mayoría consistía en raíces de baja expresión (muy finas). Los agregados de este tratamiento presentaron baja porosidad visible (Figuras 4.3c y 4.4c). Mediante esta descripción visual, no se encontraron diferencias notables entre los subsitios de ningún tratamiento.

Argiudol (Monte Buey)

El AN presentó monolitos con una estructura granular en superficie (0-5 cm) para luego dar lugar a una estructura de bloques subangulares medios con desarrollo moderado (Figura 4.2d). La abundancia de las raíces estuvo restringida a los primeros 5 cm y luego disminuyó abruptamente. Los monolitos de BP presentaron también una anisotropía vertical muy importante (Figura 4.2e). La extracción de los monolitos no revistió dificultad. Los primeros 5 centímetros presentaron una estructura granular continua bien desarrollada con importante presencia de agregados biogénicos y abundantes raíces en toda esta capa. Vaquero (2011) encontró también agregados biogénicos en este mismo sitio. A partir de los 5 cm se observó una capa compactada con una importante disminución de raíces. Se advirtieron estructuras laminares débiles yuxtapuestas por bloques subangulares medios con desarrollo moderado (Figura 4.2e). No obstante se pudo observar una porosidad importante en los agregados. A partir de

los 10 cm desaparecen estas estructuras laminares incipientes para dar lugar a bloques subangulares de mayor clase. En general (0-15 cm) la porosidad visible fue alta mientras que la presencia de raíces no fue tan alta como se esperaba (Figuras 4.3e y 4.4e). Los monolitos de MP presentaron una capa superficial muy delgada (~1 cm) con grano suelto con un value muy alto y presencia moderada de raíces (Figura 4.2f). A partir de esta capa se observaron terrones de clase gruesa que rompieron en forma horizontal creando estructuras laminares de gran espesor. Si bien estos terrones son conspicuos en toda la capa (2-15 cm) aparecían con mayor frecuencia a 5 cm de profundidad (Figura 4.3f). En todo el monolito la presencia de raíces fue baja y la misma estuvo restringida a posiciones interagregados (Figura 4.3f y 4f). La porosidad visible de los agregados fue muy baja (Figura 4.3f y 4f). En este suelo, así como en el Haplustol, no se observaron diferencias estructurales visuales entre los bloques de los tratamientos.

Argiudol (Pergamino)

Los monolitos del tratamiento AN permanecieron intactos en la pala observándose una importante cohesión de los mismos (Figura 4.2g). Se encontró una mezcla de estructura granular y de bloques subangulares finos de desarrollo moderado aumentando su proporción en profundidad (Figura 4.2g). El subsitio 2 de este tratamiento presentó estructuras más cohesivas y de mayor tamaño en posiciones superficiales. De la misma forma, el tamaño y frecuencia de raíces disminuyó en profundidad, encontrándose en posiciones intra e interagregados. Los agregados de este tratamiento presentaron una importante porosidad. El tratamiento BP presentó dos capas diferenciadas. De 0-4/5 cm: mezcla de estructura granular en superficie y bloques subangulares finos de desarrollo moderado. En el límite inferior de esta capa se pudo observar una importante frecuencia de estructuras laminares de diferente clase y grado. La presencia de este tipo de estructura fue mayor en el subsitio 1 el cual se encuentra en en la cabecera del lote, sometido a un mayor tránsito de maquinarias. En profundidad aparecieron terrones de mayor desarrollo y tamaño, y se hizo menos frecuente la estructura laminar. En toda la extensión del monolito, la abundancia de raíces fue de intermedia a escasa (Figura 4.3h y 4.4h). Los monolitos del tratamiento de MP presentaron poca dificultad de extracción con una estructura granular muy fina y débil. A partir de los 4 o 5 cm se encontró a una estructura compacta que rompía a bloques subangulares finos y débiles (Figura 4.2h). La presencia de estructuras laminares fue baja con escaso desarrollo y discontinua. La abundancia de raíces fue similar a BP. La porosidad visible de los agregados fue muy baja. (Figura 4.3i)

Hapludert (Viale)

En todos los tratamientos se observó una estructura grumosólica con escasa diferenciación en profundidad (Figura 4.2jkl). Sin embargo los primeros centímetros (0-5 cm) de AN y BP presentaron agregados de menor tamaño en relación a MP. Por otro lado, pudo observarse en AN la aparición de bloques de mayor tamaño de 10-15 cm y algunos rasgos de hidromorfismo en esa profundidad. Por otra parte, los bloques de este tratamiento presentaron pocas diferencias entre si, exceptuando un subsitio de AN, resultó similar a BP. La cantidad de raíces disminuyó desde el AN a MP, sin distinción evidente entre BP y MP. En general la porosidad visible fue mayor en AN y BP (Figuras 4.3jkl y 4.4jkl).



Figura 4.2 Fotografías de los monolitos evaluados para la combinación suelo-tratamiento (Ambiente natural -AN-; Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP-). Correspondiendo a,b,c con AN, BP y MP del Haplustol; d,e,f con AN, BP y MP del Argiudol (Monte Buey); g,h,i con AN, BP y MP del Argiudol (Pergamino) y j,k,l con AN, BP y MP del Hapludert.

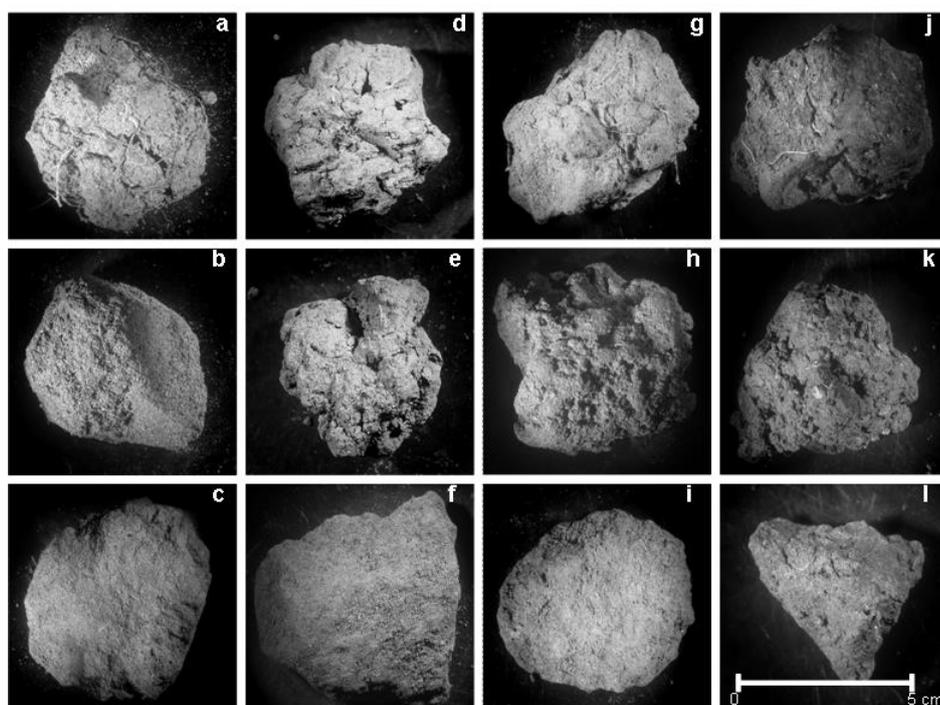


Figura 4.3 Fotografías de agregados de 1-5 cm (Wild MZ8 Leica photomicroscope) para la combinación suelo-tratamiento (Ambiente natural -AN-; Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP). Correspondiendo a,b,c con AN, BP y MP del Haplustol; d,e,f con AN, BP y MP del Argiudol (Monte Buey); g,h,i con AN, BP y MP del Argiudol (Pergamino) y j,k,l con AN, BP y MP del Hapludert.

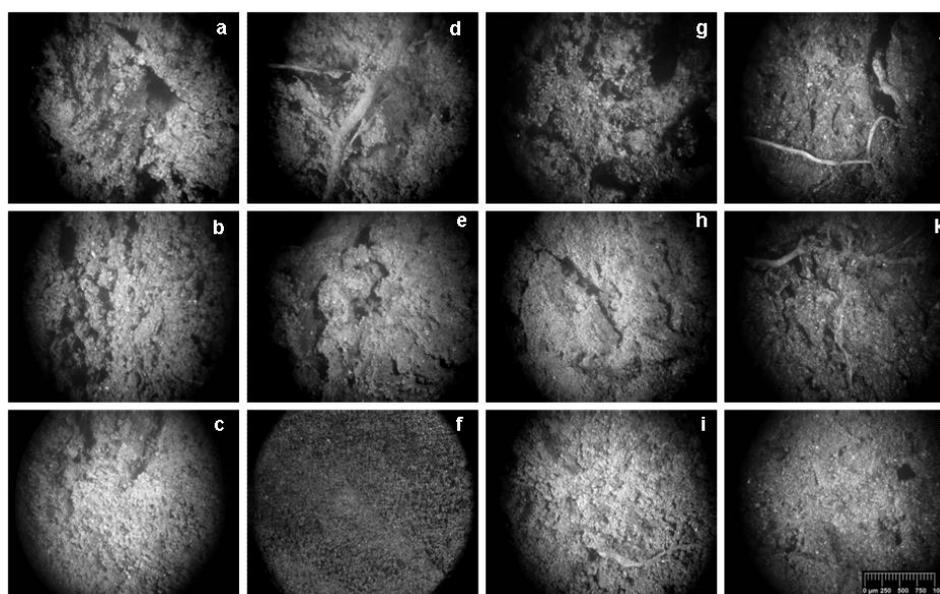


Figura 4.4 Fotografías de agregados de 1-5 cm (x5) (Wild MZ8 Leica photomicroscope) para la combinación suelo-tratamiento (Ambiente natural -AN-; Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP). Correspondiendo a,b,c con AN, BP y MP del Haplustol; d,e,f con AN, BP y MP del Argiudol (Monte Buey); g,h,i con AN, BP y MP del Argiudol (Pergamino) y j,k,l con AN, BP y MP del Hapludert.

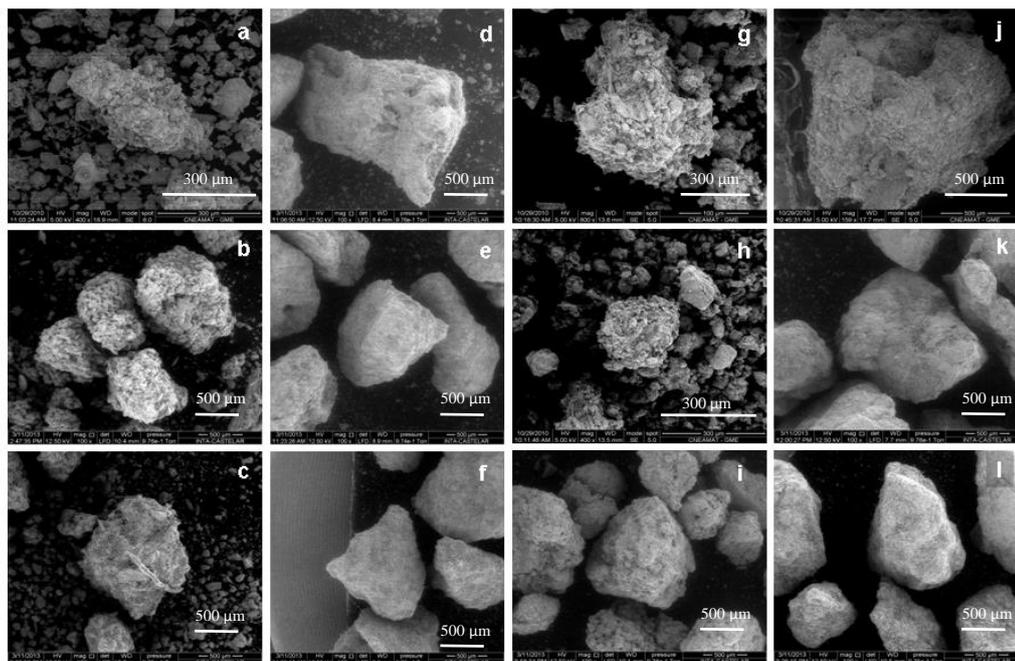


Figura 4.5 Fotografías de agregados de $<2\mu\text{m}$ (microscopio electrónico de barrido) para la combinación sitio-tratamientos (Ambiente natural -AN-; Buenas prácticas -BP- y Malas prácticas -MP). Correspondiendo a,b,c con AN, BP y MP del Haplustol; d,e,f con AN, BP y MP del Argiudol (Monte Buey); g,h,i con AN, BP y MP del Argiudol (Pergamino) y j,k,l con AN, BP y MP del Hapludert.

A partir del análisis detallado de campo y de las fotografías tomadas de cada monolito y agregado se calculó el Icv para la combinación suelo-tratamiento de manejo ya que no se pudo eliminar el factor tipo de suelo del modelo mixto. Los Icv para BP y MP en el Haplustol y los Argiudoles presentaron valores más altos indicando una situación estructural más pobre (Figura 4.6). En los tratamientos agrícolas de estos suelos únicamente se encontraron diferencias significativas entre BP y MP en el Argiudol (Monte Buey) y en el Hapludert, presentando MP valores más altos (Figura 4.6). En general, se observaron menores valores de Icv en el Haplustol, siendo el AN, el tratamiento con Icv más bajo. En contraposición, la MP del Argiudol (Monte Buey) presentó el valor más alto, diferenciándose significativamente del resto de los tratamientos de todos los suelos (Figura 4.6).

En relación a los valores de Icv por estrato, se pudo observar un aumento en profundidad para todos los sitios y para los tratamientos AN y BP, siendo esta tendencia menos pronunciada en el Hapludert (datos no mostrados). Por otro lado, en BP y MP para los Argiudoles y el Haplustol se observaron mayores valores de Icv ($\cong 4$) para la profundidad 5-10 cm, estando directamente relacionado a la presencia de estructuras laminares (continuas, discontinuas, débiles o fuertes).

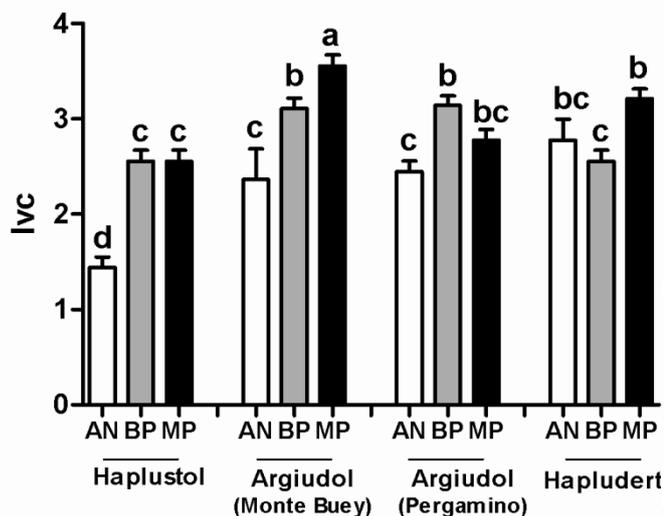


Figura 4.6 Índice calidad visual (Icv) para el Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tres manejos evaluados: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). Menores valores indican una mejor calidad estructural. Letras diferentes expresan diferencias significativas para la interacción tratamiento*suelo (LSD, $p < 0,05$).

4.3.2.2 Porosidad visible, Redondez y Excentricidad

Para las variables Pv y Rd, el modelo mixto evaluado presentó efectos significativos del tipo de suelo, encontrándose una interacción tipo de suelo x tratamiento de manejo. La excentricidad no proveyó ninguna información sobre los manejos ($p > 0,05$) por lo que los resultados no son presentados. En tres de los cuatro sitios la Pv pudo separar ambos tratamientos agrícolas (Figura 4.7a) mientras que no existieron diferencias entre AN y BP. Para el caso del Haplustol esto no fue posible, pero el AN si presentó diferencias significativas con los manejos agrícolas.

En relación a la redondez la única diferencia estadística se encontró en el Haplustol donde AN se diferenció de los tratamientos agrícolas. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 4.7b, existió una tendencia clara de aumento de la redondez en el tratamiento MP para todos los suelos con excepción del Hapludert. Como se observa en este último suelo, no se detectaron diferencias entre los tratamientos y a su vez presentó los menores valores para esta variable (Figura 4.7b).

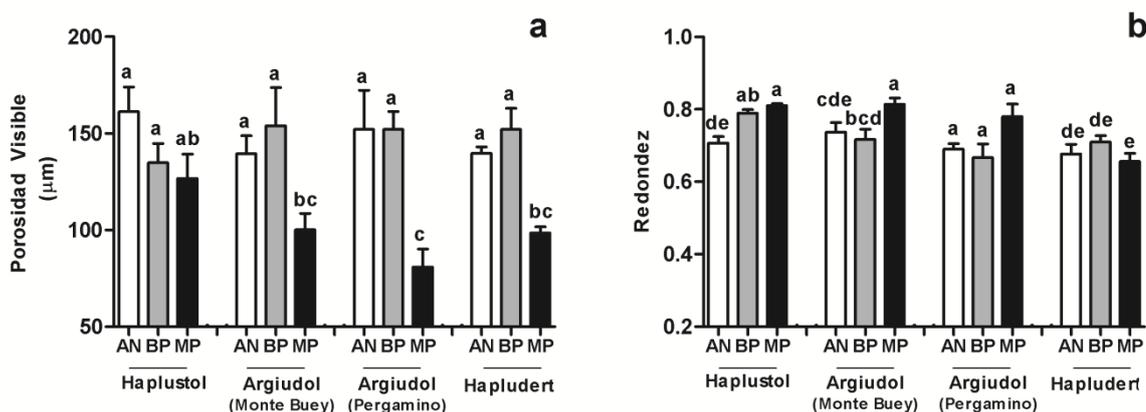


Figura 4.7 a) Porosidad visible de agregados expresados como diámetro medio de poros (μm) y (b) Redondez para los suelos evaluados, Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para, Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP). Letras diferentes expresan diferencias significativas para la interacción tratamiento*suelo (LSD, $p < 0,05$).

4.3.2.3 Morfología tridimensional de agregados

De acuerdo al modelo mixto utilizado, las variables n° de caras y n° de vértices fueron las que mejor lograron separar los tratamientos de manejo. Por otro lado, el n° de aristas no presentó efectos para el tratamiento, mientras que también se correlacionó con el n° de caras por lo cual fue descartado ya que no aportaba información adicional. Para las variables n° caras y n° de vértices, el modelo mixto empleado pudo ser simplificado. El factor aleatorio tipo de suelo pudo ser removido para lograr un modelo más sencillo en el cual participaran únicamente los tratamientos de manejo. De esta forma, para el n° de caras se encontraron diferencias significativas entre BP y MP ($p < 0.0001$), mientras que AN presentó valores estadísticamente iguales a BP (Figura 4.8a). Para el n° de vértices, el AN se separó significativamente de los manejos agrícolas, pero no existieron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los manejos (Figura 4.8b). Las tres variables medidas presentaron un desvío estándar de 0,14, 0,41 y 0,56 para el número de caras, aristas y vértices respectivamente. Por otro lado, el tratamiento MP presentó los menores valores de desvío estándar para todas las variables, indicando una homogenización de las formas estructurales.

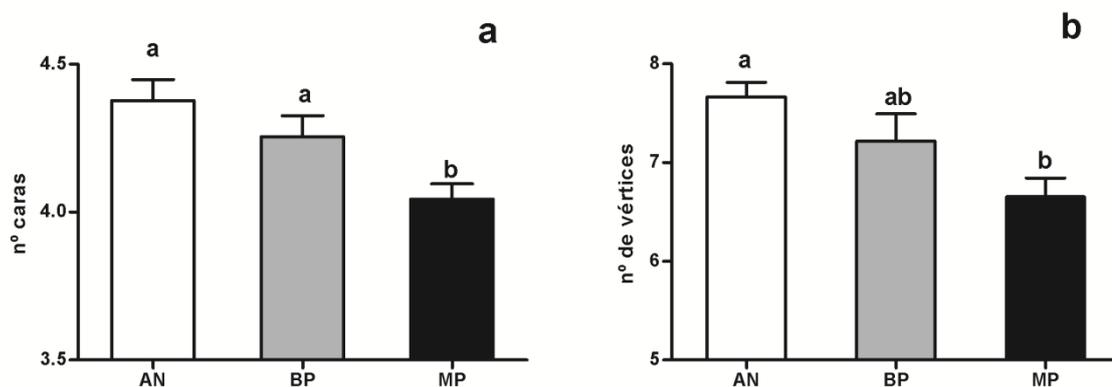


Figura 4.8 a) Número de caras de agregados y b) Número de vértices de agregados correspondientes al modelo mixto simplificado para los tres manejos evaluados (Ambiente natural – AN, Buenas prácticas – BP y Malas prácticas – MP). Letras diferentes expresan diferencias significativas entre tratamientos (LSD, $p < 0,05$).

4.3.3 Comportamiento dinámico e inherente de las variables estructurales

Como se puede observar en la Tabla 4.1, tanto el Icv como la Pv fueron las variables que más explicaron la variación entre tratamientos y menos debido al tipo de suelo (proporción de varianza=0). Sin embargo la Pv mostró una proporción importante de componente residual. En cuanto a las variables tridimensionales, el número de caras y vértices presentaron una composición de varianza del tratamiento de manejo mayor que la del sitio. Si bien el número de vértices presentó valores muy bajos de varianza por sitio, su composición de varianza residual resultó muy alta. Por último, debe destacarse que la redondez presentó una composición de varianzas equilibradas, con valores superiores para el tratamiento.

Tabla 4.1 Análisis de componentes de varianza en porcentaje para el tratamiento, sitio y el residuo del modelo mixto para las variables estructurales. Índice de calidad visual (Icv), Porosidad visible (Pv), Excentricidad (Exc), Redondez (Rd), N° de caras (Caras), N° de vértices (Vértices), N° de aristas (Aristas). En las columnas de la derecha se encuentra representada la correlación de Pearson de dichas variables con los dos primeros componentes principales que describen el gradiente físico y químico del suelo (CP1_suelo y CP2_suelo). *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001.

Variables estructurales		Componentes de Varianza (%)			CP1_suelo	CP2_suelo		
		Trat. de manejo	Tipo de suelo	Residual				
<i>Evaluación visual de la calidad del suelo. (Ball et al., 2007)</i>	- Icv	97,2	0,0	2,8	0,20	0,53	**	
<i>Evaluación de imágenes</i>	- Rd	35,6	19,9	44,5	-0,47	**	-0,04	
	- Ecc	1,9	0,0	98,1	0,14		0,14	
	- Pv	62,3	0,0	37,7	0,08		-0,16	
<i>Evaluación tridimensional de agregados (Hartge et al., 1999)</i>	- Caras	36,2	27,7	36,1	0,34	*	-0,51	**
	- Vértices	33,2	0,20	66,6	0,13		-0,36	*
	- Aristas	19,0	45,9	35,1	0,10		-0,65	***

Como se observa en la Tabla 4.1, CP1_suelo solamente se correlacionó significativamente con Rd y con el número de caras. Por otro lado, CP2_suelo, se correlacionó con Icv y con todas las mediciones tridimensionales del agregado, indicando un efecto tanto de la textura como de la mineralogía del suelo. Por otra parte, como se observa en la Tabla 4.2, el contenido de limo se correlacionó positivamente con el Icv, mientras que la arena lo hizo de forma negativa. Pv y Exc no se correlacionaron con ninguna variable en particular. A su vez Rd se correlacionó con múltiples variables intrínsecas del suelo y las variables morfológicas tridimensionales se correlacionaron con diversas variables relacionadas al contenido y tipo de arcillas, principalmente la AA para Caras y Vértices. El n° de caras se correlacionó positivamente con el COT (Tabla 4.2) mientras que se encontró un aumento en este coeficiente para las fracciones más lábiles (COP_g y COP_f) y un aumento aún mayor considerando todos los suelos con excepción del Hapludert para las fracciones COP_g y CH_t.

Tabla 4.2 Correlación de Pearson entre las variables morfológicas y estructurales del suelo y las características físicas químicas de los suelos y distintas fracciones de carbono orgánico.

Índice calidad visual (Icv), Porosidad visible (Pv), Excentricidad (Exc), Redondez (Rd), n° de caras (Caras), n° de vértices (Vértices), N° de aristas (Aristas), capacidad de intercambio catiónico (CIC), límite líquido (Ll), límite plástico, (Lp) índice de plasticidad (Ip), actividad de arcillas (AA), esmectitas más interestratificados illita-esmectita (E+I/E) densidad de partícula (Dp), humedad equivalente (HE), conductividad eléctrica (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), carbono orgánico total (COT), carbono orgánico particulado grueso (COP_g), carbono orgánico particulado fino (COP_f), carbono orgánico mineralizable (COM), hidratos de carbono total (CH_t) e hidratos de carbono soluble (CH_s). *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001.

<i>Propiedades del suelo</i>	<i>Variables morfológicas y estructurales</i>						
	Icv	Pv	Exc	Rd	Caras	Vértices	Aristas
Arcilla	ns	ns	ns	0,49 **	ns	ns	ns
Limo	0,49 **	ns	ns	ns	ns	ns	-0,35 *
Arena	-0,46 **	ns	ns	-0,43 **	ns	ns	ns
CIC	ns	ns	ns	0,37 *	0,33 *	ns	ns
Ll	ns	ns	ns	0,50 **	0,43 **	ns	ns
Lp	ns	ns	ns	0,40 *	ns	ns	ns
Ip	ns	ns	ns	0,48 **	0,52 **	ns	0,34 *
AA	ns	ns	ns	0,36	0,69 ***	0,44 **	0,57 ***
E+I/E	ns	ns	ns	0,27	0,53 ***	ns	0,47 **
Dp							
HE	ns	ns	ns	-0,50 **	0,55 ***	0,44 **	ns
CE	ns	ns	ns	-0,48 **	0,45 **	ns	ns
pH	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ca ⁺²	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Fracciones de carbono orgánico</i>							
COT	ns	ns	ns	-0,36 *	0,36 *	0,28	ns
COP _g	-0,49 **	ns	ns	ns	0,38 *	0,31	ns
COP _f	-0,50 **	0,53 **	ns	ns	0,48 **	0,43 **	ns
COM	ns	ns	ns	-0,35 *	ns	0,22	ns
CH _t	ns	ns	ns	ns	ns	-0,08	-0,49 **
CH _s	-0,47 **	0,34 *	-0,47 **	ns	ns	0,36 *	ns

4.3.4 Efecto de las características de manejo sobre las variables estructurales

En este trabajo se pudieron encontrar diversas asociaciones entre las variables morfológicas y estructurales y las variables de manejo. Con excepción de la excentricidad de agregados, todas las variables analizadas se correlacionaron con algún aspecto de manejo. De forma general, el ISI y ISI_{agr} fueron las variables de manejo que mejor explicaron los cambios morfo-estructurales del suelo (Tabla 4.3). El Icv, Pv y n° de caras mostraron altas correlaciones con ISI e ISI_{agr}. Esto indica que la intensificación del uso del suelo (mayor tiempo de presencia de raíces) mejora el Icv, aumenta la porosidad visible y el n° de caras de los agregados. Si se tiene en cuenta sólo al ISI, también Rd y el n° de vértices presentaron correlaciones significativas mostrando una disminución de la redondez y un aumento del número de vértices con valores mayores de ISI. Por otro lado, las variables estructurales que presentaron más correlaciones significativas con las variables de manejo fueron Pv y n° de caras. También debe destacarse que estas dos variables presentaron correlaciones significativas con CP1_{manejo}, el cual resume la variabilidad de todas las variables de manejo. Las correlaciones negativas encontradas con Pv y n° de caras indican que manejos más equilibrados en cuanto a la inclusión de gramíneas y leguminosas y mayores tiempos de ocupación anual del lote, tenderían a poseer mayor Pv y agregados con más caras. Por último, se encontró que todas las variables relacionadas a la preponderancia de soja en

la rotación se correlacionaron de forma opuesta al maíz con las variables estructurales, indicado un importante cambio estructural debido a la elección del cultivo en la rotación (Tabla 4.3). Así, las rotaciones con mayor contenido de soja poseen menor número de caras, menor porosidad visible y presentaron agregados más redondeados en comparación con rotaciones que incluyen una mayor proporción de maíz.

Tabla 4.3 Correlación de Pearson entre las variables estructurales y las variables de manejo para todos los suelos evaluados.

Variables estructurales	CP1_manejo	ISI	ISI _{agr}	Años bajo SD	Soja/Cultivos	Maíz/Cultivos	Soja/Maíz	Soja único cultivo
<i>Evaluación visual de la calidad del suelo. (Ball et al., 2007)</i>								
- Icv	ns	-0,64***	-0,63***	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Evaluación de imágenes</i>								
- Rd	ns	-0,32*	ns	ns	ns	-0,65**	0,72***	ns
- Exc	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
- PV	-0,74***	0,53**	0,68***	0,47*	-0,78***	0,52*	-0,64***	-0,78***
<i>Evaluación tridimensional de agregados (Hartge et al., 1999)</i>								
- Caras	-0,45*	0,52**	0,48*	ns	-0,54**	ns	ns	-0,48*
- Vértices	ns	0,46**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
- Aristas	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Índice de calidad visual (Icv), Porosidad visible (Pv), Excentricidad (Exc), Redondez (Rd), n° de caras (Caras), n° de vértices (Vértices), n° de aristas (Aristas), CP1_manejo, Índice de intensificación de cultivo (ISI), Índice de intensificación de cultivo para los manejos agrícolas (ISI_{agr}), Años bajo siembra directa (Años bajo SD), Relación de años con soja sobre la cantidad total de cultivos (Soja/Cultivos), Relación de años con maíz sobre la cantidad total de cultivos (Maíz/Cultivos), Relación de años con soja sobre maíz (Soja/Maíz), y soja como único cultivo (soja único cultivo). * p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

4.4 Discusión

4.4.1 Estructura e Icv

A partir del análisis estructural de los monolitos se pudo apreciar que existió una fuerte diferenciación estructural entre los ambientes naturales y los tratamientos agrícolas. En general los AN presentaron una isotropía estructural, estructuras más favorables al desarrollo vegetal (migajosa, granular) con más porosidad y desarrollo de raíces. Por otro lado, las situaciones agrícolas presentaron una anisotropía en la profundidad evaluada (0-20 cm), en donde se reconocieron rasgos diferenciales entre ambos tratamientos (BP y MP), los cuales dependieron de las variables de manejo y del tipo de suelo analizado.

Estos rasgos se reflejaron en el Icv el cual pudo captar las diferencias estructurales producidas por los manejos presentando una alta proporción de varianzas con respecto al tratamiento (Tabla 4.1). El efecto del suelo y principalmente la evaluación mediante el Icv en suelos arcillosos, es motivo de debate. En este trabajo no se encontró una correlación significativa con el CP1_suelo y sólo correlaciones débiles con CP2_suelo. Cuando se analizaron las características del suelo en forma individual, no se encontraron efectos para el contenido de arcilla. Lo mismo fue encontrado por Giarola (2013) en Oxisoles bajos SD y por Guimarães et al. (2013) en dos suelos de textura contrastantes (franco arenoso y arcilloso). No obstante, el contenido de arena sí presentó un coeficiente de correlación significativo con el Icv, indicando valores más bajos en los suelos más arenosos lo cual disminuye la sensibilidad de este índice.

Este índice presentó altos coeficientes de correlación con el ISI e ISI_{agr}, siendo un buen indicador del efecto que posee la intensificación de los cultivos a través de la mayor presencia de raíces debido principalmente a mayor cantidad de cultivos de invierno. Resultados comparables pueden encontrarse en Askari et al. (2013), en donde manejos con rotaciones de cultivos presentaron un mejor Icv (1,66) con respecto a situaciones con monocultivos (2,06).

Si bien en forma general, el contenido de arcilla no afectó este índice, las diferencias entre BP y MP del Hapludert respondieron de forma muy estrecha a la cantidad de arcillas. Se ha señalado que en suelos con altos contenidos de arcillas (>30%) la utilización de los índices visuales sería la mejor opción para la evaluación de la calidad de suelos (Mueller et al., 2013). No obstante, la presencia de arcillas de tipo expansibles produce una regeneración constante de la estructura mitigando los efectos de los tratamientos. De esta forma, en este tipo de suelos, debería incluirse la medición de las propiedades vérticas en conjunto con el Icv.

Este efecto también se refleja en la relación del Icv con la densidad aparente. Cuando se utilizaron todos los suelos, no se encontró un coeficiente de correlación significativo entre Icv y DAP_{0-20 cm} (p=0,07) mientras que cuando se desagregó la DAP por profundidad, se encontraron relaciones significativas pero débiles con DAP_{0-5 cm} (p=0,02). No obstante, cuando el Hapludert fue removido, la DAP_{0-20 cm} fue significativo (p=0,02) llegando a un coeficiente de 0,53 para la DAP_{0-5 cm} (p=0,004). Este mismo comportamiento fue encontrado por Mueller et al. (2009) y Sheppard (2003) en suelos no expansibles, señalando la utilidad de esta metodología en la evaluación de la compactación en ese tipo de suelos.

En esta tesis tampoco existieron relaciones significativas con el COT, en línea con lo encontrado por Murphy et al. (2013). La falta de correlación en ambos casos podría deberse a la interacción de esta variable con el tipo y contenido de arcillas.

Cuando se evaluó una fracción de carbono orgánico más dinámica (COP_g y COP_f) y menos correlacionada con las características intrínsecas del suelo, se encontraron altos coeficientes de correlación (Tabla 4.2). De la misma manera, cuando se excluyó al Hapludert del análisis esta correlación aumentó sensiblemente. Dicho comportamiento del Icv con las fracciones enriquecen la utilidad de este índice, principalmente debido a la respuesta dinámica de estas fracciones carbonadas.

Cuando se analiza al Icv como metodología para evaluar la estructura surgen dos aspectos a considerar. El primero consiste en la utilidad de esta metodología en la región pampeana. Como fuera señalado por diversos autores (Sasal et al., 2006; Morrás y Bonel, 2005) en esta región la estructura laminar es cada vez más frecuente. En esta metodología la presencia de dicha estructura es consignada con un puntaje de 4. Si bien el peor puntaje es de 5, este valor está destinado a suelos con síntomas de anaerobiosis siendo poco común la utilización de estos suelos para cultivos agrícolas. Por ello, el puntaje 4 es muy fácilmente adoptado disminuyendo la sensibilidad de la evaluación en esta región. Esta misma cuestión fue señalada por Cavalieri et al. (2009), en donde resaltan que dichas estructuras no siempre conllevan a un estado estructural crítico, siendo estos suelos más productivos que lo predicho por la evaluación estructural. En este sentido cobra importancia la localización de dicha estructura. Con esta metodología si bien se analiza y cuantifica el tipo de estructura por su espesor, el valor final es resultado del promedio de estos espesores. De la misma forma que lo expuesto por Guimarães et al. 2009 este índice se enriquecería mediante su cálculo por estrato. En esta tesis, existió un aumento de Icv en profundidad. Esto era esperable debido a la estratificación de la materia orgánica bajo SD y la disminución de la actividad biológica en profundidad. Debido nuevamente a la cantidad y tipo de arcillas, en el Hapludert - con características más isotrópicas- esta tendencia no fue tan marcada. Este mismo comportamiento fue encontrado por Askari et al. (2013) en suelos bajos SD y por Guimarães et al. (2013) para dos texturas de suelo franco arenoso y arcilloso sin arcillas expansibles.

Como segundo aspecto, si bien esta metodología es rápida y sencilla y aunque el operador debe contar sólo con conocimientos básicos de edafología, para los suelos más arcillosos de la región pampeana debería considerarse el momento de evaluación. Un cuidado particular debería tenerse con los Vertisoles en los que el lapso de humedad óptima para la evaluación es muy corto, debido a la alta plasticidad del suelo en contenidos medios a altos de humedad y al estado duro que resulta con baja humedad edáfica.

4.4.2 Porosidad visible, redondez

En esta tesis, la porosidad visible (Pv) en conjunto con el Icv fueron las variables que presentaron mayor proporción de varianza para el tratamiento de manejo. Además, como se presentó en la Tablas 4.1 y 4.2, la Pv no presentó correlaciones significativas ni con los CP_suelos ni con las variables edáficas individuales. Además fue la única variable que presentó correlaciones significativas con todas las variables de manejo y diferenció, en 3 de los 4 suelos, los tratamientos agrícolas (Figura 4.7). La ausencia de diferencias significativas entre BP y MP del Haplustol puede ser explicada por la alta porosidad textural de dichos suelos. La textura arenosa y particularmente la reciente inclusión del maní en la rotación de MP pudo haber contribuido en la ausencia de dichas diferencias.

En relación a la redondez, el aumento del valor de esta variable estuvo claramente asociado a MP (Figura 4.6). Esto puede ser corroborado visualmente en las

Figuras 4.3 y 4. Similares resultados fueron encontrados por Morrás et al. (1999) en donde monoculturas de yerba mate sobre suelos Kandihumult típicos presentaron agregados (>8 mm) con formas más redondeadas a diferencia de tratamientos de suelo virgen y de yerba mate con abono verde (Pasto elefante). También Olszewski et al., (2004), encontró agregados más redondeados en manejos bajo SD y escarificador con respecto a arados de reja y disco. De la misma forma, Alvarez et al. (2008), encontraron en un Argiudol típico del sudeste bonaerense cambios en la rugosidad para diferentes prácticas agrícolas, presentándose una mayor rugosidad en situaciones sin agricultura.

Sin embargo, dicha variable presentó relaciones con el CPI_suelo y otras variables del suelo (Tablas 4.2 y 4.3) estando fuertemente influenciada por el gradiente textural y mineralógico, presentado en promedio, mayores valores para el Haplustol y menores para el Hapludert. Dicho comportamiento puede ser explicado por la expansión y contracción del suelo, en este último suelo, el cual impediría el redondamiento de la estructura otorgándole más rasgos angulares y de cuña con respecto al Haplustol. Esta variable si bien puede ser de interés para evaluar la calidad de suelo, su utilidad podría verse relativizada en la comparación entre tipos de suelos rígidos y no rígidos. Por otro lado, esta variable presentó un importante coeficiente de correlación con la RP_{0-20} ($r=0,43$, $p=0,0089$) mientras que no presentó ninguna relación con la DAP. No obstante para los Molisoles evaluados, es de gran interés la medición de este rasgo morfológico ya que las distintas intensidades de cultivos bajo un mismo sistema de manejo (SD) se vieron reflejados en cambios en la redondez de sus agregados.

4.4.3 Análisis tridimensional de agregados

Los análisis tridimensionales de agregados fueron muy útiles para discriminar entre los tratamientos. Principalmente el n° de caras fue la variable que mejor explicó dicha diferenciación y en conjunto con el n° de vértices fueron las únicas variables de esta sección que no presentaron una interacción suelo-tratamiento. Mientras que el n° de caras diferenció claramente BP de MP, el número de vértices logró separar AN de MP, pero no así BP de AN. Esta misma sensibilidad diferencial entre variables fue encontrada en el trabajo de Hartge et al. (1999) en donde se atribuye la falta de potencia del n° de vértices a una mayor variabilidad en la determinación de esta variable. De la misma forma, en esta tesis, se encontraron mayores valores de desvío estándar del n° de vértices cuatro veces superior al n° de caras.

La creación de caras es un proceso vinculado a la expansión y contracción (Hartge et al, 1999) y a los factores de agregación del suelo. Si bien los distintos manejos agrícolas pueden modificar estos procesos, el tipo y contenido de arcillas así como las propiedades reológicas del suelo tienen una influencia mayor. Esto pudo ser comprobado por el alto coeficiente de correlación encontrado entre esta variable y AA, E+I/E, LI y Ip. Por otro lado, el n° de caras presentó correlaciones significativas tanto para la RP_{0-20} ($r= -0,39$, $p=0,022$) como para la DAP_{0-20} ($r= -0,57$, $p=0,0004$) indicando una estrecha vinculación con la compactación del suelo. Además, a semejanza del Icv, el n° de caras también se correlacionó con las fracciones más lábiles del carbono demostrando su sensibilidad para detectar cambios rápidos en los manejos agrícolas. Cuando no se consideró al Hapludert en el análisis estadístico, los coeficientes de las fracciones más lábiles aumentaron aún más su valor debido al comportamiento diferencial del carbono en suelos con diferentes cantidades y tipos de arcillas.

En cuanto al n° de vértices, aún cuando por su variabilidad no logró discernir los tratamientos agrícolas a un nivel de significancia del 5%, su comportamiento no estuvo influenciado por el gradiente textural de los sitios (Tablas 4.1 y 4.2) por lo que se

constituye en un indicador a seguir evaluando. En este sentido, el n° de vértices presentó para la RP el mismo coeficiente y nivel de significancia que el n° de caras aunque para el caso de la DAP sólo se encontraron diferencias significativas para $DAP_{0.5}$ ($r = -0,38$, $p = 0,03$)

4.5 Conclusión

En esta sección, se puede concluir que los manejos evaluados afectaron diversos rasgos morfoestructurales. Entre las variables medidas, el Icv y la Pv fueron las que describieron de forma más precisa las distintas intensidades agrícolas. Esto se ve reflejado por el alto coeficiente de correlación encontrado entre Icv y el ISI e ISI_{agr} y las múltiples correlaciones encontradas entre Pv y las variables de manejo. Además estas variables no fueron sustancialmente afectadas por el tipo de suelo (Tabla 4.1). Por otro lado, para el n° de caras y vértices, el tratamiento de manejo pudo ser analizado independientemente del tipo de suelo, sin embargo cuando se correlacionaron todos los valores de dichas variables con el CP1_suelo y CP2_suelo, se encontraron correlaciones significativas, mientras que también el componente de varianzas presentó efectos importantes del tipo de suelo. Por consiguiente, en esta sección se resalta el valor de las variables Icv y Pv como indicador de cambios estructurales ante la intensificación agrícola, siempre y cuando se reconozcan las limitantes asociadas a cada metodología, por ejemplo, los altos valores de Icv asociados a texturas gruesas o la forma de consideración de las estructuras laminares.

Sección B - Descripción Estructural del Suelo- Micro escala

4.1 Introducción

La SD promueve un arreglo estructural diferente a las producidas por las labranzas convencionales. En este sentido, los resultados de los diversos parámetros físicos y biológicos usualmente analizados son una consecuencia de la nueva organización de los componentes, generándose nuevas interacciones que se reflejan en la estructura, en particular a nivel de la microescala. Sin embargo, los estudios micromorfológicos que permiten un análisis directo y más detallado de la organización de los componentes del suelo han sido escasamente utilizados hasta el presente para evaluar el efecto de la SD, pese que han generado información sumamente rica y promisoría para la comprensión de los procesos que ocurren en el suelo en SD

Shipitalo y Protz (1987), en un Brunisol de Ontario, Canadá, cultivado en SD durante 7 años, señalan la aparición de una microestructura laminar y la tendencia de los poros a orientarse paralelamente a la superficie del suelo. Así, encontraron una reducción de casi el 50% de la macroporosidad en el horizonte Ap en relación al suelo laboreado, la que sería compensada desde el punto de vista funcional por el importante incremento de bioporos. Drees et al. (1994) para el suelo Maury de Kentucky con 18 años bajo SD identifican en los 5 cm superficiales tres zonas diferentes en sus características morfológicas, resaltando en particular la fuerte estructura laminar, con poros alargados orientados horizontalmente, los que aparecen interconectados por poros biológicos; aunque la porosidad total es ligeramente menor en SD, en este caso el tamaño medio de los poros resultó estadísticamente mayor en SD que en LC; en el horizonte superficial por debajo de los 10 cm de profundidad se observó en SD, por el contrario, una fabrica densa, con abundancia de canales biológicos y pellets fecales. Por su parte, Vandenbygaart et al. (1999) estudiaron la evolución estructural de un suelo Luvisol de Ontario Canadá, en parcelas con diferente antigüedad bajo SD. Estos autores observaron también diferentes niveles estructurales en el horizonte superficial, con dominancia de una estructura laminar entre 5 y 15 cm de profundidad, debida a huecos planares orientados horizontalmente; sin embargo luego de 11 años bajo SD se observó el desarrollo de una estructura granular con huecos de empaquetamiento debido a la actividad biológica; en este caso el cultivo en SD causó también una reducción del volumen poral y del número total de poros en relación con la LC, aunque con el tiempo se observó un incremento del número de poros redondeados mayores a 100 μm , evidentemente de origen biológico. Algunos otros trabajos como los de Pagliai et al. (1983), Pagliai y De Nobili (1993) muestran diferencias notorias en la microestructura y porosidad en los suelos en SD respecto a los suelos laboreados, aunque los resultados difieren según los casos estudiados.

En la Argentina, Bonel y Morrás (2000), Morrás et al. (2004), Morrás y Bonel (2005) y Bonel et al. (2005) realizaron análisis micromorfológicos de diversos suelos de la Pampa norte cultivados en SD. Los resultados obtenidos permitieron constatar diferencias microestructurales notorias entre suelos cultivados en SD con aquellos bajo labranza convencional o no cultivados. En los suelos cultivados en SD observaron una anisotropía vertical de la estructura con rasgos comunes entre los distintos casos estudiados, permitiendo definir así un modelo microestructural propio de la SD con tres capas dentro de los primeros 10 cm de profundidad del suelo: la capa I de pequeño espesor y constituida por restos orgánicos y agregados irregulares, la capa II de estructura laminar con fisuras horizontales de diverso tamaño y la capa III más densa,

con menor proporción de agregados individualizados con cavidades y poros biológicos. Además pudieron constatarse diferencias notorias en el grado de desarrollo de las distintas capas, lo que los llevó a definir tres subtipos de este modelo estructural, los que pueden encontrarse yuxtapuestos dentro del mismo suelo. Posteriormente, estos subtipos fueron luego retrabajados y denominados modelos microestructurales (Morrás et al. 2012). Estos modelos microestructurales fueron también identificados en suelos bajo SD por Alvarez et al., 2014.

De esta forma, el objetivo de esta sección será la de realizar una descripción micromorfológica de la porción superficial del horizonte A para evaluar el efecto de la intensificación agrícola en suelos de textura y mineralogías contrastante, a través del análisis de los modelos microestructurales propuestos por Morrás et al. (2014).

4.2 Materiales y métodos

En cada uno de los sitios y tratamientos estudiados se tomaron muestras no disturbadas y orientadas del horizonte A del suelo a dos profundidades: 0-5 cm y 5-10 cm, con 3 repeticiones para cada tratamiento de manejo. Las muestras fueron impregnadas con resina sintética de tipo poliéster y se prepararon cortes delgados de aproximadamente 30 cm² de superficie. Estos cortes fueron analizados por microscopía óptica en luz natural y luz polarizada con un equipo Leica Wild MZ8 en un rango de 6 a 50 aumentos. Las descripciones micromorfológicas fueron realizadas de acuerdo a Stoops (2003), utilizándose la terminología en castellano según Aguilar et al. (2011).

Para la descripción de la porosidad y microestructura se consideraron también los criterios expuestos por Morrás (2014). Por otro lado, en la descripción de estos horizontes superficiales se siguieron además los criterios expuestos por Morrás et al (2012) para los suelos cultivados en SD en cuanto a la identificación de tres niveles microestructurales (I, II y III) y tres modelos microestructurales (laminar, densificado y biodisturbado). Adicionalmente, en este trabajo se distinguió un cuarto modelo microestructural que fue denominado "bioconstruido". En este trabajo sólo se describen los cortes delgados correspondientes a una sola repetición de cada combinación tratamiento de manejo/suelo muestreada.

4.3 Resultados

Las características microscópicas de las muestras estudiadas se describirán comparativamente en dos agrupamientos. Por un lado aquellas que corresponden a los componentes de la masa basal, y por otro lado las relativas a la estructura y porosidad, incluyendo aquí como elementos relacionados a su conformación a los componentes de origen biológico (materia orgánica y excrementos). La proporción de diversos constituyentes del suelo fue estimada usándose una escala de frecuencia comparativa de cinco grados: raro (r), ocasional (o), común (c), frecuente (f), muy frecuente (mf).

4.3.1 Masa basal

Todos los tratamientos de cada sitio presentan características comunes en cuanto a la composición y distribución de las fracciones inorgánicas de su masa basal.

La relación semi-cuantitativa fracción gruesa/fracción fina (g/f) en el límite de 2 um presenta un incremento progresivo de la fracción fina en la secuencia Haplustol-Argiudoles-Vertisol (Tabla A.6), en coincidencia con los análisis granulométricos. La composición mineralógica de la fracción gruesa aparece dominada en todos los suelos por minerales "blancos" (cuarzo y feldspatos). En los Molisoles se identificaron también algunos otros minerales, con algunas diferencias entre suelos. Así en el Haplustol se observó una proporción mayor de hornblendas, en el Argiudol Monte Buey se observó algo más de micas y vidrios volcánicos, en tanto en el Argiudol Pergamino se identificaron plagioclasas, en parte sericitizadas, y algunos piroxenos. En cuanto al tamaño de los granos, en el Haplustol el tamaño más frecuente correspondió a la arena muy fina (aproximadamente 80 µm), en los Argiudoles estuvo en el límite limo-arena muy fina (50-60 µm), en tanto el Vertisol se caracterizó por una distribución de tipo bimodal, con una dominancia de granos de tamaño limo con un tamaño muy frecuente de aproximadamente 40 um, y una pequeña proporción de granos de tamaño arena fina (200 µm).

En todos los suelos la fracción plásmica es una mezcla organo-mineral de color pardo-rojiza en los Molisoles y pardo-oscura en el Vertisol, generando una fábrica de birrefringencia de tipo indiferenciado. La distribución relacionada (D_r g/f) presentó diferencias entre los suelos, en consonancia con el incremento de la fracción arcilla. Así, en el Haplustol la D_r g/f fue de tipo enáulica (también quitónica en la superficie de AN) y parcialmente porfírica, en los Argiudoles fue porfírica de espaciado simple, en tanto en el Vertisol se caracterizó por ser porfírica de espaciado doble.

4.3.2 Porosidad y microestructura

La organización microestructural presentó características diferenciales relevantes para las distintas combinaciones de suelo/tratamiento, que sin duda permiten explicar el comportamiento de distintas variables hidrofísicas y se relacionan con las características morfológicas descriptas a otros niveles de organización.

Los componentes de estructura y porosidad y su clasificación tipológica se presentan en las Tablas A.6.a, b, c, d y se describen a continuación para cada suelo.

Como se mencionó, en este trabajo se utiliza también el concepto de Modelos microestructurales expuesto por Morrás et al. (2004; 2012) para suelos cultivados en SD. Dado que el microhorizonte I generalmente presenta algún grado de actividad biológica con acumulación de restos vegetales y de la fauna, en tanto por debajo de los 5 cm de profundidad es común que la estructura sea algo diferente (por ejemplo con una disminución de la porosidad), estos tipos de organización estructural se reconocen principalmente en el microhorizonte II que se desarrolla habitualmente entre 1 y 5 cm de profundidad. Los modelos que se distinguen son los siguientes:

-*Laminar*: presenta agregados laminares, generalmente de poca porosidad, separados por fisuras (sub) horizontales, típicamente anchas y largas.

-*Densificado*: en este caso se observa un empaquetamiento denso de las partículas y agregados y una muy baja porosidad, eventualmente de pequeñas cavidades o fisuras.

-*Biodisturbado*: está caracterizado por canales y rellenos tubulares; si hay láminas éstas se presentan rotas y desplazadas; en algunos casos la actividad de la fauna ha sido muy intensa y no quedan remanentes de agregados laminares. Un rasgo característico son agregados laminares con pequeñas microfisuras onduladas, resultantes de la compactación de excrementos.

En este trabajo, y dado que se han estudiado asimismo varias situaciones de referencia no cultivadas, ha aparecido claramente la necesidad de distinguir el siguiente modelo microestructural:

-*Bioconstruido*: se caracteriza por una intensa actividad biológica, expresada por la dominancia de excrementos y canales rellenos; los agregados son de manera dominante esferoidales, y los poros típicos son los de empaquetamiento, canales y cavidades en estrella. Se observa además abundante materia orgánica como humus en asociación con la fracción mineral fina en la masa basal y como restos vegetales en diversos grados de humificación.

Además de estos tipos característicos, también se han observado situaciones transicionales tanto porque ninguno de los modelos descriptos se encuentra claramente desarrollado, como por el hecho que en un mismo corte delgado se presentan yuxtapuestos dos o más modelos estructurales; estas situaciones se indican mencionando los diferentes tipos de estructura separados por un guión.

Haplustol

En el nivel de 0-5 cm del Ambiente natural, en su parte superior (I) se presentan poros de empaquetamiento complejo entre pequeños agregados esferoidales (pellets fecales) y granos sueltos, en parte revestidos (Figura 4.9) (Tabla A.7a). En la parte inferior de la muestra (II) los agregados esferoidales tienen un empaquetamiento más denso generando cavidades y algunas fisuras curvas predominantemente horizontales. Son abundantes en todo el nivel los poros tubulares rellenos con excrementos y granos gruesos revestidos. Se observan abundantes restos vegetales en diversas etapas de humificación, siendo características acumulaciones filamentosas oscuras. En este tratamiento la microestructura del suelo es de tipo granular, con gránulos de origen fecal, libres en la masa basal o relleno de numerosos canales. La organización entre agregados y poros resulta claramente de una intensa actividad biológica, que ejemplifica claramente el modelo estructural bioconstruido.

En el tratamiento BP, además de una escasa acumulación de excrementos y restos vegetales en superficie (I), el microhorizonte II presenta agregados laminares de 1-2 cm de espesor, separados por fisuras horizontales y de escasa porosidad interna (algunos canales) (Figura 4.9b); esta organización se repite en la parte superior del nivel III observándose una proporción algo mayor de canales rellenos y excrementos, en tanto su parte inferior es densa (Figura 4.9b). La microestructura del nivel II es laminar con láminas fuertemente separadas y el modelo microestructural es típicamente laminar, en tanto en el nivel III es transicional a biodisturbado.

Por su parte en MP, tanto en el nivel II como en el III la microestructura y el modelo microestructural responden también al tipo laminar (Figura 4.9d; 4.9e). Este tratamiento se diferencia de BP por la menor cantidad de canales, de excrementos de la fauna y de restos humificados

Argiudol (Monte Buey)

En el Ambiente natural, en la parte superior (I) del nivel de 0-5 cm, se presentan poros de empaquetamiento compuesto entre pequeños agregados esferoidales (grumos y gránulos) en tanto en la parte inferior (II) se presentan bloques subangulares y láminas con alta porosidad interna (Figura 4.10a) (Tabla A.7b). Los excrementos relleno de canales y sueltos en la masa basal son abundantes, así como los restos vegetales en proceso de humificación. La microestructura es migajosa en el microhorizonte I y en bloques en el II, en tanto el conjunto responde al modelo estructural bioconstruido.

En el tratamiento BP el nivel más superficial (I) es similar al mismo nivel del AN, con dominancia de agregados esferoidales y poros de empaquetamiento compuesto (Figura 4.10b). El microhorizonte II asimismo presenta abundancia de agregados esferoidales de origen fecal, que aquí se presentan con una mayor coalescencia originando pequeños bloques subangulares; en este caso los poros dominantes son cavidades y canales. Así, la microestructura entre 0 y 5 cm de profundidad es granular y parcialmente esponjosa en el microhorizonte II. En el nivel III hay una estructura en bloques moderadamente desarrollados; sin embargo estos presentan alta porosidad constituida por cavidades y canales (Figura 4.10c). En toda la profundidad estudiada, el horizonte Ap de este tratamiento responde al modelo de microestructura bioconstruida.

Finalmente en el nivel I del tratamiento MP, si bien los agregados derivados de excrementos son muy abundantes, estos se encuentran compactados y la porosidad dominante es de cavidades. Por su parte en el nivel II es conspicua la presencia de agregados laminares con finas y cortas fisuras onduladas en su interior, que resultan de

la compactación de excrementos (Figura 4.10d). En el microhorizonte III existen bloques moderadamente desarrollados con una abundante porosidad de cavidades; también se presentan aquí en posición subvertical pequeñas láminas de agregados esféricos (excrementos) coalescentes (Figura 4.10e). Así, la microestructura entre 0-10 cm es principalmente de cavidades y parcialmente de tipo laminar. El modelo microestructural en toda esta profundidad es transicional biodisturbado-laminar.

Argiudol (Pergamino)

En el nivel 0-5 cm del Ambiente natural se observa un microhorizonte superficial (I) constituido por grumos derivados de la coalescencia de excrementos por lo que dominan los poros de empaquetamiento compuesto (Figura 4.11a) (Tabla A.7c). El microhorizonte II presenta grumos y bloques subangulares medios con porosidad de cavidades. En el microhorizonte III dominan los grumos derivados de excrementos soldados; la porosidad es abundante, de poros de empaquetamiento, canales y cavidades (Figura 4.11b). En todas las profundidades son abundantes los restos vegetales frescos y en humificación. La microestructura dominante en el horizonte es grumosa y parcialmente en bloques subangulares y el modelo microestructural es claramente bioconstruido.

En el tratamiento BP, el microhorizonte I presenta pequeños agregados laminares con microfisuras onduladas derivados de excrementos compactados; también se observan cavidades resultantes del empaquetamiento de excrementos (Figura 4.11c). Por su parte el microhorizonte II presenta un empaquetamiento más denso de excrementos y una porosidad de cavidades y canales. La masa basal del microhorizonte III está también en gran parte constituida por excrementos compactados que dan lugar en este caso a bloques y láminas débilmente desarrolladas, con una porosidad de cavidades. La microestructura en el nivel I es laminar (láminas de excrementos compactados) en tanto en II y III es de cavidades. El modelo microestructural es transicional entre laminar y biodisturbado.

En cuanto al tratamiento MP, en su microhorizonte III existen bloques subangulares débilmente desarrollados y porosos, en los que gran parte de la masa basal está constituida por excrementos compactados; la porosidad dominante es de cavidades irregulares y en estrella, así como finas fisuras onduladas. La microestructura es de cavidades en tanto el modelo microestructural es de tipo transicional densificado-biodisturbado.

Hapludert

En toda la profundidad 0-5 cm del Ambiente natural la organización es similar, no distinguiéndose dos microhorizontes (Figura 4.12a) (Tabla A.7d). Los agregados son bloques subangulares irregulares pequeños; su masa basal está constituida por pequeños agregados esferoidales de 50-100 μm de diámetro, los que a su vez se agrupan en otros mayores de unos 500 μm , y estos a su vez se organizan en los bloques. La porosidad es de cavidades, huecos de empaquetamiento y algunas fisuras. Los excrementos y restos orgánicos humificados en la masa basal y sueltos en poros son frecuentes; resulta característico en los poros de este horizonte la presencia de una red de filamentos orgánicos humificados que actúan conectando los microagregados. La microestructura característica es de tipo esponjosa y el modelo estructural es de tipo bioconstruido.

En el tratamiento MP (Figura 4.12b), el microhorizonte I tiene unos 2,5 cm de espesor y está conformado por pequeños bloques subangulares y granulos grandes, generando entre ellos poros de empaquetamiento compuesto. Por su parte el

microhorizonte II presenta pequeños agregados laminares con fisuras onduladas. En la masa basal son abundantes los excrementos compactados; también son frecuentes los excrementos relleno de poros. La microestructura en I es de bloques y gránulos y en II de cavidades y laminas de excrementos compactados. El modelo microestructural es biodisturbado.

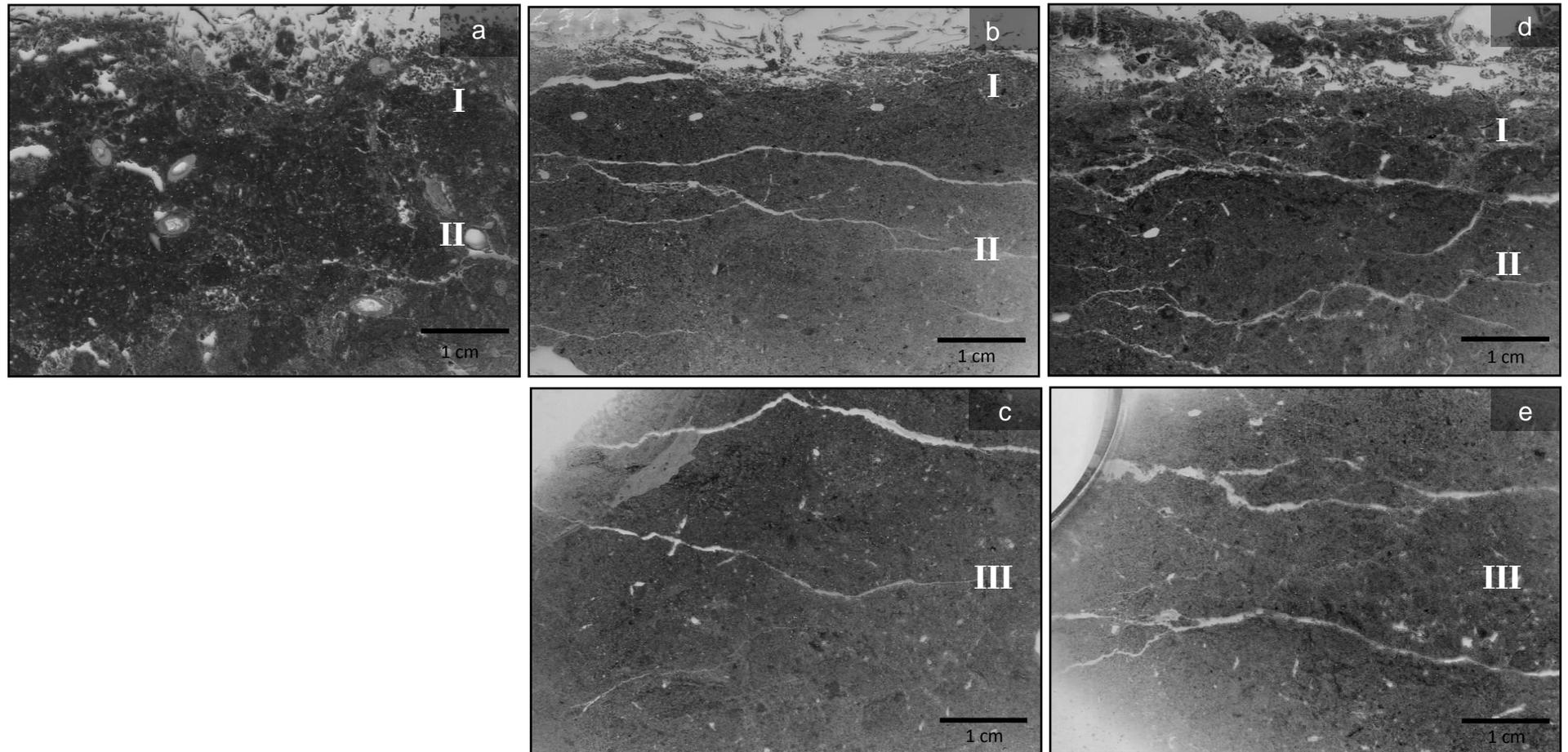


Figura 4.9 a) Cortes delgados correspondiente al suelo Haplustol; a) Ambiente natural 0-5 cm, b) Buenas prácticas 0-5 cm, c) Buenas prácticas 5-10 cm, d) Malas prácticas 0-5 cm, e) Malas prácticas 5-10 cm.

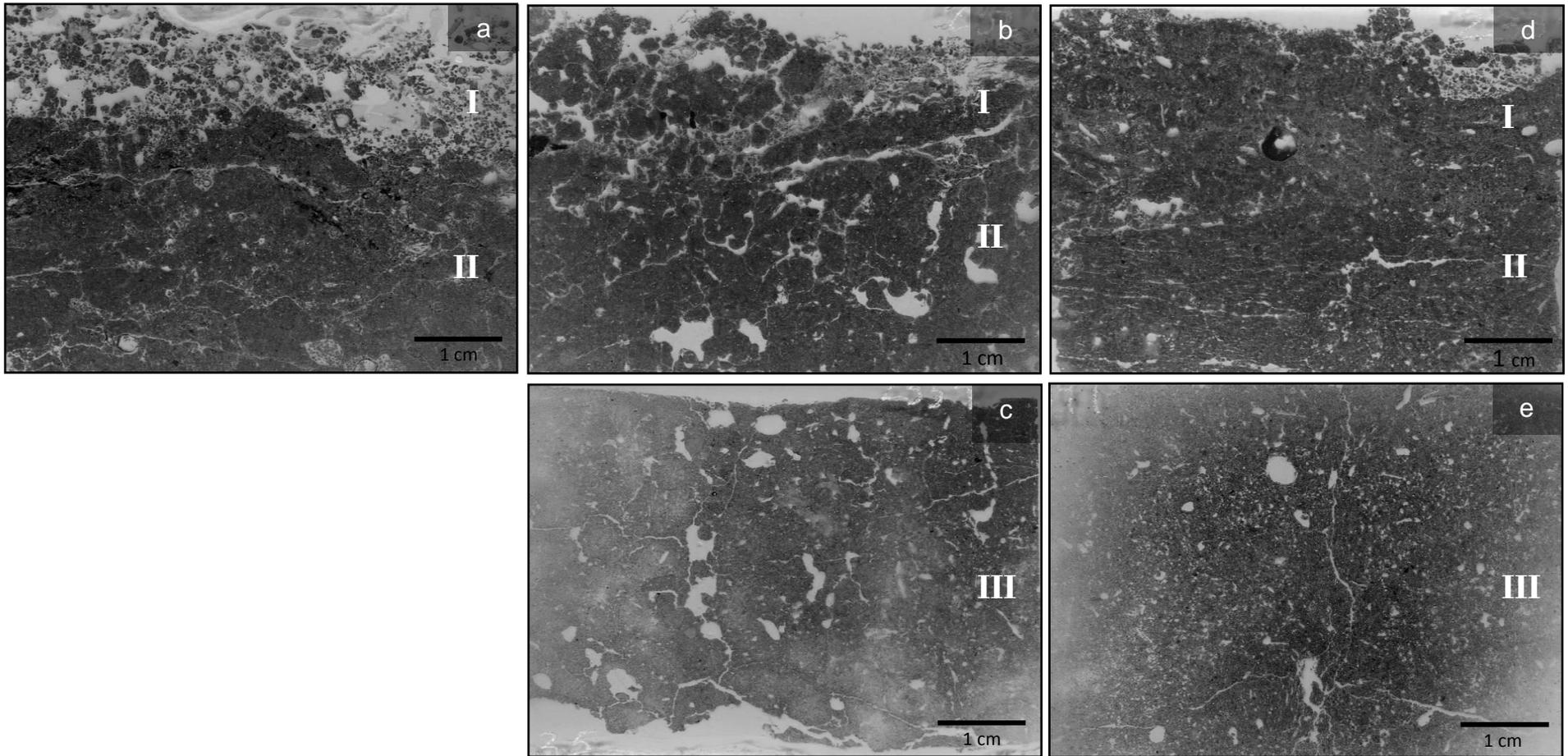


Figura 4.10 a) Cortes delgados correspondiente al suelo Argiudol (Monte Buey); a) Ambiente natural 0-5 cm, b) Buenas prácticas 0-5 cm, c) Buenas prácticas 5-10 cm, d) Malas prácticas 0-5 cm, e) Malas prácticas 5-10 cm.

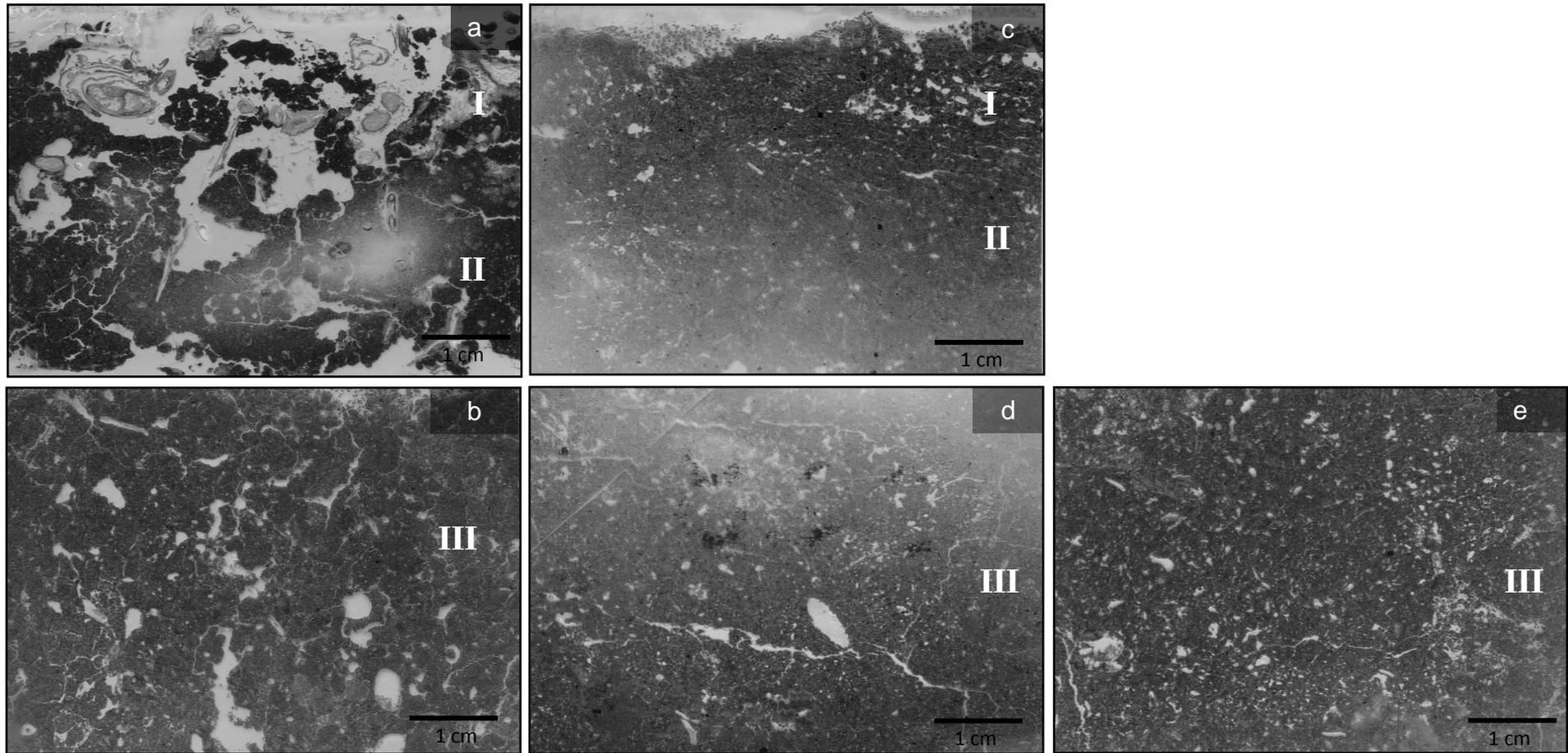


Figura 4.11 a) Cortes delgados correspondiente al suelo Argiudol (Pergamino); a) Ambiente natural 0-5 cm, b) Ambiente natural 0-5 cm, c) Buenas prácticas 0-5 cm, d) Buenas prácticas 5-10 cm, e) Malas prácticas 5-10 cm.

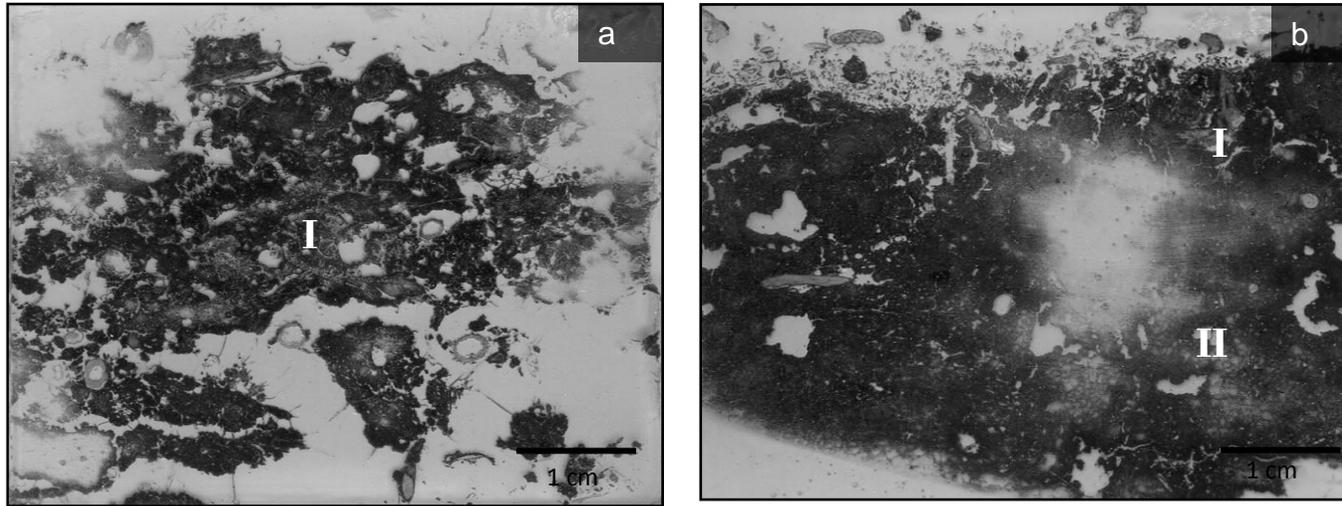


Figura 4.12 a) Cortes delgado correspondiente al suelo Hapludert; a) Ambiente natural 0-5 cm, b) Malas prácticas 5-10 cm.

4.4 Discusión

El análisis micromorfológico de la porción más superficial del horizonte A puso en evidencia notorias diferencias microestructurales entre los diversos suelos y tratamientos estudiados, así como es relevador de la dinámica estructural del suelo en función de sus características composicionales y de la interrelación y equilibrio entre los procesos compresivos resultantes del tránsito y los procesos de disturbio y mezcla producidos por la actividad biológica.

En primer lugar el análisis microscópico muestra claramente las diferencias de organización entre las fracciones gruesas y la micromasa arcillo-húmica como consecuencia de las diferencias composicionales entre los distintos suelos. Así, en el Haplustol y debido a su textura arenosa la distribución relacionada es enáulica y quitónica, en los Molisoles limosos la DR es porfírica de espaciado simple, en tanto en el Vertisol arcilloso esta es de tipo porfírico de espaciado doble. Esas diferencias composicionales se reflejan también en el tipo de estructura básica de cada suelo, tal como se expresa en los tratamientos de AN: así en el Haplustol la estructura es granular, en los Argiudoles además de gránulos y grumos aparecen también bloques subangulares, en tanto en el Vertisol son característicos los pequeños bloques subangulares. Usando el concepto de modelos microestructurales (Morrás et al, 2012), en estos tratamientos de suelo no cultivado donde es fundamental la actividad de la biota, se ha descrito un modelo de tipo bioconstruido.

Esta arquitectura del suelo no resultó exclusiva de los suelos no cultivados sino que también aquí se ha observado en tratamientos en SD. Esto indicaría que en esas situaciones la actividad biológica benéfica supera el efecto mecánico de compresión; en otros términos, sería un estadio superior de influencia de la biota en la construcción estructural al que refleja el modelo biodisturbado.

En segundo lugar el análisis micromorfológico ha mostrado claramente los cambios estructurales derivados del cultivo en SD y las diferencias existentes tanto entre suelos como entre tratamientos. En este sentido, por un lado resulta notoria la anisotropía vertical de la microestructura, que permite distinguir usualmente tres microhorizontes dentro de los primeros 10 cm de los suelos estudiados. Por otro lado, se manifiestan claramente distintos tipos de organización o modelos microestructurales, cuya ocurrencia difiere entre suelos y tratamientos.

Así, en el *Haplustol* resulta notoria y llamativo por la textura del suelo, el desarrollo de una microestructura laminar tanto en BP como en MP. En general, la ocurrencia de este tipo de estructura es mucho más común en Argiudoles limosos de la región pampeana (Bonel et al., 2005, Alvarez et al., 2014, Sasal, 2012). Sin embargo en el tratamiento BP pudo constatar una mayor actividad biológica generando una microestructura transicional laminar-biodisturbada. Por el contrario en el *Argiudol* (*Monte Buey*) es llamativa la importante actividad biológica en las dos situaciones de cultivo, pero con diferencia claras entre ellas. Así en BP la actividad de la fauna expresada por la presencia de excrementos y canales es muy intensa, generando una alta porosidad y una organización muy similar a la del AN por lo que en el modelo microestructural de BP se la ha considerado también de tipo bioconstruido. En el caso de MP la incidencia del tránsito en la estructura es mayor; esto se refleja en el desarrollo de estructuras laminares muy particulares que resultan del empaquetamiento de excrementos y que se caracterizan por presentar pequeñas fisuras onduladas. En este caso el modelo microestructural sería transicional entre biodisturbado y laminar. En el *Argiudol* (*Pergamino*) el tratamiento BP muestra una importante actividad biológica

reflejada en la abundancia de excrementos, pero al mismo tiempo estos se encuentran compactados generando agregados microlaminares con fisuras onduladas; el modelo microestructural aquí es transicional laminar-biodisturbado y por lo tanto –como se puede constatar comparando las figuras 4.11d, e y las figuras 4.11c, d muy similar al tratamiento MP del Argiudol (Monte Buey). Finalmente el *Hapludert* presenta una microestructura diferente a los suelos anteriores consecuencia de su composición textural y mineralógica; aquí las unidades estructurales dominantes son los pequeños bloques subangulares en parte derivados de excrementos coalescentes, que en el caso del tratamiento MP generan un modelo biodisturbado.

4.5 Conclusiones

Los resultados obtenidos revelan la importancia del análisis de la microestructura para poner de manifiesto algunos procesos claves en la condición física y estructural como la estratificación de la materia orgánica, la laminación y la compactación del horizonte superficial del suelo en SD que sería el resultado de la compresión vertical de la maquinaria. Este efecto en muchos casos fue contrarrestado por la actividad vegetal a través de la abundancia y arquitectura de las raíces y de la fauna a través de la formación de bioporos, la mezcla de material y la formación de microagregados.

Así de forma muy clara, la micromorfología evidencia esta tensión de las fuerzas contrapuestas que conlleva la intensificación agrícola, en donde su resultado depende también del tipo de suelo analizado. También se puso en evidencia que distintos modelos microestructurales pueden actuar en distancias muy cortas (micrones a centímetros) y a la vez superarse, lo cual explicaría las divergencias físicas y estructurales de estudios realizados bajo SD.

Sección C- Estabilidad estructural del suelo

4.1 Introducción

Actualmente en la Argentina la mayor parte de los cultivos agrícolas extensivos se efectúan bajo el sistema de siembra directa (SD). Más de 25 millones de hectáreas de las cuales la mayor parte es soja (15 millones) y casi la mitad de los cereales son producidos utilizando SD (Wall, 2011). Desafortunadamente, la expansión del uso de la SD en la región pampeana, no siempre ha sido implementada en conjunto con otras recomendaciones relacionadas a la noción de agricultura conservacionista especialmente en términos de rotaciones y fertilización (Austin et al., 2006).

Así, diversas entidades como AAPRESID (Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa), reconocen la importancia de acoplar la labranza mínima con un esquema equilibrado de rotaciones y fertilizaciones a fin de conservar el suelo y sus funciones a lo largo del tiempo. Por ello, en los últimos años, surgió la necesidad de certificar el proceso productivo a fin de promover buenas prácticas agrícolas en la Argentina. Uno de estos esfuerzos está siendo realizado por AAPRESID en conjunto con el proyecto BIOSPAS (Wall, 2011) en donde se está evaluando la calidad física, química y biológica de los suelos en campos particulares de producción los cuales responden o no a los criterios definidos por el Programa de Certificación de Buenas Prácticas (<http://www.aapresid.org.ar/ac/buenas-practicas-agricolas/>, last visited August 11, 2013). De esta forma, se podrán evaluar la calidad de los suelos en relación de las prácticas implementadas.

El manejo sustentable de las tierras necesita poder anticipar los efectos de su uso a través de indicadores confiables (Echeverría et al., 2012) que puedan ser utilizados en un amplio rango de suelos. Cuando estos indicadores asumen valores óptimos, el desarrollo de los cultivos agrícolas tiende a ser máximo, al mismo tiempo que la degradación del ambiente y del suelo es mínima (Reynolds et al., 2009). La estabilidad estructural de agregados (EE) ha sido considerada por diferentes autores como una de las propiedades más sensibles al uso y manejo del suelo (Kay, 1990; Perfect et al., 1990; Bonel et al., 2005; Sanzano et al., 2005; Echeverría et al., 2012). Así, los sistemas de labranza tienen un rol crucial en el desarrollo y mantenimiento de la estructura (Carter et al., 1994). Por consiguiente, la EE puede afectar la producción del cultivo, ya que afecta el desarrollo normal de las raíces, la cantidad de agua que puede estar disponible en el suelo, el movimiento de aire y agua, y la fauna del suelo (Hermawan y Cameron, 1993).

Gran parte de los estudios recientes utilizaron con éxito la metodología de De Leenheer y De Boodt para la evaluación de la EE para diferenciar tratamientos agrícolas (Campitelli et al., 2010; Chagas et al., 1994). Este método, si bien resulta adecuado para la comparación entre manejos en un mismo suelo, no discrimina los distintos mecanismos de desagregación de la estructura del suelo. Por otro lado, también debido a la multiplicidad de metodologías utilizadas para la evaluación de la EE, continúa siendo difícil la comparación por la falta de protocolos homologados y normalizados (Gabioud et al. 2011). La metodología propuesta por Le Bissonnais (1996) aísla los distintos mecanismos de desagregación posibilitando un mejor entendimiento del proceso y permite la expresión de diferentes respuestas en sus tests de acuerdo al tipo de suelo. Además, a partir del año 2013, la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS) ha comenzado un trabajo de normalización y estandarización de procedimientos analíticos donde se propone la metodología de Le Bissonnais (1996) para la

determinación de la EE. En suelos limosos diversos autores señalan la importancia del pre-tratamiento de humedecimiento rápido que evalúa el estallido por compresión de aire dentro del agregado. En suelos franco arenosos de la región pampeana, Varela et al. (2010) utilizando esta metodología y principalmente este test pudieron distinguir el efecto de diferentes sistemas de manejo de cultivos de cobertura. Trabajos de Lado et al. (2004) y Vermang (2012), destacan que el humedecimiento rápido y posterior estallido de los agregados son función de la humedad inicial de los mismos. Por ello, se hipotetiza en esta tesis, que manejos agrícolas que aumenten la humedad del suelo son más estables debido a la disminución de la rotura de agregados debido al estallido (test humedecimiento rápido). Esto es factible que suceda principalmente en suelos limosos donde la formación y estabilización de la estructura es particularmente débil debido a su granulometría (Alvarez et al., 2009; Wischmeier et al., 1971)

La calidad del suelo y la utilidad de los indicadores relacionados a dicha calidad pueden hallarse afectados tanto con las características propias de los suelos, como con el estado de los mismos derivado de su historia de manejo. Por ello para cada indicador es necesario evaluar si su comportamiento se correlaciona con los factores intrínsecos del suelo o a las prácticas de manejo. Por ejemplo, diferentes mineralogías de arcillas, contenido de Ca, Fe y MO pueden afectar la EE de diferente forma en cada tipo de suelo (Le Bissonnais, 1996, Cañasveras et al. 2009, Igwe et al. (1999). En relación al carbono, cobra importancia la fracción carbonada que se determine, ya que si bien el COT puede afectar la EE, fracciones más lábiles pueden estar más relacionadas a la dinámica de esa EE (Capriel et al., 1990; Albrecht et al., 1992; Le Bissonnais, 1996). De esta forma, al considerar tanto los factores intrínsecos del suelo como los factores de manejo se podrá obtener un indicador más consistente para ambientes diferentes.

Si bien muchos autores en el mundo señalan a la estabilidad de agregados como un excelente indicador, todavía existen muy pocos trabajos que evalúen la estabilidad de agregados con distintas secuencias de cultivos bajo siembra directa en la región pampeana. Más raros son aún los trabajos que intenten explicar el mecanismo de agregación involucrado en suelos de textura y mineralogía contrastantes de esta región.

Así, el objetivo de esta sección será el de evaluar la estabilidad estructural de distintos manejos con diferente intensificación agrícola y evaluar su relación con los factores inherentes y dinámicos de los suelos.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Determinación de la estabilidad estructural del suelo

Para evaluar la EE se seleccionó la metodología propuesta por Le Bissonnais (1996) ya que no solo proporciona una evaluación global de la estabilidad de agregados sino que también permite distinguir los distintos mecanismos de agregación de la estructura considerando su formación y su estabilidad en distintos tipos de suelo. Para ello, 3 monolitos superficiales sin disturbar (0-15 cm) fueron tomados de cada subsitio para totalizar 9 muestras por cada combinación suelo/tratamiento. Dichos monolitos fueron desagregados manualmente por sus planos de debilidad cuando se encontraban con una humedad cercana a capacidad de campo. Luego se obtuvieron por tamizado en seco (a temperatura ambiente) agregados de 3-5 mm en donde las muestras del mismo subsitio fueron homogeneizadas para obtener finalmente 3 muestras para cada combinación suelo/tratamiento. Las muestras fueron luego secadas en estufa (40 °C) y se analizaron por triplicado cada uno de los tres tests evaluados utilizando entre 5 y 6 gramos por muestra. Se efectuaron tres tests: a) humedecimiento rápido en agua

destilada (DMP_{rap}); b) agitación en agua destilada de las muestras previamente sumergidas en etanol (DMP_{ag}) y c) humedecimiento lento por capilaridad (DMP_{cap}). En este último, los agregados fueron colocados sobre una esponja sometida a una columna de agua de 5 cm.

Luego del tamizado en alcohol de los agregados de cada tratamiento en un agitador de Feodorof, los mismos fueron secados a 40°C por 48h y tamizados en una columna de tamices para obtener la distribución de agregados en seco para los tamaños: >2000 μm , 2000-1000 μm , 1000-500 μm , 500-200 μm , 200-100 μm y 100-50 μm . La fracción <50 μm se calculó mediante la diferencia entre los tamaños mencionados y el peso inicial de agregados. Luego se calculó el diámetro medio ponderado (DMP) según la siguiente fórmula (1). Más detalles pueden ser encontrados en Le Bissonnais (1996).

$$(1) \sum [\text{Diámetro medio entre dos tamices mm}] * \% \text{ de partículas retenidas sobre el tamiz} / 100$$

Este diámetro medio ponderado fue calculado para todos los tests y para el promedio de los tests ($DMP_{rap,ag,cap}$). Las clases de estabilidad estructural fueron descritas de acuerdo a Le Bissonnais, (1996), donde: $DMP < 0,4$ = Muy inestable; $0,4 - 0,8$ = Inestable; $0,8 - 1,3$ = Media; $1,3 - 2,0$ = Estable y $> 2,0$ = Muy estable.

4.2.2 Análisis estadísticos

Dos acercamientos estadísticos fueron utilizados para evaluar el efecto de los tratamientos de manejo en la EE. En primer lugar se estimó un modelo lineal mixto de la influencia de los tratamientos (tres niveles: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) como un efecto fijo (promedio) y el suelo y sub-sitio de muestreo como efecto aleatorio. También se modelizó el efecto del tratamiento de manejo en la heterostacididad de la varianza. Además se calculó el criterio de información de calidad del modelo Akaike (AIC) para diferenciar los modelos para cada test de EE. Ninguna variable utilizada en este modelo debió ser transformada (Shapiro Wilkis, $p < 0,05$). Este modelo fue estimado mediante la función lmer del paquete lme4 (Bates et al., 2011) en el programa R (R, Development Core Team, 2011). Como segundo acercamiento se utilizó un modelo simple de ANOVA en donde se analizó el efecto del tratamiento en cada uno de los sitios. Cuando existieron efectos del tratamiento de manejo en ambos modelos se realizó un test LSD ($p < 0,05$).

Por otro lado para evaluar el efecto de las variables de manejo, propiedades del suelo y fracciones de carbono orgánico en la EE se realizaron correlaciones de Pearson. Este procedimiento fue realizado para todo el set de datos y para un set de datos habiendo removido previamente el suelo Hapludert. También se realizaron regresiones lineales para observar el comportamiento de forma más detallada de algunas variables seleccionadas y algunos tests de EE. Para discriminar la proporción de varianza de cada test de EE atribuible a los tratamientos de manejo y a los tipos de suelos se realizó un análisis de componentes de varianza (programa R). También para determinar el grado de vinculación de dichos tests y los suelos se realizaron correlaciones de Pearson con los componentes principales del suelo del capítulo 2 (CP1_suelo, CP2_suelo).

4.3 Resultados

4.3.1 Efecto de los tratamientos de manejo sobre la estabilidad estructural

A partir del desarrollo de un modelo mixto, en donde los sitios y bloques fueron considerados como variables aleatorias, se pudo observar un efecto significativo de los tratamientos de manejo para todos los tests de EE con valores de $p < 0,0001$ para todos ellos con excepción del DMP_{ag} ($p = 0,009$). Este modelo mixto fue ajustado con una función para controlar la heterogeneidad de varianzas ya que el AN mostró una dispersión de datos mayores con respecto a los tratamientos agrícolas (datos no mostrados). Como se observa en la Figura 4.13, la tendencia de la disminución del DMP desde el AN hacia MP es muy clara. Mientras que el AN se diferencia significativamente de los tratamientos agrícolas en todos los tests, BP sólo lo hace en DMP_{rap} y DMP_{cap} . El promedio de las distintos tests ($DMP_{rap,ag,cap}$) también mostró diferencias entre los dos tratamientos agrícolas ($p < 0,0001$). Por otro lado, si bien tanto DMP_{rap} , DMP_{cap} como $DMP_{rap,ag,cap}$ separaron ambos tratamientos agrícolas, el DMP_{rap} presentó un AIC de 25, mientras que DMP_{cap} y $DMP_{rap,ag,cap}$ presentaron valores 56,7 y 45,4 respectivamente, presentado esta primera variable una mayor potencia de diferenciación de los tratamientos. En cuanto al valor del DMP, el test que presentó los valores más bajos fue el DMP_{rap} mientras que el DMP_{ag} fue el que produjo una rotura menor de los agregados.

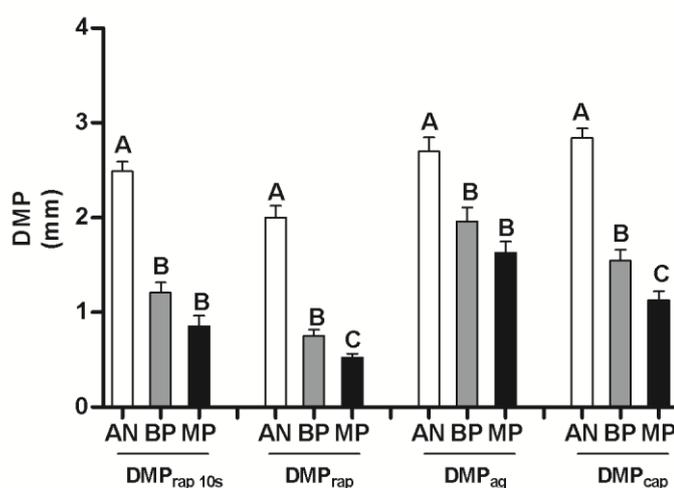


Figura 4.13 Estabilidad estructural (diámetro medio ponderado - DMP) para el modelo mixto (variable aleatoria bloque y tipo de suelo) según la metodología de Le Bissonnais (1996) para los tests: humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap\ 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}) y humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}), para los tratamientos de manejo: Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP), Malas prácticas (MP). Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$).

Tabla 4.4 Componentes de varianza y correlación (Pearson) de los componentes principales del suelo (CP1_suelo, CP2_suelo) para los tests de estabilidad estructural: humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap\ 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}), humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}) y promedio de DMP_{rap} , DMP_{ag} y DMP_{cap} ($DMP_{rap,ag,cap}$).

Tests <i>Estabilidad estructural</i>	Componente de Varianza (%)							
	Trat. de manejo		Tipo de suelo		Residual		CP1_suelo	CP2_suelo
	Todos los suelos	sin Hapludert	Todos los suelos	sin Hapludert	Todos los suelos	sin Hapludert		
$DMP_{rap\ 10s}$	73,6	56,0	3,2	22,4	23,3	21,6	-0,05	-0,17
DMP_{rap}	65,7	43,8	15,7	39,6	24,4	16,6	-0,03	-0,27
DMP_{ag}	42,0	28,3	41,1	56,5	16,9	15,2	0,05	0,57 **
DMP_{cap}	56,3	48,4	24,4	32,8	19,3	18,7	-0,05	-0,05
$DMP_{rap,ag,cap}$	80,9	70,1	0,0	0,0	19,1	29,9	-0,01	-0,10

Como se observa en la Tabla 4.4, el test que reunió la mayor componente de varianza para el tratamiento de manejo fue el $DMP_{rap\ 10s}$ seguido por el DMP_{rap} . El DMP_{ag} fue el test que presentó una mayor componente de varianza debido al tipo de suelo. Por otro lado, el DMP_{cap} si bien presentó una componente de variancia del tratamiento menor que $DMP_{(rap\ 10s)}$ y DMP_{rap} fue el test que menor residual mostró. Cuando se removió el set de datos del suelo Hapludert, el componente de varianza del tratamiento, así como el residual disminuyeron sensiblemente mientras que el componente que describe el suelo aumentó de forma considerable, indicando un comportamiento diferencial en el suelo Hapludert. Sin embargo, el ordenamiento de los tests en cuanto a la proporción de varianza que explicaban se mantuvo constante.

Cuando se consideró el promedio de los test, la componente de varianza del tratamiento de manejo presentó valores muy altos (80,9%) con una componente de varianza de 0 para el factor suelo (Tabla 4.4). Estos resultados fueron apoyados también por las bajas correlaciones de los tests con los componentes principales del suelo, mientras que únicamente DMP_{ag} se correlacionó significativamente con CP2_suelo.

Como se esperaba, para todos los suelos en conjunto, el $DMP_{rap\ 10s}$ presentó una alta correlación con el DMP_{rap} , y también lo hizo con el $DMP_{rap,ag,cap}$ (Tabla 4.5). Por su parte, el DMP_{ag} presentó los menores coeficientes de correlación con respecto a los otros tests.

Cuando se analizó la EE por tipo de suelo, se pudo observar también, que el AN se diferenció estadísticamente de los tratamientos agrícolas ($p < 0,05$) (Tabla 4.5) y como tendencia general, BP presentó valores superiores a MP pero no siempre con diferencias significativas. Mientras que para el Argiudol (Monte Buey), la diferenciación de BP y MP fue clara, no existieron diferencias significativas entre ellos para el Argiudol (Pergamino). En cuanto al Haplustol, la diferencia estadística entre los mismos varió según el test, lográndose diferenciar BP de MP en los tests DMP_{rap} y DMP_{cap} . Por último, para el suelo Hapludert no se encontraron diferencias entre BP y MP (Tabla 4.5).

Según el criterio presentado por Le Bissonnais (1996), los tres ambientes naturales correspondientes a los Molisoles fueron clasificados como muy estables, mientras que el suelo Hapludert se clasificó como estable. La clasificación de la EE para BP dependió del tipo de suelo, siendo muy estable para el Argiudol (Monte Buey),

estable para el Haplustol y media para el resto de los suelos. En cuanto a las MP, para todos los tipos de suelo se encontró una estabilidad media.

Tabla 4.5 Estabilidad estructural según la metodología Le Bissonnais, (1996) para los suelos Haplustol, Argiudol (Monte Buey), Argiudol (Pergamino) y Hapludert para los tratamientos Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP), Malas prácticas (MP) considerando los tests: humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap\ 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}), humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}) y para el promedio de DMP_{rap} , DMP_{ag} y DMP_{cap} ($DMP_{rap,ag,cap}$). Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$).

Tipo de suelo	Trat. de manejo	$DMP_{rap\ 10s}$	DMP_{rap}	DMP_{ag}	DMP_{cap}	$DMP_{rap,ag,cap}$	Tipo de Estabilidad (Le Bissonnais, 1996)
Haplustol	AN	2,83 0,09 a	2,55 0,10 a	2,19 0,15 a	3,05 0,03 a	2,59 0,1 a	Muy estable
	BP	1,54 0,11 b	1,02 0,04 b	1,27 0,25 b	2,01 0,13 a	1,43 0,03 b	Estable
	MP	1,39 0,12 b	0,62 0,06 c	1,18 0,22 b	1,75 0,19 b	1,18 0,1 b	Media
Argiudol (Monte Buey)	AN	2,30 0,13 a	1,41 0,09 a	3,15 0,13 a	3,09 0,11 a	2,55 0,11 a	Muy estable
	BP	1,59 0,27 a	0,76 0,1 b	2,96 0,09 a	2,35 0,15 b	2,02 0,11 b	Muy estable
	MP	0,37 0,04 b	0,33 0,03 c	1,62 0,04 b	1,03 0,15 c	0,99 0,07 c	Media
Argiudol (Pergamino)	AN	2,71 0,15 a	2,00 0,18 a	3,16 0,06 a	2,92 0,15 a	2,70 0,12 a	Muy estable
	BP	0,73 0,02 b	0,50 0,03 b	1,97 0,1 b	1,02 0,08 b	1,16 0,04 b	Media
	MP	0,48 0,09 b	0,38 0,09 b	1,89 0,16 b	0,70 0,17 b	0,99 0,11 b	Media
Hapludert	AN	1,91 0,16 a	1,45 0,13 a	1,29 0,22 a	2,39 0,13 a	1,71 0,06 a	Estable
	BP	0,98 0,05 b	0,82 0,06 b	1,65 0,02 a	1,21 0,02 b	1,23 0,02 b	Media
	MP	1,30 0,22 ab	0,83 0,1 b	1,87 0,23 a	1,39 0,2 b	1,36 0,18 ab	Media

Tabla 4.6 Correlaciones (Pearson) entre las variables de estabilidad estructural, humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap\ 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}), humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}) y para el promedio de DMP_{rap} , DMP_{ag} y DMP_{cap} ($DMP_{rap,ag,cap}$) y a) variables de manejo, b) propiedades físicas y químicas y c) distintas fracciones de carbono orgánico. Se presentan las correlaciones para todos los suelos y para todos los suelos sin el suelo Hapludert -sin Hapludert-. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

CPI_manejo, Índice de intensificación de cultivo -ISI-, Índice de intensificación de cultivo para los manejos agrícolas - ISI_{agr} -, Años bajo siembra directa -años bajo SD-, Relación de años con soja sobre la cantidad total de cultivos -Soja/Cultivos-, Relación de años con soja sobre maíz -Soja/Maíz-, Relación de años con maíz sobre la cantidad total de cultivos -Maíz/Cultivos- y soja como único cultivo -Soja único cultivo-, (conductividad eléctrica -CE-, capacidad de intercambio catiónico -CIC-, porcentaje de sodio intercambiable -PSI-, saturación de bases -SB-, humedad equivalente -HE-, límite plástico -Lp-, límite líquido -Ll-, índice de plasticidad -Ip-, actividad de arcillas AA-, esmectitas más interestratificados illita-esmectita -E+E/I-)(carbono orgánico total -COT-, Carbono orgánico particulado grueso -COP_g-, carbono orgánico particulado fino -COP_f-, carbono orgánico mineralizable -COM-, hidratos de carbono total -CH_t- y hidratos de carbono soluble -CH_s-).

	$DMP_{rap\ 10s}$		DMP_{rap}		DMP_{ag}		DMP_{cap}		$DMP_{rap,ag,cap}$		
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert							
<i>a) Variables de manejo</i>											
CPI_manejo	-0,62 **	-0,67 **	-0,63 ***	-0,65 **	-0,42 *	-0,47 *	-0,69 ***	-0,76 ***	-0,77 ***	-0,83 ***	
ISI	0,87 ***	0,93 ***	0,87 ***	0,91 ***	0,43 **	0,64 ***	0,89 ***	0,92 ***	0,86 ***	0,94 ***	
ISI_{agr}	0,65 ***	0,78 **	0,71 ***	0,84 ***	0,13	0,17	0,73 ***	0,81 ***	0,64 ***	0,74 **	
Años bajo SD	0,49 *	0,62 **	ns	0,48 *	0,57 **	0,64 ***	0,72 ***	0,78 ***	0,79 ***	0,90 ***	
Soja/Cultivos	-0,67 ***	-0,73 ***	-0,68 ***	-0,71 ***	ns	ns	-0,71 ***	-0,79 ***	-0,71 ***	-0,78 ***	
Soja/Maíz	-0,42 *	ns	-0,47 *	ns	-0,55 **	-0,66 **	-0,38	-0,51 *	-0,63 **	-0,74 ***	
Maíz/Cultivos	ns	ns	0,47 *	ns	0,49 *	0,56 *	0,34	0,44	0,57 **	0,64 **	
Soja único cultivo	-0,67 ***	-0,74 ***	-0,64 ***	-0,72 ***	ns	ns	-0,75 ***	-0,80 ***	-0,74 ***	-0,80 ***	

	DMP _{rap 10s}		DMP _{rap}		DMP _{ag}		DMP _{cap}		DMP _{rap,ag,cap}	
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert
b) Propiedades del suelo										
Arcilla	ns	ns	ns	ns	ns	0,59 **	ns	ns	ns	ns
Limo	ns	ns	ns	ns	0,42 *	0,52 **	ns	ns	ns	ns
Arena	ns	ns	ns	ns	ns	-0,56 **	ns	ns	ns	ns
CE	ns	ns	ns	ns	ns	0,46 *	ns	0,43 *	ns	0,38 *
pH	ns	ns	ns	ns	-0,34 *	ns	ns	ns	ns	ns
Ca ⁺²	ns	ns	ns	-0,39 *	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PSI	ns	ns	0,38 *	0,41 *	-0,34 *	-0,47 *	ns	ns	ns	ns
CIC	ns	ns	ns	ns	ns	0,65 ***	ns	ns	ns	ns
HE	ns	ns	ns	0,36 *	ns	0,67 ***	ns	0,40 *	ns	0,54 **
Dp	0,49 **	0,59 **	0,47 **	0,57 **	ns	ns	0,42 *	0,52 **	0,39 *	0,44 *
Lp	ns	ns	ns	ns	ns	0,76 ***	ns	ns	ns	0,43 *
LI	ns	ns	ns	ns	ns	0,86 ***	ns	ns	ns	0,54 **
Ip	ns	ns	ns	ns	ns	0,72 ***	ns	ns	ns	0,51 **
AA	0,43 **	0,65 ***	0,4 *	0,55 **	ns	ns	ns	0,55 **	ns	0,52 **
E+I/E	ns	ns	ns	ns	-0,43 ***	ns	ns	ns	ns	ns
c) Fracciones de carbono orgánico										
COT	ns	0,51 **	0,38 *	ns	ns	0,74 ***	ns	0,52 **	ns	0,59 **
COP _g	0,61 ***	0,71 ***	0,66 ***	0,66 ***	ns	0,57 **	0,65 ***	0,79 ***	0,6 *	0,75 ***
COP _f	0,46 **	0,65 ***	0,56 **	0,65 ***	ns	ns	0,49 **	0,72 ***	0,43 ***	0,64 ***
COM	ns	ns	ns	ns	ns	0,65 ***	ns	ns	ns	0,38 *
CH _i	0,38 *	0,51 **	ns	ns	0,76 ***	0,78 ***	0,37 *	0,55 **	ns	0,60 **
CH _s	0,63 ***	0,63 ***	0,49 **	0,55 **	0,57 ***	0,53 **	0,54 ***	0,56 **	0,6 ***	0,60 **

4.3.2 Correlaciones entre la estabilidad estructural y las variables de manejo y fracciones de carbono orgánico.

4.3.2.1 Variables de Manejo

Todos los tests, así como, el promedio de EE presentaron numerosas correlaciones con las variables de manejo con coeficientes de hasta 0,92 (Tabla 4.6a). Entre los tests, de forma general DMP_{ag} fue la variable que presentó menores correlaciones. Por otro lado, cuando no se consideró al suelo Hapludert casi la totalidad de los coeficientes aumentaron entre 5 y 30%. La variable de manejo que presentó los coeficientes más altos fue el ISI, mientras que Maíz/Cultivos presentó los menores coeficientes. Se debe destacar que el manejo general de los lotes identificado con CPI_{manejo} se correlacionó negativamente con todas las variables de EE con excepción de DMP_{ag} , mientras que el ISI_{agr} que identifica solamente las distintas intensidades de cultivo entre los tratamientos agrícolas también produjo numerosas correlaciones significativas y positivas. El número de años bajo SD presentó una correlación positiva en todos los tests de EE, mientras que la preponderancia de soja en la rotación se correlacionó de forma negativa (Figura 4.6a). Las variables donde se incluyó al maíz presentaron correlaciones positivas, aunque no siempre significativas.

En particular para la $DMP_{rap\ 10s}$ y DMP_{rap} los coeficientes fueron muy parecidos, seguramente debido a la alta correlación entre las variables (Tabla A.7) encontrándose coeficientes ligeramente más altos para DMP_{rap} . Por otro lado, el DMP_{cap} presentó coeficientes muy parecidos a $DMP_{rap\ 10s}$ y DMP_{rap} pero con valores un poco más altos. Por último, el promedio de $DMP_{rap,ag,cap}$ presentó también valores muy altos, correlacionándose significativamente con todas las variables de manejo.

Cuando se analizaron en detalle estas correlaciones generales, se pudo advertir que las variables de manejo presentaron comportamientos diferenciales según se incluyera o no el suelo Hapludert. Para determinar la magnitud de este efecto, se realizaron regresiones lineales para cada tipo de suelo. Para todas las regresiones, fue posible agrupar los Molisoles (Haplustol y Argiudoles) para su análisis. En la Figura 4.14a, b, c y d, se presentan algunos ejemplos de cómo el suelo Hapludert presentó tendencias diferentes en comparación con los demás suelos evaluados. En la misma Figura se observa que, generalmente, las correlaciones de los Molisoles presentaron pendientes con signo contrario a las presentadas por el Vertisol (Figura 4.14a, b, d). Por su parte, para la variable ISI, las tendencias fueron similares, aunque la pendiente del Hapludert fue menor y con un menor coeficiente de determinación (Figura 4.14c).

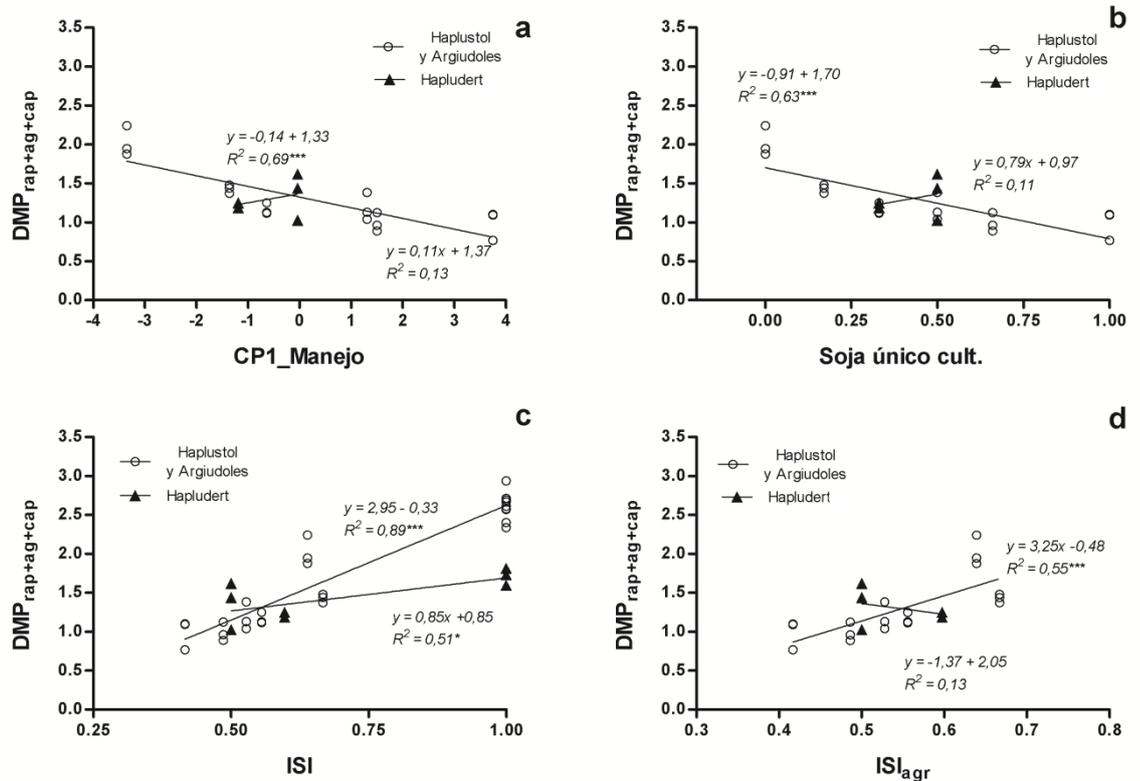


Figura 4.14 Regresiones lineales entre el diámetro medio ponderado promedio de los tests: humedecimiento rápido, agitado y humedecimiento por capilaridad ($DMP_{rap,ag,cap}$) y a) CP1_manejo, b) Soja como único cultivos (Soja único cult.), c) Índice de intensificación del cultivo (ISI) y d) Índice de intensificación de cultivos agrícolas (ISI_{agr}). * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

4.3.2.2 Fracciones de carbono orgánico

La fracción de COP_g fue la que presentó, en promedio, las correlaciones más altas con los tests de EE, mientras que COM presentó las menores. Con relación al test, DMP_{ag} presentó los coeficientes más altos principalmente para el COT, CH_t y COT. Por otro lado, si bien las correlaciones fueron muy parecidas entre $DMP_{rap\ 10s}$ y DMP_{rap} , esta primer variable presentó coeficientes superiores para COP_g , CH_s y CH_t , siendo esta última fracción no significativa para DMP_{rap} . Cuando se analizan estas correlaciones según el tipo de suelo, se observa un comportamiento diferencial para el efecto de las fracciones carbonadas y la EE. A modo de ejemplo, la Figura 4.15, presenta regresiones lineales entre el $DMP_{rap,ag,cap}$ y el COT, COP y CHs. En la Figura 4.15a, se observa un efecto positivo entre el COT para el suelo Haplustol y los Argiudoles, mostrando este primer suelo una sensibilidad mayor al aumento de COT (pendiente mayor). Por su parte, los Argiudoles presentan una relación lineal hasta valores cercanos a 2,5% de COT, donde aumentos en esta fracción, no modifica el valor de estabilidad. Por otro lado, si bien el suelo Hapludert presentó los mayores contenido de COT, los valores de $DMP_{rap,ag,cap}$ fueron bajos, no encontrándose ningún efecto sobre la estabilidad.

Para el COP_g , el Haplustol y los Argiudoles presentaron un comportamiento idéntico, por lo que fue posible analizarlos en conjunto, encontrando un coeficiente de determinación alto y con una alta significancia (Figura 3.15b). De la misma forma que con el COT, el COP_g no se correlacionó con el $DMP_{rap,ag,cap}$.

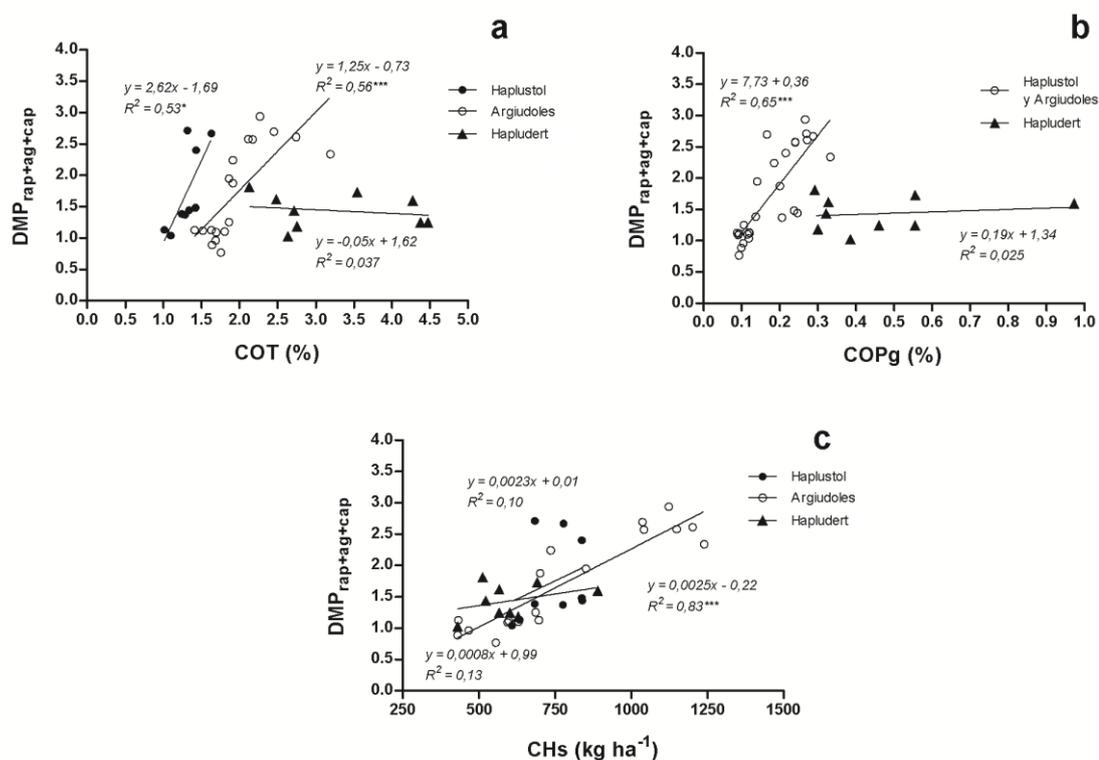


Figura 4.15 Regresiones lineales entre el diámetro medio ponderado promedio de los tests humedecimiento rápido, agitado y humedecimiento por capilaridad ($DMP_{rap,ag,cap}$) y a) carbono orgánico total (COT), b) carbono orgánico particulado grueso (COP_g) y c) carbohidratos solubles (CH_s). * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Por último, el CH_t presentó una fuerte relación con la estabilidad, principalmente en los Argiudoles, mientras que el Haplustol, si bien presenta una tendencia positiva, la regresión no resultó significativa. Todos las correlaciones con el CO fueron entre un 5 y 30% mayores cuando se removió el Hapludert del análisis, no encontrándose coeficientes altos para este suelo e ningún caso.

4.3.2.3 Propiedades de suelo

Los componentes principales del suelo (CP1_suelo y CP2_suelo) y el componente de varianza atribuible al suelo, que explican el efecto composicional de los suelos, no presentaron efectos muy fuertes con los distintos tests (Tabla 4.6b). No obstante, existieron algunas correlaciones significativas, principalmente con DMP_{ag} . Principalmente el contenido de arcilla y la CIC se correlacionaron positivamente, mientras que el contenido de arena lo hizo negativamente. También, en este caso para todos los tests, la Actividad Arcilla se correlacionó de forma significativa y con

tendencia positiva. Muchas variables como el LL, no presentaron correlaciones fuertes debido a un fuerte efecto del tipo de suelo. Si se analizan estas dos últimas variables por tipo de suelo se puede observar un comportamiento diferencial entre los Molisoles y el Vertisol (Figura 4.16a y 4.16b) con relación a los tests de EE. Por ejemplo, para $DMP_{rap,ag,cap}$ existe una tendencia de aumento de su magnitud para el Haplustol y los Argiudoles a medida que aumenta la actividad de arcillas y LL, mientras que para el Hapludert, no se detectó ningún efecto de estas variables reológicas.

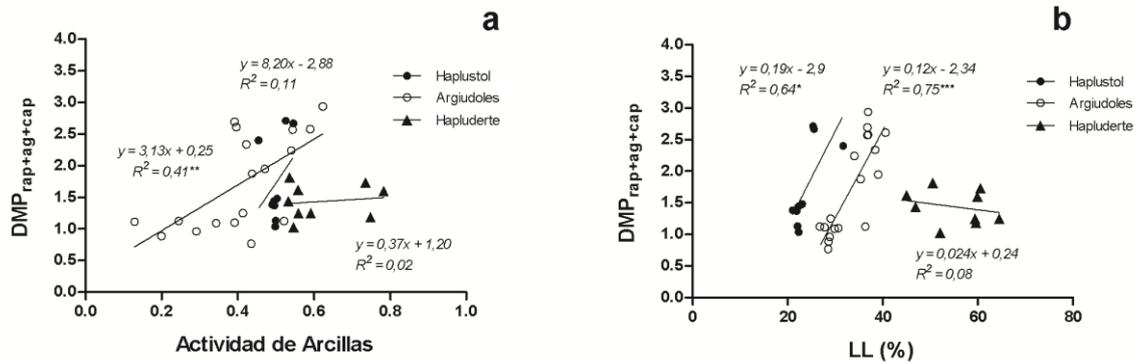


Figura 4.16 Regresiones lineales entre el diámetro medio ponderado (DMP) promedio de los tests humedecimiento rápido, agitado y humedecimiento por capilaridad ($DMP_{rap,ag,cap}$) y a) actividad de arcillas (AA) y b) límite líquido (LL). $p < 0,05^*$; $p < 0,01^{**}$; $p < 0,001^{***}$.

4.3.3 Humedad edáfica y estabilidad estructural

La humedad edáfica (θ grav.) en el momento de muestreo afectó la EE principalmente en los Argiudoles, en donde los tests de humectaciones rápidas (DMP_{rap} 10s y DMP_{rap}) mostraron coeficientes de determinación más altos (Figura 4.17a y b). En los Argiudoles, a medida que el suelo presentó una mayor humedad edáfica los valores de estabilidad para dichos tests también fueron más altos. Por su parte, en el Haplustol y en el Hapludert no existieron asociaciones significativas. Además, el Hapludert presentó en el test DMP_{ag} , una correlación negativa con la humedad edáfica (Figura 4.17c).

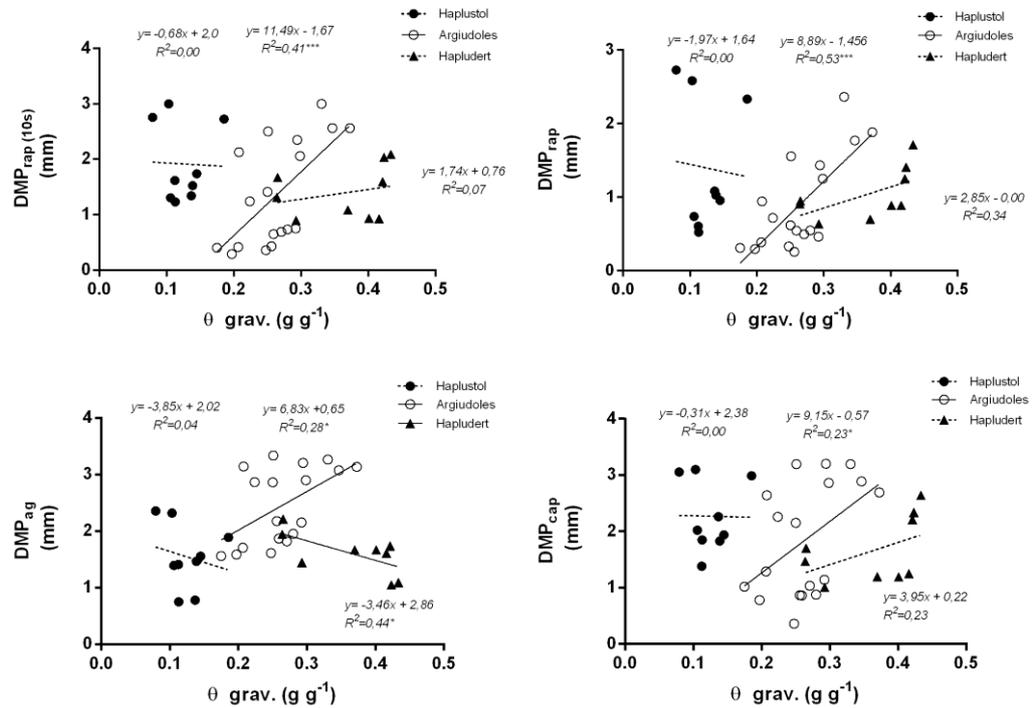


Figura 4.17 Regresiones lineales entre la humedad gravimétrica (θ grav.) medida a campo y los diferentes tests de estabilidad estructural. a) humedecimiento rápido 10 s ($\text{DMP}_{\text{rap}}(10\text{s})$); b) humedecimiento rápido (DMP_{rap}), c) agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}); d) humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}). Líneas punteadas indica regresiones no significativas. $p < 0,05^*$; $p < 0,01^{**}$; $p < 0,001^{***}$.

4.4 Discusión

4.4.1 Uso de diferentes tests de estabilidad estructural para la discriminación de los tratamientos de manejo.

Los diámetros medios ponderados promedios de los tres tests ($DMP_{rap,ag,cap}$) encontrados en esta tesis se encontraron en el rango de 2,74 - 0,99 mm correspondiendo sus extremos al AN del Haplustol y al MP del Argiudol (Monte Buey) respectivamente. Resultados muy similares fueron encontrados en la Argentina para tres órdenes de suelos (Molisol, Vertisol y Alfisol) con rangos de 2,77 y 0,92 mm (Gabiud et al., 2011) y en Francia para 12 suelos limosos (Le Bissonnais, 1996). Para suelos arenosos, Taboada-Castro et al. (2011) encontraron valores entre 2,23 a 0,77 mm. Dichos resultados, brindan elementos para la elaboración de futuros umbrales de EE para los Molisoles y Vertisoles. También los valores del AN para $DMP_{rap,ag,cap}$ se asemejaron a los encontrados por Gabiud et al. (2011), no obstante estos autores encontraron mayores valores en el Vertisol (2,77) en comparación con el Molisol (2,21), mientras que en esta tesis los resultados fueron opuestos (2,55 y 2,45 para Molisoles vs 2,33 para el Vertisol).

Los tests utilizados para describir la EE presentaron valores diferentes para las situaciones evaluadas. De forma general, los tests que más afectaron la estabilidad de los agregados fueron en orden decreciente DMP_{rap} (1,1 mm) < $DMP_{rap 10 s}$ (1,5 mm) < DMP_{cap} (1,7 mm) < DMP_{ag} (1,9 mm). Este último test (DMP_{ag}) presentó valores muy diferentes al resto de los test evaluados. Según Le Bissonnais, 1998, el DMP_{ag} evalúa el comportamiento de la cohesión de los agregados. La cohesión de los agregados está muy relacionada con los agentes de unión bióticos de la EE producidos por la actividad microbiana y por agentes intrínsecos del suelo como el contenido de arcilla (Kay y Angers, 2000). En este trabajo, el DMP_{ag} presentó los coeficientes de correlación más altos con las fracciones de carbono orgánico, especialmente con las fracciones más resilientes y la granulometría del suelo (Tabla 4.6).

En el Haplustol, la mayor cantidad de arenas y el menor contenido de CO, resultó en una caída del DMP principalmente para el DMP_{ag} , ya que este tipo de suelo es afectado principalmente por la alteración de su cohesión. Este efecto también fue detectado por el DMP_{rap} , donde el largo período de humectación debilitaría la cohesión del agregado, mientras que el $DMP_{rap 10s}$ y DMP_{cap} fueron los test que menos afectaron el DMP para este suelo, comprobando dicha hipótesis. De la misma forma, Taboada-Castro et al. (2011) encontraron que para suelos arenosos, el mejor test para distinguir entre manejos fue el test de agitación. Por ende, este test, sería aconsejable para suelos poco cohesivos y dependientes del CO para su estructuración ya que el mismo fue el menos agresivo. Similares resultados fueron descriptos por Novelli, et al. (2013) y Le Bissonnais (1996).

Como se mostró en los resultados, los tests de inmersión rápida y capilaridad presentaron una alta agresividad disminuyendo notablemente el DMP de todos los suelos. El hecho de que el comportamiento de estos test resultaran muy parecidos, se debe en parte a la alta fragilidad del material parental del suelo (capítulo 2). Cosentino y Pecorari (2002) pusieron en evidencia en el norte de la Región Pampeana la existencia

de limos de baja densidad como consecuencia de una proporción elevada de biolitos y vidrios volcánicos con alta fragilidad, lo que conferiría al suelo una menor resistencia mecánica a la ruptura y por consiguiente dándole una menor EE.

El test que logró discernir en forma más adecuada los tratamientos de manejo en la mayoría de los casos fue el DMP_{rap} . Cosentino y Chenu (2008) y Le Bissonnais (1996) mencionan la relevancia de este test en suelos limosos (Argiudoles). Del mismo modo, en los Argiudoles aquí estudiados, los test $DMP_{rap 10s}$ y DMP_{rap} presentaron los valores más bajos. También se pudo observar una fuerte correlación entre las fracciones de carbono y el DMP_{rap} y $DMP_{rap 10s}$ evidenciándose en la caída abrupta del DMP en los tratamientos con menor contenido de carbono. En estos suelos limosos, el mayor contenido de MO actuó como agente agregante, impidiendo que ocurra el estallido de los agregados manteniendo la EE de los tratamientos de AN (Oades, 1993; Dexter, 1988). De la misma forma, cuando se analizó el DMP_{ag} para los Argiudoles y el Hapludert, la pre-humectación con etanol anuló el estallido por aire entrampado, y el hinchamiento diferencial (Amézketa, 1999), manteniendo también el DMP más alto.

Como se estableció principalmente en el Hapludert, la evaluación del primer test a 10'' permitió una mejor separación de los tratamientos de manejo (contenidos de CO), aislando de manera más efectiva el fenómeno de estallido. Esto puede deberse a que con 10 minutos de sumersión se siguen destruyendo agregados, pero debido a otros factores (e.g. cohesión) y no al estallido propiamente dicho. Por otro lado, una inmersión rápida podría estar afectando a los poros más grandes de los agregados, los cuales están más fuertemente vinculados con el cambio de manejos agrícolas.

4.4.2 Efecto de los tratamientos de manejo sobre la estabilidad estructural

Los tests de EE según el método de Le Bissonnais (1996) fueron útiles para interpretar las diferencias entre tratamientos de manejo ya que presentaron una alta proporción de varianza correspondiente al mismo y una baja proporción correspondiente al tipo de suelo, además de presentar correlaciones significativas con numerosas variables de manejo que definen AN, BP y MP (Tabla 4.6a). El carácter dinámico y la sensibilidad de la EE para detectar cambios en el manejo ya ha sido reportado por otros trabajos (Carter, 1994; Orellana y Pillatti, 1994; Kay y Angers, 2000; Gabioud et al., 2011) pero todavía son escasos aquellos trabajos que utilizan esta metodología y aún más escasos aquellos que comparan suelos contrastantes. En cuanto al carácter dinámico de la EE, por ejemplo, Aparicio y Costa (1997) al analizar un set de indicadores de suelo, encontraron que la EE fue el mejor indicador para analizar el efecto de los años de cultivos sobre la calidad del suelo.

Las variables de EE que presentaron una proporción de varianza más afín al tratamiento de manejo fueron los test más violentos ($DMP_{rap10s} - DMP_{rap}$). Si bien las tendencias encontradas con la utilización de $DMP_{rap 10s}$ y DMP_{rap} fueron muy similares, y la proporción de varianza de este primer test fue mayor, el análisis de varianza del $DMP_{rap 10s}$ presentó un error estándar mayor al DMP_{rap} , disminuyendo la capacidad para separar los distintos tratamientos, lo que sugeriría la necesidad de un aumento del número de repeticiones para dicho tratamiento.

Estos resultados resaltan la fragilidad al estallido por compresión de aire en los suelos bajo estudio, en donde, una de las principales problemáticas de esta región es la erosión hídrica principalmente debido a lluvias de alta energía cinética especialmente sobre suelos secos. Los tests de humectación rápida (DMP_{rap} y $DMP_{rap\ 10s}$) serían los más apropiados para reflejar el comportamiento de los mismos. También, para los Argiudoles se demostró el efecto de los tratamientos (AN, BP y MP) sobre la EE a diferentes mecanismos, ya que los tratamientos de manejo que propiciaron un mayor contenido hídrico en el suelo, produjeron una disminución de efecto de estallido (alto DMP_{rap} y $DMP_{rap\ 10s}$) (Figura 4.17). Resultados similares fueron encontrados por Lado et al., 2004 y Vermang (2012). Sin embargo, lo mismo no fue encontrado para el Hapludol, debido a una baja y homogénea humedad del suelo en el momento de muestreo y en el Hapludert posiblemente por su mayor contenido de arcilla y una composición mineralógica diferente. Para este último suelo la correlación negativa entre la humedad y el DMP_{ag} podría deberse a la disminución de la cohesión de las arcillas.

En contraposición el DMP_{ag} no se considera tan apropiado en manejos bajo SD ya que el efecto del impacto directo de la lluvia sobre el suelo es disminuido por la acumulación de rastrojo en la superficie (Gabiud et al., 2011), si bien estos manejos, en un plazo temporal más largo pueden afectar la cohesión de los suelos. Así, la elección de este test (DMP_{ag}) como un indicador sensible al manejo podría ser adecuado en suelos muy frágiles (Novelli, et al. 2013, Le Bissonnais, etc).

4.4.3 Efecto de las variables de manejo sobre la estabilidad estructural

En los resultados aquí obtenidos, y como se discutió con anterioridad, existió un efecto del tratamiento de manejo sobre la EE. Esto también se observa en la alta correlación presentada por la variable que describe los tratamientos ($CP1_{manejo}$). Sin embargo, cuando se analiza con más detalle esta relación, discriminando por tipo de suelo, se observa que el Hapludert no responde al mismo comportamiento que los Molisoles. En general, en el Hapludert, para todas las variables de manejo no se encontraron relaciones fuertes con la EE, indicando que los cambios de manejo no se vieron reflejados en cambios en la estructura.

Una de las variables de manejo que resultó más eficaz en la discriminación de los distintos manejos fue el ISI (Tabla 4.6a, Figura 4.14c). Distintos trabajos indican que la intensificación agrícola aumenta los rendimientos y los residuos que son incorporados al suelo (Caviglia y Andrade, 2010). Además, un mayor ISI significa una mayor actividad radical la cual a su vez aumentaría la actividad biológica incrementando los compuestos cementantes y estabilizantes del suelo. Este mismo resultado fue encontrado con anterioridad por Novelli et al. (2013) para Molisoles y Vertisoles. También el ISI_{agr} , se correlacionó significativamente con la EE, indicando la potencialidad de esta variable para separar diferentes manejos agrícolas bajo SD (Figura 4.2b). Esta variable presentó coeficientes de correlación altos y positivos especialmente para DMP_{cap} y para $DMP_{rap,ag,cap}$. Taboada-Castro et al. (2011) y Gabiud et al. (2011) señalan que el uso del test DMP_{cap} sería aconsejable para situaciones con precipitaciones constantes y alta humedad del suelo, situación que se ve incrementada con los años bajo SD. Díaz-Zorita et al. (2006) compararon arado de rejas durante 10

años, SD durante 10 años y pastura de festuca durante 15 años en un Hapludol típico y encontraron que la SD tiende a incrementar el tamaño medio de los agregados al ser tamizados en seco y a reducir su tasa de fragmentación al aplicarse niveles crecientes de energía de ruptura. Los mismos explicaron este comportamiento por la mayor acumulación de materia orgánica que favorece la EE en ausencia de remoción. Numerosos estudios han comparado los efectos de la SD sobre la EE. Así, Ramírez et al. (2006) hallaron, en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada, que la EE fue el parámetro físico más sensible -junto con la conductividad hidráulica-, al sistema de labranza (SD o LC). De la misma forma, Bonel et al. (2005), utilizando la metodología de Henin en un Argiudol típico, encontraron valores más elevados en el tratamiento de SD con respecto a la labranza reducida.

Existió una clara tendencia de aumento del DMP debido a rotaciones más balanceadas (gramíneas y leguminosas). En este sentido la relación Soja/Cultivos y principalmente la variable soja como único cultivo presentaron correlaciones significativas y con tendencias negativas (Tabla 4.6a) indicando el efecto negativo de la inclusión de este cultivo en la rotación. Novelli et al. (2013) encontraron para Molisoles, resultados muy similares. Chagas et al. (1995), trabajando con la serie de suelos Marcos Juárez, compararon monoculturas de soja y maíz, después de quince años de siembra directa. En dicho trabajo, estos investigadores pudieron determinar que el contenido de carbono y la estabilidad de los agregados de los primeros centímetros de suelo eran menores en las parcelas bajo soja respecto a las de maíz. Una de las explicaciones se debe al efecto de las rotaciones sobre el aporte y calidad de residuos y exudados, ya que distintas especies vegetales pueden afectar la estructura del suelo al favorecer el desarrollo de diferentes fracciones de materia orgánica (Angers y Caron, 1998). Bronick y Lal (2005) mencionan que los residuos del cultivo de maíz poseen cantidades importantes de fenoles, una alta relación C:N, altos contenidos de carbono y de carbohidratos, lo cual determina un incremento en la estabilidad de los agregados. Además, los mucílagos producidos por las raíces de maíz aumentan directamente la EE sin que obligatoriamente se aumente la actividad biológica del suelo (Morel et al., 1991). Por su parte, el efecto menos favorable del cultivo de soja sobre el suelo se relaciona con el menor volumen de rastrojos producido, su peor calidad bioquímica y la menor concentración de fenoles en los mismos. Esto último puede resultar en una pobre agregación, aunque en algunos casos el incremento de la actividad microbiana puede llegar a compensar los efectos negativos del menor desarrollo radicular (Bronick y Lal, 2005). En este sentido, Villamil et al. (2006) encontraron mayor EE luego del cultivo de soja respecto al de maíz porque prevalecieron los efectos benéficos de la biomasa microbiana por sobre la peor calidad de sus residuos. De cualquier manera, estos autores al analizar los resultados de la incorporación de cultivos de invierno en la rotación soja – maíz, encontraron mayor EE, asignando estos resultados al mayor contenido de carbono del suelo y a la mayor masa de raíces producida durante el año. Rotaciones más balanceadas (BP) redundarían en un mayor contenido hídrico del suelo, (Figura 3.15e, capítulo 3) con una disminución del estallido de agregados. Para los Argiudoles esto fue probado mediante las altas correlaciones encontradas entre las variables que incluían al maíz y el DMP_{rap} y $DMP_{rap 10s}$.

4.4.4 Relación entre Estabilidad Estructural y las propiedades del suelo

Como se discutió en la introducción de esta tesis, son diversos los mecanismos de agregación del suelo y la preponderancia de uno sobre otro puede variar según el suelo. En algunos suelos, la cantidad y tipo de arcillas predominantes, así como el contenido de hierro y aluminio pueden constituir los principales agentes de agregación, tal como ocurre en Ultisoles, Oxisoles y Vertisoles (Stern et al., 1991; Oades, 1993; Igwe et al., 1999). Según Le Bissonnais (1996) y Taboada et al. (2011) la CIC es una variable a tener en cuenta en la agregación del suelo, así como también se ha analizado el contenido de Ca^{+2} y Mg^{+2} (Bronick y Lal, 2005). Como se verificó en el capítulo 2, en los suelos aquí estudiados el contenido de hierro libre fue muy bajo, y no se encontraron diferencias entre los suelos o tratamientos. En cuanto al aluminio, los valores se encontraron por debajo del límite de detección y los cationes (Ca^{+2} y Mg^{+2}) si bien se correlacionaron de forma positiva con los tests de EE, la baja variabilidad entre los suelos y tratamientos, no permitió una expresión más clara de este efecto. También, como señala Cosentino et al. (2000) y Pecorari et al. (1990), los limos de baja densidad y en especial los fitolitos pueden traer aparejada una disminución de la estabilidad, debido a la fragilidad propia de estos materiales. En esta tesis, se determinó el contenido de limos de baja densidad (LBD) (capítulo 3, Figura 2.7), con un rango entre 12,6 y 34,4% de la fracción de limo, llegando a porcentajes totales en el suelo de 7,6 y 20,6%. Aún cuando estos valores no son bajos, la variabilidad de dichas determinaciones no permitió expresar de forma contundente su efecto. Si bien el incremento de los limos de baja densidad disminuiría la EE, generalmente su proporción aumenta en ambientes naturales y en tratamientos con mayor cantidad de cultivos (Figura 2.7, capítulo 3). Por otro lado, como se observa en la Tabla 4b, el efecto de la granulometría sobre la estabilidad sólo se evidenció en el DMP_{ag} , demostrando el efecto de este test sobre la cohesión del suelo.

Sin embargo, se puede destacar que los menores valores de EE detectados en esta tesis se encontraron en el Argiudol (Pergamino) cuyo contenido de limos de baja densidad (en su mayoría fitolitos) fue también el mayor.

En cuanto a las arcillas, existió un efecto del tipo de arcillas sobre la EE. El Hapludert, presentó un contenido de arcillas muy superior al resto de los suelos evaluados, y esto se debería haber traducido en una mayor EE, comparando los suelos sin agricultura (AN). Sin embargo, la EE fue menor a la de los otros suelos evaluados. Una explicación a este comportamiento podría encontrarse en la presencia de esmectitas en el suelo de Viale (capítulo 2, Figura 2.5). El efecto de esta arcilla podría deberse a que los procesos de expansión y contracción (capítulo 2, Figura 2.11), producen una menor EE (Igwe et al., 1999). Sin embargo, estos mismos mecanismos pueden a su vez recuperar la estructura del suelo (Six et al., 2004). Esto puede ser verificado por el hecho que el Hapludert presentó los valores mínimos de DMP más altos en relación a los otros suelos y una menor variación general del DMP para todos los tests con excepción del DMP_{cap} .

De la misma forma, la EE aumentó ante mayores valores de actividad de las arcillas (AA) y el límite líquido (LI) en los Molisoles (Figura 4.16a y b). Pequeños incrementos de dichas propiedades, tuvieron un gran impacto en el Haplustol señalando la importancia de la presencia y el tipo de arcillas (en este caso arcillas

interestratificadas Illita/esmectita) en la agregación de estos suelos arenosos, en cuanto al aumento de la cohesión del suelo y presencia de sitios de intercambio para estabilizar la materia orgánica. Lo mismo ocurrió para los Argiudoles pero con un efecto ligeramente menor.

Por último se debe mencionar, que muestreos anteriores y posteriores (datos no presentados) mostraron una estabilidad importante de los valores de DMP para los Molisoles pero no así en los tratamientos de Hapludert. Esto señala, el comportamiento dinámico de esta variable en suelos con arcillas expansibles donde el estado de humedad del suelo, en conjunto con las condiciones climáticas puede tener un importante efecto a corto plazo sobre la EE.

En síntesis, de acuerdo al análisis de proporción de varianzas, las correlaciones con los componentes principales CP1_suelo y CP2_suelo y las correlaciones individuales de las propiedades físicas con los distintos tests de EE, se puede concluir que para los suelos evaluados en esta tesis, el efecto de las propiedades más estables del suelo no fue decisivo en el comportamiento de la EE. Sin embargo debe evaluarse el tipo de arcillas predominante y analizar el alcance de la información suministrada por el DMP_{ag}. Por todo esto, cobran importancia otros factores más dinámicos del suelo como el rol de las distintas fracciones orgánicas así como el efecto de la biota del suelo.

4.4.5 Relación entre estabilidad estructural y las fracciones de carbono orgánico

Como se pudo observar en la Tabla 4.6c, las distintas fracciones de CO presentaron coeficientes de correlación muy altos con los distintos tests de EE. Numerosos autores resaltan el efecto positivo del CO sobre la agregación y estabilidad del suelo (Six et al., 2004; Novelli et al., 2011; Alvarez et al., 2006; Eiza et al., 2006; Echeverría et al., 2012). Aparicio y Costa (2007) y Gabiud et al. (2011) no lograron encontrar relaciones significativas entre el CO y la EE, debido a los altos niveles de materia orgánica (5,9 % a 8,5 %) en los suelos evaluados. El efecto del CO sobre la EE se debe a su rol como agente cementante, produciendo un aumento en la cohesión (Tisdall y Oades, 1982), disminuyendo la hidrofobicidad, al reducir el estallido por aire atrapado (Chenu et al., 2000), entre otros mecanismos.

Para el COT, se observó en los Molisoles valores superiores a 2,5 % de carbono no presentaron aumentos importantes de EE. En el Haplustol, no se encontraron valores por encima de dicho porcentaje. Por otro lado, para el Hapludert, no existió ninguna relación entre el COT, u otra fracción en la EE. Similares resultados han sido descriptos para Molisoles en Argentina donde el umbral se determinó para valores de 3 % (Novelli et al., 2013), mientras que en este mismo trabajo se encontró para Vertisoles una relación entre el COT y la estabilidad a partir de 3,5%. Debe destacarse también que el efecto del COT en la estabilidad fue más pronunciado en el suelo más arenoso (Halustol) en donde pequeños cambios de contenido de COT originó grandes cambios de DMP (Figura 4.15a). Para los Argiudoles, si bien el efecto del COT sobre el DMP fue muy claro, no tuvo tal magnitud (Figura 4.15a). Además, como se pudo observar en la Tabla 4.6c, el COT presentó coeficientes más altos para el DMP_{ag}, corroborando la importancia de la cohesión en el comportamiento de este test.

En cuanto a otras fracciones de CO, algunos autores resaltan aquellas fracciones más lábiles, como el COP y el CH_s como las que mayor efecto tienen sobre la EE (Tisdall y Oades, 1982; Six et al., 2004; Agostini et al., 2013). En esta tesis, el COP_g fue la fracción que presentó coeficientes más altos, principalmente para DMP_{rap 10s} y DMP_{cap}. Según la literatura el COP, y en este caso principalmente el COP_g detecta cambios de manejo a corto plazo (Duval et al. 2013), coincidiendo sus altos coeficientes con tests con alta proporción de varianza para el tratamiento. Para el caso del COP, el efecto de dicha fracción fue similar para los Molisoles, no encontrándose ninguna relación entre el COP_g y la estabilidad para el Hapludert (Figura 4.15b). En los tests de humectación rápida, Cambardella y Elliott (1993) reportaron que la estabilidad de los macroagregados podría estar relacionada con los cambios de COP del suelo. Estos resultados sugieren que el COP_g es un buen indicador de la EE de agregados para los Molisoles.

El CH_s es una fracción muy lábil de la materia orgánica, que también mostró estar muy relacionada con los test de EE. A partir de dichas correlaciones, se puede deducir el efecto que poseen estas fracciones lábiles en las primeras etapas del estallido debido, especialmente a su alta correlación con DMP_{rap 10s}. El CH_t, si bien se correlacionó positivamente con la mayoría de los tests su efecto sobre la EE fue inferior al CH_s. De la misma forma que con el COP y el COT, el CH_s y el CH_t no presentaron efectos en la EE del Hapludert. Algunos trabajos indican que el contenido de CO no es tan importante para el desarrollo estructural de los Vertisoles, mientras que las fracciones más lábiles sí (Mac Garry, 1996). En esta tesis, esto fue confirmado ya que el COP_g y el CH_s fueron las fracciones orgánicas que presentaron coeficientes más altos.

Como síntesis se evidenció la importancia de las distintas fracciones de CO, principalmente aquellas fracciones más lábiles, en el DMP de los suelos Molisoles, mientras que el CO no resultó el agente de agregación más importante en el Vertisol ya que al remover al Hapludert se aumenta significativamente los coeficientes de correlación y las regresiones determinadas para este suelo no resultaron significativas.

4.5 Conclusiones

Como conclusión de esta sección se puede mencionar que la EE resultó en un indicador pertinente en la evaluación de manejos con diferente grado de intensificación agrícola. En este sentido, la mayor intensificación agrícola reflejada en los tratamientos con BP, presentaron una mayor EE, especialmente en los Molisoles. En el Hapludert, ambos tratamientos agrícolas presentaron valores semejantes de EE.

El test más adecuado para evaluar la EE fue el de humectación rápida (DMP_{rap}) el cual responde a la fragilidad de los suelos evaluados. La adecuación de la metodología propuesta por Le Bissonnais (1996) fue comprobada, si bien resultó de interés el cálculo de una humectación más corta (10 s) para aislar los efectos del estallido. Por otro lado, el test de humectación por capilaridad (DMP_{cap}), también resultó satisfactorio, brindando información del efecto de la mineralogía de los suelos evaluados. La selección de ambos indicadores estuvieron explicadas por una alta asociación con las variables de manejo y con las fracciones más dinámicas del carbono orgánico como el COP_g, debido a su efecto sobre la macroporosidad, y su relación con la actividad biológica, entre otros aspectos. Además, si bien algunos factores inherentes

del suelo como la cantidad y tipo de arcilla afectaron los resultados de EE, dicha influencia no fue tan importante, siendo los factores más dinámicos (tratamiento de manejo) los que explicaron el comportamiento de la EE.

Conclusiones generales del capítulo 4

En este capítulo se analizaron los rasgos morfo-estructurales, la estabilidad y la hidrofobicidad de cuatro suelos contrastantes en tres escalas de percepción (macro, meso y micro-escala). En este sentido se pudo apreciar una alta asociación de lo encontrado entre las diferentes escalas, obteniéndose para cada una de ellas información nueva y coherente con las demás escalas. Por ejemplo, las estructuras laminares, o en bloques descritas en los monolitos, tuvieron su correlato en los agregados de suelo descriptos y medidos tanto a meso escala (microscopía con luz incidente), a micro escala (microscopía de polarización en cortes delgados) como a la escala submicroscópica (microscopía electrónica de barrido). También, la actividad biológica reflejada en los monolitos por estructuras más favorables (granular, migajosa) y por porosidades visibles más altas, en los cortes delgados por poros verticales, canales, excrementos, entre otros rasgos, coincidieron con situaciones con mayor estabilidad estructural e hidrofobicidad (Apéndice 1).

En este sentido, se debe mencionar que todas las metodologías empleadas en este capítulo, pero principalmente la descripción micromorfológica, lograron caracterizar con mucho detalle el efecto de la intensificación agrícola en todos los suelos mientras que a su vez presentó información complementaria con respecto a las otras metodologías de este capítulo. Por ejemplo, a través de la micromorfología se pudo apreciar que no todos los tipos de estructuras laminares son similares (eg. estructuras formadas a partir de la masa basal, o producto de la compactación de agregados biológicos), lo cual podría ser de utilidad para enriquecer el Icv. También, a partir de esta metodología se pudo describir la orientación de los poros evaluados volumétricamente en el capítulo 3, mientras que el análisis microscópico también logró captar la heterogeneidad espacial del efecto de la tensión entre la compactación debido al tránsito o *age-hardening* y el disturbio provocado por la permanencia de raíces y la actividad biológica. Por todo lo mencionado se corrobora la ***hipótesis 4.1***.

A partir del análisis estructural en estas distintas escalas se puede verificar el efecto de la intensificación agrícola sobre la estructura edáfica. El mismo, en general, fue positivo para todos los tipos de suelos evaluados. Sin embargo se puede discriminar dos grupos. Por un lado, las variables que describen los rasgos morfo-estructurales (sección A y B). Si bien la mayoría de estas variables fueron afectadas de forma positiva por una mayor intensificación agrícola, dicho efecto dependió de cada variable utilizada en particular y el tipo de suelo evaluado.

Así por ejemplo, a través del Icv se observaron mejores estructuras en el tratamiento de BP con respecto a MP en el Argiudol (Monte Buey), pero lo contrario en el Argiudol (Pergamino), o por ejemplo el análisis de la redondez de agregados no presentó ninguna información relevante en el Hapludert. Esto se debió principalmente a la respuesta diferencial ante la compactación de cada tipo de suelo atribuida a sus diferencias composicionales. Por otro lado, la micromorfología puso en manifiesto muy claramente la tensión entre las fuerzas densificantes (compactación) y de disturbio

(actividad biológica) propia de la intensificación agrícola. Esto se vio reflejado claramente a través de los modelos microestructurales, laminares y densificados por un lado y biodisturbados y bioconstruidos por otro, lo cual puede ocurrir de forma simultánea y con una escala espacial muy acotada.

En el otro grupo, las variables de estabilidad de las estructuras (sección C), presentaron una respuesta homogénea y positiva ante la intensificación agrícola. Esto se debe a que dichas variables responden de forma más directa al cambio de la actividad biológica y la presencia de raíces, las cuales son fomentadas en situaciones de alta intensificación agrícola. De esta forma, con algunos recaudos, se acepta la **hipótesis 4.II** y la **hipótesis 4.III**.

No obstante, se debe remarcar que la intensificación agrícola presentó efectos positivos sobre la EE, principalmente en los suelos más rígidos (Molisoles), aunque como se vio en el capítulo 2, todos los suelos mostraron procesos de expansión y contracción. En el Hapludert, no se encontraron diferencias importantes entre los tratamientos, debido a que el factor abiótico (en este caso tipo y cantidad de arcillas) enmascaró los posibles efectos positivos generados por una actividad biológica y radicular más intensa. A partir de lo mencionado se acepta la **hipótesis 4.IV**.

Capítulo 5

CONCLUSIONES GENERALES

A lo largo de la tesis, se ha logrado detectar diversos indicadores que detectaron de forma satisfactoria las diferencias entre los tratamientos con distinta intensidad agrícola y la situación de ambiente natural. Estos son: DAP (0-20 cm): densidad aparente, $P_{Mac>300}$ (0-5 cm): macroporosidad mayor a 300 μ m, D_{moda} : tamaño de poro más frecuente, CA: capacidad de aire, Icv: índice de calidad visual, Pv: porosidad visible y DMP_{rap} : diámetro medio ponderado para el test de humectación rápida. La HS_{WDPT} (hidrofobicidad medida por WDPT) si bien cumple con los requisitos de buen indicador, debe seguir evaluándose principalmente en suelos con mineralogías expansibles. Mediante la utilización de un análisis de componentes principales estos indicadores ordenan las situaciones analizadas (Figura 5.1).

La sensibilidad de los indicadores seleccionados se evidencia en el análisis de componentes principales, el cual ordena y discrimina claramente los manejos evaluados. El eje 1 (65,9%), que separa los tratamientos de manejo, se correlacionó con prácticamente todas las variables de manejo (Tabla A.9). El mismo estuvo influenciado por el $CP1_{manejo}$, que integra esas variables. Particularmente el ISI e ISI_{agr} fueron las variables que mayor coeficiente mostraron indicando que dichos indicadores responden claramente a los cambios de intensidad del uso del suelo, y que estos cambios son positivos ya que a mayor ISI e ISI_{agr} , los suelos presentan una mayor porosidad ($P_{Mac>300}$ 0-5 cm y Pv), más estabilidad (DMP_{rap}) y mayor capacidad de aire (CA) entre otros efectos. También quedó demostrado que dicha mejoría en la calidad del suelo se debió a una menor proporción de soja en la rotación (Soja/Cultivos, Soja/Maíz, Soja único cultivo) y también debido a mayores períodos de SD (Años SD). Además, se pudo observar que los indicadores seleccionados ordenados a través del Eje 1, presentaron correlaciones significativas con diversas variables que describen el movimiento de agua en el suelo como la infiltración básica (Ib) (Apéndice 2) y con algunos rasgos biológicos muy importantes en el funcionamiento del suelo que fueron analizados dentro del proyecto BIOSPAS¹. Así, entre otros datos generados a través de este Proyecto, la macrofauna y fauna total ($r=0,52$, $p=0,002$; $r=0,39$, $p=0,04$, respectivamente), la riqueza de hongos del suelo ($r=0,40$, $p=0,01$) y con el número de esporas fúngicas ($r=0,42$, $p=0,01$) presentaron correlaciones significativas con el Eje 1 del componente principal.

Como se vio a lo largo de este trabajo, se lograron detectar algunos indicadores que respondieron de forma aceptable en todo el gradiente textural y mineralógico analizado. La mayoría de los indicadores seleccionados se asocian a características de la porosidad, y en especial la macroporosidad y su estabilidad, mientras que también la calidad estructural general del suelo, reflejada por el Icv fue un importante indicador, siempre que se tengan en cuenta las limitantes encontradas en esta metodología (capítulo 5, sección A). De esta forma se acepta la **hipótesis 1.III** (*Indicadores de calidad de suelo relacionados a la porosidad son los que permiten diferenciar entre*

¹ Datos preliminares recabados del grupo del Dr. Camilo Bedano y del grupo de la Dra. Laura Susana Domínguez.

manejos agrícolas independientemente del tipo de suelo). No obstante, se debe continuar el estudio de estos indicadores en una mayor cantidad de tipos de suelo y manejos bajo SD.

Por otro lado, el primer eje logró separar claramente el AN de MP debido a mayores $P_{Mac>300}$, CA, DMP_{rap} . Como se señaló con anterioridad. Este eje representó principalmente las variables estructurales (Figura 5.1), asociándose con todas las variables de manejo (Tabla 5.1), mientras que no se asoció con la composición del suelo (CP1_suelo).

La diferenciación entre MP y BP fue más compleja. En algunos suelos las BP bajo SD mejoran claramente la condición estructural y el funcionamiento hídrico del suelo. Esto se pone de manifiesto, por ejemplo, en los aumentos de la EE, $P_{Mac>300}$, Ib y disminución del escurrimiento con una DAP media o baja (Argiudol –Monte Buey- y Hapludert). Sin embargo, como se observa en la Figura 5.1, en otros suelos aún las BP pueden resultar en condiciones estructurales e hidrofísicas algo restrictivas. Esto se ve reflejado por ejemplo, en altas densidades aparentes y baja porosidad (Argiudol - Pergamino y Haplustol). Además se puede observar gráficamente en la Figura 5.1 que algunos suelos de BP se orientaron según el componente principal 2 (11,9 %), en donde la DAP tiene una participación muy alta (Tabla 5.1). Este componente se asoció fuertemente con la composición del suelo (CP1_suelo), indicando la importancia del factor composicional en la respuesta de algunos suelos ante la intensificación agrícola.

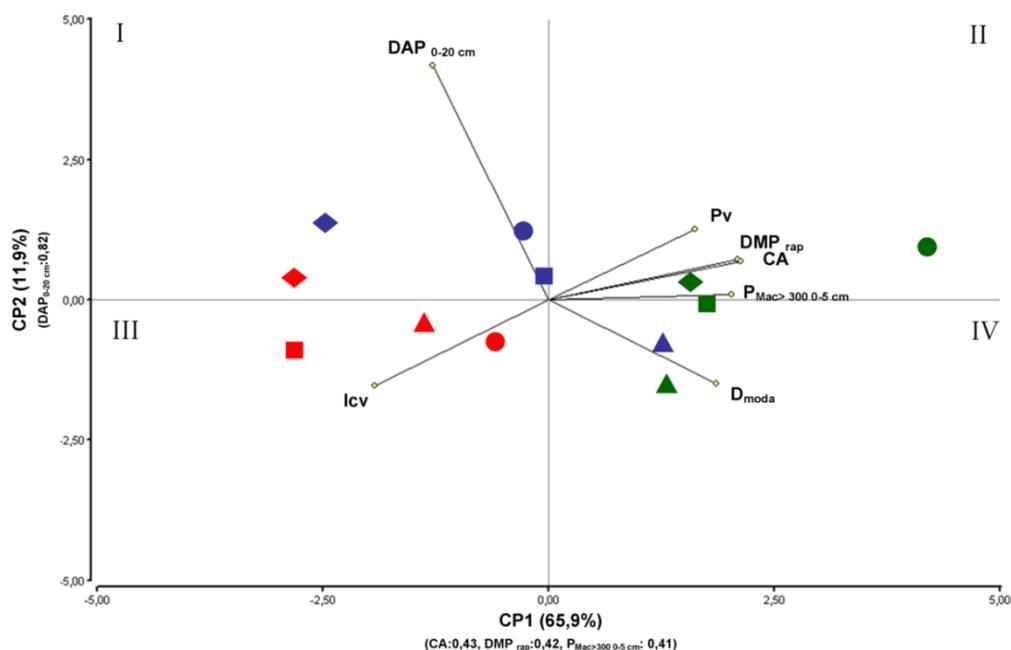


Figura 5.1 Resultados del análisis de componentes principales de los indicadores seleccionados en los capítulos precedentes. Los diferentes colores indican los tratamientos analizados (AN - Ambiente Natural: verde, BP- Buenas prácticas: azul, y MP - Malas prácticas: rojo) mientras que los distintos símbolos indican el tipo de suelo: (● Haplustol; ■ Argiudol (Monte Buey); ◆ Argiudol (Pergamino) y ▲ Hapludert. DAP (0-20 cm): Densidad aparente, $P_{Mac>300}$ (0-5 cm): Macroporosidad mayor a 300 μm , D_{moda} : Tamaño de poro más frecuente, CA: capacidad de aire, Icv: índice de calidad visual, P_v : porosidad visible y DMP_{rap} : diámetro medio ponderado para el pre-tratamiento de humectación rápida.

Tabla 5.1 Correlación de Pearson entre las variables de manejo y el CP1_final. Índice de intensificación de cultivo (ISI), Índice de intensificación de cultivo para los manejos agrícolas (ISIAgr), Años bajo siembra directa (Años bajo SD), Relación de años con soja sobre la cantidad total de cultivos (Soja/Cultivos), Relación de años con maíz sobre la cantidad total de cultivos (Maíz/Cultivos), Relación de años con soja sobre maíz (Soja/Maíz), y soja como único cultivo (soja único cultivo). * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Variable de Manejo	CP1_final	
CP1_manejo	-0,66	***
ISI	0,85	***
ISI _{agr}	0,73	***
Años SD	0,56	**
Soja/Cultivos	-0,71	***
Soja/Maíz	-0,49	*
Maíz/Cultivos	0,31	
Soja único cult.	-0,67	***

Por todo lo mencionado en primer lugar es posible concluir que en los tratamientos de SD con baja intensificación, donde predominaba el cultivo de soja, las condiciones estructurales e hidrofísicas del suelo fueron muy desfavorables. En coincidencia con lo sugerido por Sasal et al. (2006), puede considerarse que la menor cantidad de rastrojo proporcionada por el cultivo de soja, y la humedad del suelo en el momento de la cosecha de este cultivo (generalmente mayor al de la cosecha de maíz) acentuaría el efecto del tránsito de maquinaria. A esto –y como consecuencia de una menor provisión de materia orgánica debe agregarse una menor actividad de la fauna y de la flora del suelo, las que actúan contrarrestando el efecto mecánico de compactación producido por el tránsito mediante la bioturbación y los procesos microbianos que favorecen la estructuración.

En segundo lugar se concluye que el efecto de la intensificación agrícola bajo SD es muy complejo y divergente. En algunos suelos trajo beneficios tanto en las condiciones físicas y estructurales, como también en el movimiento del agua en todas las escalas de organización estudiadas. Así, aún cuando la intensificación agrícola aumente el número y peso de la maquinaria agrícola, la mayor cantidad de rastrojo, mayor estabilidad estructural y la mayor actividad biológica, entre otros factores, atenúan sus efectos perjudiciales. No obstante, existieron evidencias de que para otros suelos esta intensificación trajo inconvenientes físicos relacionados principalmente a la compactación. De esta forma se acepta parcialmente la **hipótesis 1.1** (*Una mayor intensificación agrícola con una secuencia de cultivos más diversificada mejora la calidad estructural e hidrofísica a diferentes escalas de organización*).

Los beneficios de la intensificación agrícola se observaron especialmente en los suelos más resilientes, es decir, aquellos que contaban con procesos de expansión y contracción del suelo más importante y con una composición menos susceptible a la degradación. Para suelos de clima templados húmedos, sin congelamiento del suelo, son los ciclos de humedecimiento y secado los que más influyen en la estructuración (Bronick y Lal, 2005). Por ello, en el Hapludert, los efectos de la intensificación (BP) resultantes de una mayor presión de tránsito, no afectaron las condiciones del suelo (Figura 5.1). No obstante, tampoco se encontraron evidencias marcadas del tránsito en

suelos con mineralogía predominantemente illítica como en el Argiudol (Monte Buey) (Figura 5.1). Esta atenuación del efecto del tránsito puede estar explicada por la importante actividad biológica (>EE, aparición de agregados biogénicos y mayor hidrofobicidad) encontrada en BP. Por otro lado, en el Argiudol (Pergamino) con textura similar, sí se evidenciaron estructuras desfavorables (alta densidad aparente y alta RP, estructuras laminares) en BP con respecto a MP. Esta mejor condición estructural de BP en el Argiudol (Monte Buey) respecto al Argiudol (Pergamino) se debió a diferencias en la cantidad de cultivos de cobertura en los últimos 5 años (40 % con respecto a 0%), mayor contenido de COT, menos LBD y mayores procesos de expansión y contracción.

La impronta negativa fue marcada en el BP del Haplustol, si bien este suelo posee una capacidad portante muy alta y una alta aireación natural. Para esos suelos más frágiles (sea por su calidad intrínseca o por su estado de degradación), si bien la intensificación agrícola bajo SD trae aparejado un efecto negativo del tránsito sobre el suelo, existen estrategias como el uso de cultivos de cobertura, el tránsito controlado u otras, que pueden aumentar el efecto benéfico de una secuencia más intensa y diversificada sobre las condiciones edáficas. Por todo esto se rechaza la **hipótesis 1.II** (Si bien la intensificación conlleva un mayor tránsito su efecto negativo no se ve reflejado en el estado estructural e hidrofísico del suelo).

Por último se debe resaltar la importante contribución del análisis micromorfológico para comprender los efectos de la intensificación agrícola, en donde distintos modelos microestructurales lograron poner de manifiesto los efectos de la actividad biológica y la compactación en la estructura y porosidad de cada tipo de suelo y tratamiento.

En esta Tesis queda demostrado que los efectos positivos o negativos de la SD sobre la condición del suelo dependen de una compleja interrelación entre tipo de suelo y las prácticas de manejo, sujetas a un equilibrio dinámico entre los efectos de densificación producidas por el tránsito y de reestructuración producidos por la actividad biológica. Además, se concluye que el uso y elaboración de indicadores de calidad física deben estar siempre referidos al tipo de suelo analizado, o al menos se debe contar con información composicional adecuada para la correcta interpretación de los mismos.

Bibliografía

- AAPRESID. 2012.
http://www.aapresid.org.ar/images/cms/assets/docs/aapresid.evolucion_superficie_sd_argentina.1977_a_2011.pdf
- Agostini, M. de los A., G.A. Studdert, G.F. Domínguez y S.N. Toun. 2013. Intensificación del uso del suelo: Efecto sobre algunas propiedades físicas y el carbono orgánico total. Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos. INTA-Castelar. Actas en CD.
- Aguilár, J., C. Dorronsoro, M. Gutiérrez Castorena y H. Morrás. 2011. Spanish translation of micromorphological terms. En: Multilingual translation of micromorphological terminology used in "Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections" (Stoops, 2003). Versión 1.3 (11/12/2011).
- Albrecht, A., L. Rangon, y P. Barret. 1992. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). Chaiers ORSTOM, série *Pédologie*. 27: 121-133.
- Alvarez, C., F. Gutiérrez, M. Taboada, P. Prystupa, J. Ocampo, P. Fernández, M. Moulin, y H. Vaccaro. 2004. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos manejos en el norte de Buenos Aires. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (en CD).
- Alvarez, C.R., A. Bono, M.A. Taboada, F.H. Gutierrez Boem, P.L. Fernandez y P. Prystupa. 2006. Distintos manejos del suelo en la Pampa Ondulada: II Fracciones orgánicas y propiedades físicas. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta.
- Alvarez, C.R., M.A. Taboada, F.H. Gutierrez Boem, A. Bono, P.L. Fernandez y P. Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1251.
- Alvarez, C.R., F.G. Micucci, C. Bustingorri y M.A. Taboada. 2010. Prediction of Proctor test parameters in the Pampas region of Argentina. *R. Bras. Ci. Solo.* 34: 1787-1793.
- Alvarez, C.R., M.A. Taboada, S. Perelman y H.J.M. Morrás. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Res.* <http://dx.doi.org/10.1071/SR13281>.
- Alvarez, M.F., M.L. Osterrieth, V. Bernava Laborde y L.F. Montti. 2008. Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de argiudoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la Prov. de Buenos Aires, Argentina. *Ci. Suelo (Argentina)*. 26: 115-129.
- Alvarez, R. y R.S. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*. 83: 127-141.
- Alvarez, R., R. Díaz, N. Barbero, O. Santanoglia y L. Blotta. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass and CO₂-C production from three tillage systems. *Soil Till. Res.* 33:17-28.
- Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *Sust. Agric J.* 14: 83-150.
- Andriulo A. y G. Cordone. 1998. Impacto de las labranzas y rotaciones sobre la MO de los suelos de la región pampeana húmeda. En Siembra Directa. Ed. Hemisferio Sur. Pp. 65-96.
- Angers, D.A. y J. Caron. 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*. 42: 55-72.
- Aparicio, V. y J.L. Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96: 155-165.

- Askari, M.S., J. Cui y N.M. Holden. 2013. The visual evaluation of soil structure under arable management. *Soil Till. Res.* 134: 1-10.
- Austin, A.T., G. Pineiro, M. Gonzalez-Polo. 2006. More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. *Biogeochemistry.* 79: 45-60.
- Ayoubi, S.P., K.P. Mokhtari, M.R. Mosaddeghi y N. Honarjoo. 2012. Soil aggregation and organic carbon as affected by topography and land use change in western Iran. *Soil Till. Res.* 121 18-26.
- Balbuena, R.H., G.F. Botta, Rivero, E.R.D. 2009. Herramientas de labranza para la descompactación del suelo agrícola, 1ed. Orientación Gráfica editora, Buenos Aires. ISSN 978-987-9260-66-1
- Ball, B.C. y E.A.G. Robertson. 1994. Soil structural and transport properties associated with poor growth of oil-seed rape in soil direct drilled when wet. *Soil Till. Res.* 31, 119-133
- Ball, B.C., T. Batey y L.J. Munkholm. 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerkamp test. *Soil Use and Management.* 23: 329–33.
- Barbosa, O., M. Taboada, M. Rodriguez, y D. Cosentino. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limosos de la Pampa ondulada (Argentina). *Cienc Suelo (Argentina).* 15: 81-86.
- Bates, D., M. Maechler y B. Bolker. 2011. lme4: linear mixed-effects models using S4 classes. R package version 0.999375-39. Disponible en <http://cran.r-project.org>.
- Bathke, G.R y G.R. Blake. 1984. Effects of soybean on soil properties related to soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1398-1401.
- Bauder, J., Randall, y J. Swann. 1981. Effect of four continuous tillage systems on mechanical impedance of a clay loam soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:802-806.
- Baumer, O.W. y B.R. Brasher. 1982. Prediction of water content at selected suctions. *Am. Soc. Agri. Eng.* Paper 82-2590.
- Baver, L.D. 1956. Soil Physics. Jhon Wiley and Sons Inc. New York. Londres, Sidney.
- Becerra, J.C. 2006. Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *J. Soil Sc. Plant. Nutr.* 6 (2):13-27.
- Behling, M. 2005. Avaliação do potencial agrícola e dos impactos provocados pela aplicação de resíduos industriais num Planossolo. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Ciência do Solo). Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 163p.
- Beven, K. y P. German. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Res.* 18: 1311-1325.
- Blake, G.R. y K.H. Hartge. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* American Society of Agronomy, Madison, pp. 363-376.
- Blott, S.J. y K. Pye. 2001. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms.* 26: 1237–1248.
- Bodhinayake, W.S. y B.C. Xiao. 2004. New method for determining water-conducting macro- and mesoporosity from tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 760-769.
- Boivin, P., P. Garnier y D. Tessier. 2004. Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples. *Sci. Soc. Am. J.* 68: 1145-1153.
- Bonel, B. y H. Morrás. 2000. Estudio de la morfología del horizonte superficial de un Argiudol con diferentes manejos de rastrojo. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata (editado en CD).

- Bonel, B., H. Morras y V. Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un suelo Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ci. Suelo (Argentina)*. 23: 1-12
- Botta G., D. Jorajuria, R. Balbuena y H. Rosatto. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max L.*) yields. *Soil Till. Res.* 78: 53–58.
- Botta, G., D. Jorajuría, R. Balbuena, M. Ressia, C. Ferrero, H. Rosatto y M. Tourn. 2006. Deep tillage and traffics on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuusL.*). *Soil Till. Res.* 91: 164–172.
- Botta, G., O. Pozzolo, M. Bomben, M. Tourn, E. Soza, H. Rosatto, A. Gili, J. Ressia, D. Rivero, J.Y. Vazquez y S. Stadler. 2007. Aplicación del tráfico controlado en la cosecha de maíz: Efectos sobre rendimientos del cultivo y las propiedades físicas del suelo. *Agro-Ciencia* 23.
- Brandan Pérez, C., J. Huidobro, C. Conforto, J.L. Arzeno, G. March, J. Meriles y S. Vargas Gil. 2010. Efecto de la rotación de cultivos sobre la diversidad de las comunidades microbianas del suelo cuantificada mediante pcr-trflp. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentina.
- Braudeau, E., J.P. Frangi y R.H. Mohtar. 2004. Characterizing nonrigid aggregated soil-water medium using its shrinkage curve. *Sci. Soc. Am. J.* 68: 359-370.
- Briggs, L.J. y J.W. Mc Lane. 1907. *USDA Soils Bull.* N° 45
- Brindley, G.W. y G. Brown. 1980. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society. 507 p.
- Bronick, C.J. y R. Lal. 2005. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil Till. Res.* 81: 239-252.
- Buczko, U., O. Bens y R.F. Huttl. 2006. Tillage effects on hydraulic properties and macroporosity in silty and sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1998-2007.
- Bullock, P., N. Fedoroff, A. Jongerius, G. Stoops, T. Tursina y Babel. 1985. Handbook for soil thin section description. Waine Research Publications. 152 p.
- Burke, W., D. Gabriels y J. Buoma. 1986. Soil Structure assessment. A.A. Balkema, Rotterdam, 92 p.
- Cambardella, C.A. y E.T. Elliott. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Sci. Soc. Am. J.* 56: 777–783.
- Campitelli, P., A. Aoki, O. Gudelj, A. Rubenacker y R. Sereno. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Cienc Suelo (Argentina)*. 28: 223-231.
- Cañasveras, J.C., V. Barrón, M.C. Del Campillo y J. Torrent. 2009. Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*. Doi: 10.1016/j.geoderma.2009.09.004.
- Capriel, P., T. Beck, H. Borchert, y P. Härter. 1990. Relationships between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane and soil microbial biomass, and soil aggregate stability. *Sci. Soc. Am. J.* 50: 415–420.
- Caron, J. 1996. Describing pressure buildup within aggregates following immersion: a model. En: Proceedings of the 3rd Eastern Canada Soil Structure Workshop (J. Caron, D.A. Angers y G.C. Topp, eds). Colloque Canadien sur la structure du sol, Merrickville, Ontario. pp. 59–73.

- Carter, M.R. 2004. Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil Till. Res.* 79: 1–6.
- Carter, M.R., P.M. Mele y G.R. Steed. 1994. The effects of direct drilling and stubble retention on water and bromide movement and earthworm species in a duplex soil. *Soil Sci.* 157: 224–231.
- Castellini, M., M. Pirastru, M. Niedda y D. Ventrell. 2013. Comparing physical quality of tilled and no-tilled soils in an almond orchard in southern Italy. *Italian Journal of Agronomy* . 8:e20.
- Castiglioni, M., H. Morrás, O. Santanatoglia y M. Altinier. 2004. Análisis de la contracción de agregados de distintos horizontes de Argiudoles de la Pampa Ondulada. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, (editado en CD).
- Castiglioni, M.G. 2005a. Influencia de la organización y composición del espacio poroso y la matriz en la dinámica hídrica de distintos Argiudoles de Pampa Ondulada. Tesis de Maestría. Escuela para Graduados A. Soriano (FAUBA). Buenos Aires, Argentina.
- Castiglioni, M., H. Morrás, O. Santanatoglia y M. Altinier. 2005b. Contracción de agregados de Argiudoles de la Pampa Ondulada diferenciados en su mineralogía de arcillas. *Ci. Suelo (Argentina)*. 23: 13-22.
- Castiglioni, M, H. Morrás, O. Santanatoglia, M. Altinier y D. Tessier. 2007. Movimiento del agua edáfica en Argiudoles de la Pampa Ondulada con diferente mineralogía de arcillas. *Ci. Suelo (Argentina)*. 25: 109-121.
- Castiglioni, M.G.; M.E. Mendive Álvarez; J. Cordoba; M. Ochoa y D. Mazzoni. 2010. Cambios en la porosidad y distribución de poros asociados a causas edáficas y por el uso de la tierra. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentina.
- Castiglioni, M.G, M.G. Wilson, A. Paz Gonzalez, M. E. Mendive Alvarez, C. Irurtia, J. Oszust, M.C. Sasal. 2011. Estudios de la Zona no Saturada del Suelo Vol. X-ZNS'11. Actas de las X Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo, Salamanca (España), I.S.B.N. 978-84-694-6642-1.
- Castiglioni, M.G., F.B. Kraemer y H.J.M Morrás. 2013. Efecto de la secuencia de cultivos bajo siembra directa sobre la calidad física de suelos de la región Pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)*. 31: 93-105.
- Cavaliere, K.M.V., A.P. Silva, C.A. Tormena, T.P. Leão, T.P. A.R. Dexter y I. Hakansson. 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferralsol in Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.* 103: 158-164.
- Cavenage, A., M.L.T. Moraes, M.C. Alves, M.A.C. Carvalho, M.L.M. Freitas, y S. Buzetti. (1999), Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. *R. Bras. Ci. Solo* 23: 997-1003.
- Caviglia, O.P. y F.H. Andrade. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the argentinean pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol.* 3:1-8.
- Chagas, C, H. Marelli y O. Santanatoglia. 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol típico bajo tres sistemas de labranza. *Ci. Suelo (Argentina)*. 12: 11-16.
- Chagas, C.I. O.J. Santanatoglia, M.G. Castiglioni y H.J. Marelli. 1995. Tillage and cropping effects on selected properties of an Argiudoll in Argentina. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 643-655.
- Chagas, C., C. Irurtia, J. Thisted, O. Santanatoglia, M. Massobrio, M. Castiglioni y A. Buján. 2004. Movimiento horizontal y vertical del agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa. *Ci. Suelo (Argentina)*. 22: 117-122.

- Chagas, C.I., F.B. Kraemer, S. Utin, C. Irurtia y O.J. Santanatoglia. 2011. Influencia de las propiedades edáficas y la posición en el paisaje sobre la respuesta hidrológica de suelos pertenecientes a una cuenca de la Pampa Ondulada. *Cuadernos del Curíham*. 17:1.
- Chan, K.Y., J.A. Mead. 1988. Surface physical properties of a sandy loam soil under different tillage practices. *Aust. J. Soil Res.* 26: 549–559.
- Chenu, C., Y. Le Bissonnais y D. Arrouays. 2000. Organic Matter Influence on Clay Wettability and Soil Aggregate Stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1479–1486.
- Cockroft, B. y K.A. Olsson. 1997. Case study of soil quality in south-eastern Australia: management of structure for roots in duplex soils. En: *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 339–350.
- Colin, R., Jackson, C. Scarlett y C. Vallaire. 2007. Microbial activity and decomposition of fine particulate organic matter in a Louisiana cypress swamp. *Journal of the North American Benthological Society* 26(4):743-753.
- Cooper, M., P. Vidal-Torrado y V. Chaplot. 2005. Origin of Microaggregates in Soils with Ferrallic Horizons. *Scientia Agricola*. 62: 256-263.
- Cosentino, D. y C. Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)*. 20: 9-16.
- Cosentino, D.J. 2000. Impacto de los limos livianos sobre el comportamiento físico en horizontes superficiales de argiudoles pampeanos. Tesis de Maestría. Escuela para Graduados A. Soriano (FAUBA). Buenos Aires, Argentina.
- Cosentino, D.J. y C. Chenu. 2008. Los microorganismos como controladores de la arquitectura del suelo. Fertilidad física de los suelos. Editores: Miguel A. Taboada y Carina R. Alvarez.- 2ª ed.- Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. pp 272.
- Craul, P.J. 1999. *Urban Soils: Applications and Practices*. Wiley, Toronto.
- Cremon, C., D. Sacco, C. Grignani, E. Jardim Rosa Júnior y N. C. Mapeli. 2011. Micromorfometría de agregados de suelo sob diferentes sistemas de cultivo de arroz. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 41: 370–77.
- Crockford, S., S. Topadilis, y D.P. Richardson. 1991. Water repellency in a dry sclerophyll forest-measurements and processes. *Hydrol. Proc.* 5: 405–420.
- De Battista, J., C. Pecorari y R. Albrecht. 2005. Evaluación del estado estructural de suelos bajo agricultura continua en siembra directa. En: *Indicadores de calidad física de suelos*. Boletín N 4 INTA EEA General Villegas. 31-39.
- De Battista, J.J., A. Andriulo, M. Ferrari, C. Pecorari. 1994. Evaluation of the soils structural condition under various tillage systems in the pampa humeda (Argentina). *Actas del 13 ISTRO Conference*, Alborg, Denmark.
- De Battista, J.J., C. Pecorari y R. Albrecht. 1997. Evaluación del estado estructural en suelos con agricultura continua en siembra directa. INTA, EEA Rafaela. *Información Técnica* N° 205, 12 pp.
- De Falco, P., E. Penón, A. E. Duhour, V. Wagner, L. Podestá y Di Ciocco. 2012. Evaluación de la macrofauna edáfica en monocultivo de soja bajo diferentes rotaciones. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.
- De Jong, E., K.L. Kozak, y H.B. Stonehouse. 1992. Comparison of shrink-swell indices of some Saskatchewan soils and their relationships to standard soil characteristics. *Can J. Soil Sci.* 72: 429-439.
- De Leennher, L. y M. De Boodt. 1958. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Proceedings of the International Symposium of Soil Structure*. Ghent, Bélgica, 290-300.

- De Orellana, J.A. y M.A. Pilatti. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ci. Suelo (Argentina)*.12: 75-80.
- Derpsch, R., T. Friedrich, A. Kassam y H. Li. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int J Agric & Biol Eng.* 3: 1-26.
- Dexter, A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11: 199–238.
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Dexter, A.R., E.A. Czyz, G. Richard y A. Reszkowska. 2008. A user-friendly retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma.* 143: 243–253.
- Díaz-Zorita, M. 1996. Labranzas en la Region Semiarida y Subhúmeda Bonaerense Noroeste. In: Buschiazzo, D.E., Panigatti, J.L., Babinec, F. (Eds.), *Labranzas en la Region Semiarida Argentina*. INTA y SAPyA, Santa Rosa, Argentina, pp. 39-48.
- Díaz-Zorita, M., C. Álvarez y M. Barraco. 2004. Efectos de doce años de labranzas en un Hapludol del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ci. Suelo (Argentina)*. 22: 11-18.
- Díaz-Zorita, M., G.A. Duarte y J.H. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1–18.
- Díaz-Zorita, M., J.H. Grove, L. Murdock, J. Herbeck y E. Perfect. 2004. Soil structural disturbance effects on crop yields and soil properties in a no-till production system. *Agron. J.* 96: 1651-1659.
- Domzal, H., J. Glinski y J. Lipiec. 1991. Soil compaction research in Poland. *Soil Till. Res.* 19: 99–109.
- Doran, J.W., L.N. Mielke y J.F Power. 1990. Microbial activity as regulated by soil water- filled pore space. Symposium III-3, Ecology of Soil Microorganisms in the Microhabitat Environments III. Trans. of the 14th International Congress of Soil Science, August 12–18, Kyoto, Japan, pp. 94–99
- Doran, J.W. y T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. En: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.E Bezdicek, y B.A. Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Sci. Soc. Am. Special Publication 35, Soil Science Society of America, Inc. and American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin. Pp 3-21.
- Drees, L., A. Karathanasis, L. Wilding, y R. Blevins. 1994. Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 508-517.
- Drewry, J.J., K.C. Cameron y G.D. Buchan. 2001. Effect of simulated dairy cow treading on soil physical properties and ryegrass pasture yield. *New Zealand J. Agric. Res.* 44: 181–190.
- Drewry, J.J., y R.J. Paton. 2005. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Aust. J. Soil Res.* 43: 525–531.
- Duval, M.E., J.A. Galantini, J. O. Iglesias, S. Canelo, J.M. Martinez y L. Wall. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Till. Res.* 131: 11-19.
- Echeverría, N., S. Querejazú, M. De Lucia, J. Silenzi, H. Forjan y M. Manso. 2012. Estabilidad y carbono orgánico de agregados bajo rotaciones en siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- Eiza, M., G. Studdert, N. Fioriti y G. Dominguez. 2006. Estabilidad de agregados y materia orgánica total y particulada en Molisoles de Balcarce. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, Argentina.

- Eiza, M.J. Calcula.IN.FI versión 2012. Centro de Investigación de Recursos Naturales. Instituto de Suelos. INTA.
- Ernst, O. Bentancur y R. Borges. 2002. Descomposición de rastrojo de cultivos en siembra sin laboreo: Trigo, maíz, soja y trigo después de maíz o de soja. *Agrociencia* 6 (1): 20-26.
- Fernandez, P.L. 2011. Integración de la cría bovina en sistemas de agricultura en siembra directa. ¿Cómo cambian las propiedades físicas y dinámica del carbono de los suelos? Tesis de Doctorado. Área Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados. FAUBA. Pp. 184.
- Fernández, P.L., C.R. Álvarez, V. Schindler y M.A. Taboada. 2010. Topsoil bulk density decreases after grazing crop residues under no till farming. *Geoderma*. 159: 24-30.
- Ferreira, M.M., B. Fernandez y N. Curi. 1999. Influencia da mineralogía da fracção argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. *Bras. Ci. Solo*. 23: 515-524.
- Ferreras, L.A., J.L. Costa, F.O. García y C. Pecorari. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 31-39.
- Ferreras, L., G. Magra, P. Besson, E. Kovalevski y F. García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ci. Suelo (Argentina)*. 25: 159-172.
- Fies, J.C. y P. Stengel. 1981. Densité texturale de sols naturels. II: Eléments d'interprétation. *Agronomie*. 1: 659-666.
- Figuerola, E.L., L.D. Guerrero, S.M. Rosa, L. Simonetti, M.E. Duval, J.A. Galantini, J.C. Bedano, L.G. Wall y L. Erijman. 2012. Bacterial indicator of agricultural management for soil under no-till crop production. *PLoS One* 7, e51075.
- Fuentes, M., B. Govaerts, F. De León, C. Hidalgo, K.D. Sayre, J. Etchevers y L. Dendooven. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *Eur. J. Agron.* 30: 228-237.
- Gabioud, E.A., M.G. Wilson y M.C. Sasal. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ci. Suelo (Argentina)*. 29: 129-139.
- Gastronneau, Y. y H. Manichon. 1987. Guide methodologique du profil cultural. C.E.R.E.F. – G.E.A.R.A. 71. Pp.
- Gerster, G. y D. Vidal. 1997. Efectos de los sistemas de labranzas sobre la capa arable en el cultivo de maíz. Información técnica n° 53. EEA INTA Oliveros.
- Gerster, G., O. Novello y G. Torresi. 2003. La siembra directa y su efecto en las propiedades físicas del suelo. Informe monográfico. Curso sobre Aspectos agronómicos de la mineralogía, micromorfología y mecánica de suelos (J. Hilbert y H. Morrás). Escuela para Graduados, Facultad de Cs. Agrarias, UNR.
- Goldberg, S., D.L. Suarez y R.A. Glaubig. 1988. Factors affecting clay dispersion and aggregate stability of arid-zone soils. *J. Soil Sci.* 146: 317-325.
- Grant, C. y G. Lafond. 1993. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 73: 223-232.
- Gregorich, E., W. Reynolds, J. Culley y M. McGovern. 1993. Changes in soil physical properties with depth in a conventionally tilled soil after no-tillage. *Soil Till. Res.* 26: 289-299.
- Gregorich, E.G., M.R. Carter, J.W. Doran, C.E. Pankhurst y L.M. Dwyer. 1997. Biological attributes of soil quality. En: Gregorich, E.G. y M.R. Carter (Eds.). *Soil Quality for Crop*

- Production and Ecosystem Health. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. *The Netherland*. pp. 81–113.
- Guimarães, R.M.L., B.C. Ball, C.A. Tormena. 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use Manage.* 27: 395-403.
- Guimarães, R.M.L., B.C. Ball, C.A. Tormena, N.F.B. Giarola, Á.P. Silva. 2013. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management, *Soil Till. Res.* 127: 92-99.
- Hall, A.J., C.M. Rebelle, C.M. Ghersa y J.P. Culot. 1992. Fieldcrop systems of the pampas. En: Pearson, C.J. (Ed.), *Field Crop Ecosystems. Ecosystems of the World 18*. Elsevier, Amsterdam, pp. 413-450
- Hartge, K.H., J. Bachmann y N. Pesci. 1999. Morphological Analysis of Soil Aggregates Using Euler's Polyeder Formula. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 930–933.
- Havlin, J.L., D.E. Kissel, L.D. Maddux, M.M. Claassen, y J.H. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen management. *Soil Biol. Biochem.* 28: 733-738.
- Heard, J., E. Kladivko, J. Mannering. 1988. Soil macroposity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils under long term conservation tillage in Indiana. *Soil Till. Res* 11:1-18.
- Hermawan, B. y K.C. Cameron, 1993. Structural changes in a silt loam under long term conventional or minimum tillage. *Soil Till. Res.* 26: 139-150.
- Hevia, G.G., D.E. Buschiazzo, E.N.P. Hepper, A.M. Urioste y E.L. Antón. 2003. Organic matter in size fractions of soils of semiarid Argentina. Effect of climate, soil texture and management. *Geoderma.* 116: 265-27
- Hill, R., R. Horton y R. Cruse. 1985. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution in two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1264-1270.
- Holtzapffel, T. 1985. Les minéraux argileux: préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord.* 12: 136 p.
- Igwe, C.A., F.O.R. Akamigbo y J.S.C. Mbagwu. 1999. Chemical and mineralogical properties in soils of southeastern Nigeria in relation to aggregate stability. *Geoderma.* 92: 111-123.
- Imhoff, S., A.P. da Silva, y C.A. Tormena. 2000. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.* 35: 1493-1500.
- Imhoff, S., H. Imvinkelried, C. Tormena, y A.P. da Silva. 2009. Field visual analysis of soil structural quality in Argiudolls under different managements. *Ci. Suelo (Argentina).* 27: 247-53.
- Imhoff, S., P.J. Ghiberto, A. Grioni, y J.P. Gay. 2010. Porosity Characterization of Argiudolls under Different Management Systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma.* 158: 268-274.
- Infostat / P v1.1. 2002. InfoStat, v. 1.1. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- INTA, 1974-1997. Colección: Cartas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:50.000. CIRN, INTA, Buenos Aires.
- ISO 11466. 1995. International Standard: Soil quality– Extraction of trace elements soluble in aqua regia, 03–01.
- Jena, A. y K. Gupta. 2002. Determination of pore volume and pore distribution by liquid extrusion porosimetry without using mercury. *Ceramic Engineering & Science Proceedings.* 23: 277–284.

- Jury, W.A., W.R. Gardner y V.H. Gardner. 1991. The soil solid phase. Ed John Wiley y Sons, Inc. Soil Physics. Capitulo 1 (1-33). pp 327.
- Karlen, D. 1990. Soil tilth: a review of past perceptions and future needs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 153-161.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris y G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-14.
- Kay, B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 12:1-52.
- Kay, B.D. y D.A. Angers. 2000. Soil structure. pp. 229-276. En: Sumner, M. (ed.). Handbook of Soil Science. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Klute, A. 1986. Water retention. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Madison, pp. 635-662.
- Kraemer, F.B, C.I. Chagas, H.J.M. Morrás, J. Moreton, M. Paz y L.A. Garibaldi. 2013. Influence of Physical and Chemical Soil Properties on the Adsorption of *Escherichia Coli* in Mollisols and Alfisols of Argentina. *Rev. Int. Cont. Amb.* 29: 7-20.
- Krüger, H. 1996. Compactación en Haplustoles del sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ci. Suelo (Argentina)*. 14:104-106.
- Kutilek, M. 1996. Water relations and water management of Vertisols. In: N. Ahmad y A. Mermut (Ed) Vertisols and technologies for their management. Cap 6. pp 201-230.
- Lado, M., A. Paz, y M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 68: 234-242.
- Lal, R., A. Mahoubi y N. Fausey. 1994. Long-term tillage and rotation effects on properties of a central Ohio soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 517-522.
- Lal, R., D.C. Reicosky y J.D. Hanson. 2007. Evolution of the plow over 10000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Till. Res.* 93: 1-12.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.
- Liesch, A.M., E.S. Krueger y T.E. Ochsner. 2011. Soil structure and physical properties under rye-corn silage double-cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:1307-1314.
- Logsdon, S.D. y D.L. Karlen. 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil Till. Res.* 78: 143-149.
- Madella, M, A.H. Power-Jones y M.K. Jones.1998. A Simple Method of Extraction of Opal Phytoliths from Sediments using a Non-Toxic Heavy Liquid. *Journal of Archaeological Science.* 801-803.
- MAGyP: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. 2012. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Disponible on-line en: <http://www.siiia.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>.
- Mahboubi, A.A. y R. Lal, N.R. Faussey. 1993. Twenty-eight years of tillage effects on two soil in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am J.* 57: 506-512.
- Malley, D.F., P.D. Martin y E. Ben-Dor. 2004. Application in analysis of soils. En: *Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture* (ed. C.A. Roberts), pp. 729-784. Agronomy Monograph 44. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.

- Marquez, C.G. 1985. Propiedades ingenieriles de los suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 243 p.
- Martel, Y.A., C.R. De Kimpe y M.R. Laverdiere. 1978. Cation exchange capacity of clay-rich soils in relation to organic matter, mineral composition, and surface area. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 764-767.
- McGarry, D. y K.W.J. Malafant. 1987. The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 290-297.
- McVay, K.A., J.A. Budde, K. Fabrizzi, M.M. Mikha, C.W. Rice, A.J. Schlegel, D.E. Peterson, D.W. Sweeney, y C. Thompson. 2006. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 434-438.
- Means, R.E. y J.V. Parcher. 1965. Plasticity. En: Physical properties of soils. Prentice-Hall of India Ltd. pp 68-84.
- Micucci, F y M.A. Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycinemax*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86: 152-162.
- Montenegro, G. 1991. Interpretación de las propiedades Físicas del Suelo. En: Seminario-Taller "Fundamentos para la interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego". Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá D.E. Colombia.
- Moraes Sá, J.C. 2002. Rastrojos: El alimento del suelo. En: X Congreso Nacional de AAPRESID. Rosario. 135-138.
- Morel, J., L. Habib, S. Plantureux y A. Guckert. 1991. Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability. *Plant Soil.* 136: 111-119.
- Moret, D. y J.L. Arrúe. 2007. Characterizing soil water-conducting macro- and mesoporosity as influenced by tillage using tension infiltrometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 500-506.
- Morrás, H., 1996. Diferenciación de los sedimentos superficiales de la Región Pampeana en base a los contenidos de fósforo y potasio. VI Reunión Argentina de Sedimentología, Bahía Blanca, 37-42.
- Morrás, H. 2004. Un nuevo esquema de sedimentación y evolución de sedimentos loésicos superficiales en el sur de la Pampa Ondulada en base a criterios mineralógicos. X Reunión Argentina de sedimentología, San Luis, Actas, 108-109.
- Morrás, H., 2014. Porosidad y microestructura de suelos. Manual de Micromorfología de Suelos y Técnicas Complementarias. Capítulo 6. (J.C. Loiza y R. Poch, Eds.). Universidad Nacional de Colombia (en prensa).
- Morrás, H. y L. Candiotti. 1981. Relación entre permeabilidad, ciertos caracteres analíticos y situación topográfica en algunos suelos de los bajos Submeridionales. *Rev. de Investig. Agrop.* 16: 23-32.
- Morrás, H., E. Leyva y G. Píccolo. 1999. Modificaciones de la morfología y porosidad de agregados en un Ultisol bajo diferentes tratamientos culturales (Misiones, Argentina). 148 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile (Editado en CD).
- Morrás, H., C. Iurrtia, C. Ibarlucea, M. Lantin y R. Michelena. 2001. Recuperación de suelos pampeanos degradados mediante siembra directa y subsolado. En: Siembra Directa II (Panigatti, Buschiazzi y Marelli, Eds.). Ediciones del INTA, pp. 263-278.
- Morrás, H., V. Altinier, M. Castiglione, C. Grasticini, G. Ciari, y G. Cruzate. 2002. Composición mineralógica y heterogeneidad espacial de sedimentos loésicos superficiales en la Pampa Ondulada, XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, (Actas en CD).

- Morrás, H., B. Bonel, y R. Michelena. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, (Editado en CD).
- Morrás, H. y B. Bonel. 2005. Microstructure differentiation in a Typic Argiudoll in the Pampean Region of Argentina under conventional and no-till agricultural systems. Two converging pathways to a similar organic matter content. *Geophysical Research Abstracts* 7: 01337.
- Morrás, H., B. Bonel, L. Moretti, E. Favret y E. Bressan. 2008. Porosidad y microestructura superficial de un Argiudol típico bajo siembra directa y labranza reducida. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis (Editado en CD).
- Morrás, H., B. Bonel, P. Fernandez, F. Kraemer y C. Alvarez. 2012. Topsoil microstructural models in no-till Pampean Mollisols of Argentina. Morphology and development. Proceedings of the 14th International Working Meeting on Soil Micromorphology. Lleida, España.
- Mualem, Y. 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. En: *Methods of Soil Analysis, Part 1*. A. Klute, ed. American Society of Agronomy. Madison, WI. pp. 799-823.
- Mueller, L., B.D. Kay, B. Been, C. Hu, Y. Zhang, M. Wolff, F. Eulenstein y U. Schindler. 2008. Visual assessment of soil structure: Part II. Implications of tillage, rotation and traffic on sites in Canada, China and Germany. *Soil Till. Res.* 103: 188–196.
- Mueller, L., G. Shepherd, U. Schindler, B.C. Ball, L.J. Munkholm, V. Hennings, E. Smolentseva, O. Rukhovic, S. Lukin y C. Hu. 2013. Evaluation of soil structure in the frame work of an overall soil quality rating. *Soil Till. Res.* 127: 74–84.
- Mueller, L., U. Schindler, N.R. Fausey y R. Lal. 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability, *Soil Till. Res.* 72: 9-20.
- Mueller L., B.D. Kay, B. Deen, C. Hu, M. Wolff, F. Eulenstein y U. Schindler. 2009. Visual assessment of soil structure: Part II. Implications of tillage, rotation and traffic on sites in Canada, China and Germany. *Soil Till. Res.* 103: 188-196.
- Murphy, B.W., M.H. Crawford, D.A. Duncan, D.C. McKenzie y T.B. Koen. 2013. The use of visual soil assessment schemes to evaluate surface structure in a soil monitoring program. *Soil Till. Res.* 127: 3–12.
- Musso, T.B., M.P. Cantú y A. Becker. 2004. Efecto de distintos sistemas de labranza y de fertilización sobre el contenido de carbono orgánico, N total y el pH de un Hapludol típico del sur de Córdoba. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 10 pp.
- Nagpal, N.K., L. Boersma y L.W DeBacker. 1972. Pore size distributions of soils from mercury intrusion porosimeter data. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 264–267.
- Nearing, M.A., L.J. Lane, E.E. Alberts y J.M. Laflen. 1990. Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs. *Soil Sci. Soc. Am J.* 54:1702-1711.
- Nesmith, D.S., D.E. Radcliffe, W.L. Hargrove, R.L. Clark, E.W. Tollner. 1987. Soil compaction in double-cropped wheat and soybeans on an Ultisol. *Soil Sci. Soc. Am J.* 51: 183-186.
- Nettleton, W., F. Peterson y G. Borst. 1983. Micromorphological evidence of turbation in Vertisols and soils in vertic subgroups. In *Soil Micromorphology* (Bullock and Murphy, editors) Vol.2: Soil Genesis: 441-458.
- Novelli, L.E, O.P. Caviglia y R.J.M. Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma.* 167-168: 254-260.

- Novelli, L.E., O.P. Caviglia, M.G. Wilson y M.C. Sasal. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*. 195–196: 260–267.
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56: 377-400.
- Olness, A., C.E. Clapp, R. Liu, A.J. Palazzo. 1998. Biosolids and their effects on soil properties. En: Wallace, A., Terry, R.E. (Eds.), *Handbook of Soil Conditioners*. New York, NY, pp. 141–165.
- Olszewski, N., L.M. Costa, E.I. Fernandes Filho, H.A. Ruiz, R.C. Alvarenga y J.C. Cruz. 2004. Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 28: 901-909.
- Or, D. y J.M. Wraith. 2000. Soil water content and water potential relationships. En: *Handbook of Soil Science*. CRC Press, New York, pp. 53-85.
- Oussible, M., R.K. Crookston y W.E. Larson. 1992. Subsurface compactation reduce the root and the shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.* 84: 34-38.
- Pachepsky, Y.A., D. Timlin, y D. Varallyay. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 60: 727-733
- Pagliai, M. y M. De Nobili. 1993. Relationships between soil porosity, root development and soil enzyme activity in cultivated soils. *Geoderma*. 56: 243-256
- Pagliai, M., M. La Marca, y G. Lucamante. 1983. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage. *J. Soil. Sci.* 34: 391-403.
- Parker, J.C., D.F. Amos y L.W. Zelazny. 1982. Water adsorption and swelling of clay minerals in soil systems. *Soil Sci. Soc. Am J.* 46: 450-456.
- Parker, J.C., D.F. Amos y D.L. Kaster. 1977. An evaluation of several methods of estimating soil volume change. *Soil Sci. Soc. Am J.* 41: 1059-1064.
- Pecorari, C., J. Guerif y P. Stengel. 1990. Fitólitos en los suelos pampeanos argentinos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de los mecanismos elementales de la evolución de la estructura. *Ci. Suelo (Argentina)*. 8: 135-141.
- Peerlkamp, P.K. 1959. A visual method of soil structure evaluation. Meded. v.d. Landbouwhogeschool en Opzoekingsstations van de Staat te Gent. XXIV No. 24, pp. 216–221.
- Perfect, E., B.D. Kay, W.K.P. van Loon, R.W. Sheard y T. Pojasok. 1990. Factors influencing soil structural stability within a growing season. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:173-179.
- Pierce, F.J., W.E. Larson, R.H. Dowdy. 1984. Soil loss tolerance: maintenance of long-term soil productivity. *J. Soil Water Conserv.* 39: 136–138.
- Pognante, J., M. Bragachini y C. Casini. 2011. Siembra directa. INTA Actualización Técnica n 58.
- Porta, J., M. Lopez-Acevedo y C. Roquero.1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid: Ed: Mundiprensa pp. 39-48.
- Puckett, W.E, J.H. Dane y B.F. Hajek. 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 831-836.
- Quiroga, A., O. Ormeño, y N. Peinemann. 1998. Efecto de la siembra directa sobre propiedades físicas de los suelos. En: *Siembra Directa (Panigatti, Marelli, Buschiazzo y Gil, Eds.)*, Editorial Hemisferio Sur-INTA, pp. 57-63.

- Quiroga, A.R., M. Monsalvo, D.E. Buschiazzo y E. Adema. 1996a. Labranzas en la región semiárida Pampeana central. En: Buschiazzo, D.E., Panigatti, J.L., Babinec, F. (Eds.), Labranzas en la Región Semiárida Argentina. INTA y SAPyA, Santa Rosa, Argentina, pp. 80-92.
- Quiroga, A.R., D.E. Buschiazzo y N. Peinemann. 1996b. Soil organic matter particle size fractions in soils of Semiarid Argentinian Pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Quiroga, A.R., D.O. Funaro, R. Fernández y E.J. Noellemeyer. 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la región pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)* 23:79-86.
- Ralisch, R y J. Tavares Filho. 2002. Compactação do solo em sistema de plantio direto – causas, efeitos e prevenção. En: Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha, 8, 2002, Águas de Lindóia. Ponta Grossa: Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. p.125-127.
- Ramírez, R., M.A. Taboada y R. Gil. 2006. Efectos a largo plazo de la labranza convencional y la siembra directa sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico de la Pampa ondulada argentina. *Rev. Fac. Nacio. Agron. Medellín.* 59: 3237-3256.
- Rawls, W.J., T.J. Gish y D.L. Brakensiek. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties characteristics. *Adv. Soil Sci.* 16: 213-234.
- Restovich, S.B., M.J. Torti, D.A. Colombini y A.E. Andriulo. 2010. Evolución de algunas propiedades físicas y químicas edáficas durante la implementación de cultivos de cobertura en la secuencia soja maíz. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario.
- Reynolds, W.D., B.T. Bowman, C.F. Drury, C.S. Tana y X Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma.* 110: 131-146.
- Reynolds, W.D., C.F. Drury, C.S. Tan, C.A. Fox, y X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma.* 152: 252-263.
- Reynolds, W.D., C.F. Drury, X.M. Yang, y C.S. Tan. 2008. Optimal Soil Physical Quality Inferred through Structural Regression and Parameter Interactions. *Geoderma.* 146: 466–74.
- Richards, L.A. 1965. Physical condition of water in soil. En: C.A. Black (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Properties Including Statistics of Measurement and Sampling. Agronomy 9. Am. Soc. Agron., Madison, WI, pp. 128-152.
- Robert, M. 1975. Principes de détermination qualitative des minéraux argileux á l'aide des rayons X. *Annales Agronomiques.* 26: 363-399.
- Rubio, G., C. Mosca, M.F. Varela, C. Scianca y M.A. Taboada. 2012. Estructura de suelos arenosos bajo cultivos de cobertura. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Mar del Plata.
- Salinas-García, J.R., F.M. Hons y J.E. Motocha. 1997. Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 152-159.
- Sanford, J.O. 1982. Straw and tillage management practices in soybean wheat double cropping. *Agron. J.* 74: 1032-1035.
- Sanzano, G. A.; R. D. Corbella; J. R. García y G. S. Fadda. 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ci. Suelo (Argentina).* 23: 93-100.
- Sasal, C. 2012. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Tesis Doctoral. Área Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados. FAUBA. Pp 144.

- Sasal, C., A. Andriulo y M. Taboada. 2004. Orientación de poros en Argiudoles bajo siembra directa continua. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, (editado en CD).
- Sasal, C., A. Andriulo y M. Taboada. 2006. Soil Porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in argentinian pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Sasal, M.C., M.G. Castiglioni y M.G. Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
- Schjønning, P., L.J. Munkholm, P. Moldrup y O.H. Jacobsen. 2002. Modeling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long-term effects of fertilization and crop rotation. *Eur. J. Soil Sci.* 53: 331-339.
- Schmidt, E., N. Amiotti y O. Bravo. 2006. Indicadores de pérdida de calidad de suelos bajo siembra directa continúa en la Pampa semiárida. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta (editado en CD).
- Scott, R., R. Cannell, M. Goss. 1975. Effects of direct drilling on soil conditions and root growth. *Outlook on Agriculture.* 8: 227-232.
- Seed, J.R., R.J. Woodward y R. Lundgren. 1963. Prediction of swelling potential for compacted clays. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.* 128: 1443-1477.
- Senigagliesi, C. y M. Ferrari. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. En: Buxton, D. et al Eds. International crops science I. Madison, Wis., Crop Sci. Soc. Am., Inc., pp. 27-35.
- Shahab, H., H. Emami, G.H. Hagnia y A. Karimi. 2013. Pore size distribution as a soil physical quality index for agricultural and pasture soils in northeastern Iran. *Pedosphere.* 23: 312-20.
- Shepherd, T.G. 2000. Visual soil assessment. V.1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. Horizons & Landcare Research, Palmerston North, New Zealand, 118 pp.
- Shepherd, T.G. 2009. Visual Soil Assessment. Volume 1. Field Guide for Pastoral Grazing and Cropping on Flat to Rolling Country, 2nd ed., Horizons Regional Council, Palmerston North, New Zealand, 118 pp.
- Shepherd, T.G. y S.C Park. 2003. Visual soil assessment: a management tool for dairy farmers. En: Brookes, I.M. (Ed.), Proceedings of the 1st. Dairy 3 Conf. Continuing Massey University Dairy farming Annual (Vol 55) Dexcel's Ruakura Dairyfarmers' Conf. April 7-9, Rotorua, pp. 111-123.
- Shipitalo, M.J. y R. Protz. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Canadian J. Soil Sci.* 67: 445-456.
- Silva, A.P., C.A. Tormena y S. Imhoff. Intervalo hídrico ótimo. 2001. En: Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo. Editora Funep, Piracicaba. p. 1-20.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, K. Deneff. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79: 7-31.
- SMN (Servicio meteorológico Nacional). <http://www.smn.gov.ar/> Consultado el 4 de Julio de 2012.
- Snedecor G.W. y W.G. Cochran. 1980. Statistical methods, 7th Ed. Iowa University Press.
- Soane, B, P. Blackwell, J. Dickson y D. Painter. 1982. Compaction by Agricultural Vehicles: A Review. Scottish Institute of Agricultural Engineering Tec. Report N 5.
- Soares, C.R.F.S., J.O. Siqueira, J.G. Carvalho y F.M.S Moreira. 2005. Fitotoxicidade de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *Euophylla* em solução nutritiva. *R. Árvore.* 29: 175-183.

- Soil Conservation Service, 1972. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soils samples, Soil Survey, Report 1. United States Department of Agriculture, Washington.
- Soil Survey Staff. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Sollins, P., P. Homann y B.A. Cadwell. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*. 74: 65-105.
- Steinbach, H.S. y R. Alvarez. 2006. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in Pampean Agroecosystems. *J. Environ. Qual.* 35: 3-13.
- Stengel P. 1979. Utilization de l'analyse des systèmes de porosité pour la caracterization de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.* 30: 27-51.
- Stengel, P. 1988. Análisis de la porosidad en horizontes de un suelo Brunizem en distintas condiciones de manejo y su relación con el crecimiento de las raíces de Maíz. I.T. N° 211. INTA Pergamino.
- Stengel, P., J. Douglas, J. Guerif, M. Gross, R. Monnier y R. Cannel. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drill. *Soil Till. Res.* 4: 35-53.
- Stern, R., M. Ben-Hur y I. Shainberg. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Sci.* 152: 455-462.
- Stone, L.F., C.M. Guimarães y J.A.A. Moreira. 2002. Comparação do solo na cultura do feijoeiro - I: Efeitos nas propriedades físicas-hídricas do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 6: 207-212.
- Stoops, G. 2003. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 184 p.
- Stotzky, G. 1985. Mechanisms of adhesion to clays, with referente to soil systems. En: Bacterial Adhesion: Mechanisms and Physiological Significance (Savage, D.C. y M.H. Fletcher, Eds.) New York, N.Y.: Plenum Publishing. Pp. 195-253
- Studdert, G.A. y H.E. Echeverria. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1496-1503.
- Taboada, M.A. y R.S. Lavado (Ed.). 2009. Alteraciones de la Fertilidad de los Suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. Editorial Facultad Agronomía. Universidad de Buenos Aires, 160 p. ISBN 978-950-29-1162-5.
- Taboada, M.A., F.G. Micucci, D.J. Cosentino y R.S. Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.* 49: 57-63.
- Taboada, M.A., O.A. Barbosa y D.J. Cosentino. 2008. Null creation of airfilled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *J. Soil Sci.* 173: 130-142.
- Taboada, M.A., R.S. Lavado, G. Rubio y D.J. Cosentino. 2001. Soil volumetric changes in natric soils caused by air entrapment following seasonal ponding and water table. *Geoderma*. 101: 49-64.
- Taboada, M.A.; O. A. Barbosa; M. B. Rodríguez y D. J. Cosentino. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma*. 123: 233-244.
- Taboada-Castro, M.M., M.L. Rodríguez-Blanco, M.T. Taboada-Castro y J.L. Oropeza-Mota. 2011. Vulnerabilidad estructural en suelos de textura gruesa bajo cultivo y huerta. *Terra Latinoamericana*. 29: 11-21.

- Tardieu, F. 1984. Influence du profil cultural sur l'enracinement du maïs. Thèse. DDI,INA-PG. Paris.
- Tessier, D. 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux, Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. These Doctorat Sciences, Université Paris VII, 361p.
- Thompson, M.L., H. Zhang, M. Kazemi y J.A. Sandor. 1989. Contribution of organic matter to cation exchange capacity and specific surface area of fractionated soil materials. *J. Soil Sci* 148: 250-257.
- Tisdall, J.M. y J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 62: 141-163.
- Urricariet, S. y R.S. Lavado. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *Ci. Suelo (Argentina)*. 17: 37-44.
- Utomo, W.H. y Dexter, A.R. 1982. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. *Soil Sci.* 33: 623- 637.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, y S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065.
- Van Stiphout, T.P.J., H.A.J. Van Lanen, O.H. Bodersma y J. Bouma. 1987. The effect of bypass flow and internal catchment of rain on the water regime in a clay loam grassland soil. *J. Hydrol.* 95: 1-11.
- VandenBygaart, A., R. Protz, A. Tomlin, y J. Miller. 1999. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loam soils of southwestern Ontario. *Soil Till. Res.* 51: 139-149.
- Vaquero, F. 2011. Contribución de las lombrices de tierra (Annelida: Oligochaeta) a los procesos ecosistémicos en suelos agrícolas. Trabajo Final - Licenciatura en Ciencias Biológicas. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Río Cuarto. pp. 45.
- Varadachari, Ch., A. Mondal y K. Ghosh. 1995. The influence of crystal edges on Clay-Humus Complexation. *Soil Sci.* 159: 185-190.
- Varela, M.F., P.L. Fernández, C. Alvarez, C. Scianca y G. Rubio. 2010. Propiedades físicas que varían por la incorporación de cultivos de cobertura en Hapludoles franco arenosos. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario.
- Vidal, C. y J. Costa. 2000. Evaluación de algunas propiedades físicas en sistemas de labranza reducida y siembra directa. *RIA.* 29: 61-68.
- Viglizzo, E.F., F.C. Frank, L.V. Carreno, E.G. Jobbágy, H. Pereyra, J. Clatt, D. Pincén y M.F. Ricard. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biol.* 17: 959-973.
- Voorhees, W.B. y M.J. Lindstrom. 1984. Long-term effects of tillage method on soil filth independent of wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 152-156.
- Walkley, A. y A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wall, L. G. 2011. The BIOSPAS Consortium: Soil Biology and Agricultural Production. En: Handbook of Molecular Microbial Ecology I (F.J. de Bruijn, Ed.) 299-306. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.

- Wallace, A. y R.E. Terry. 1998. Soil conditioners, soil quality and soil sustainability. pp 1-41. En: A. Wallace y R.E. Terry (Ed.) Handbook of soil conditioners. Marcel Dekker, Inc. New York, NY.
- Wander, M. M. 2004. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. En Magdoff, F., Weil, R.: Advances in Agroecology. CRC, Boca Raton, FL, USA, pp. 67-102.
- Wander, M.R. y G.A. Bollero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts of Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961-971.
- Watson, K.W. y R.J. Luxmoore. 1986. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 578-582.
- White, R.E. 2006. Principles and practice of soil science. 4th ed. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Wilson, M., J. Oszust, C. Sasal y A. Paz Gonzales. 2010. Variación espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con estados estructurales del suelo bajo distintas secuencias de cultivos. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario.
- Wischmeier, W.H., C.B. Johnson y B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26: 189-193.
- Yule, D.F. y J.T. Ritchie. 1980. Soil shrinkage relationships of texas vertisols: I. Small cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1285-1291.
- Zaccagnini, M. y N. Calamari. 2001. Labranzas conservacionistas, siembra directa y Biodiversidad. En: Siembra Directa II (Panigatti, Buschiazzo y Marelli, Eds.). Ediciones del INTA, pp. 29-68.
- Zucol, A. y M.L. Osterrieth. 2002 Técnicas de Preparación de Muestras para la Extracción de Fitolitos. *Ameghiniana.* 39: 379-382.

ANEXOS

Tabla A.1. Correlación de Pearson entre las variables composicionales evaluadas. No se presentan las determinaciones de hierro. *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

	Arcilla (<2 µm)	Limo (2-50 µm)	Arena (>50 µm)	CE	pH	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	CIC	PSI	SB	HE	COT	Dp	Lp	LI	Ip	AA	E+I/E	Illita	Caolinita	LBD	
Arcilla (<2 µm)	1																							
Limo (2-50 µm)	0,4*	1																						
Arena (>50 µm)	-0,82***	-0,86***	1																					
CE	0,75***	0,17	-0,53***	1																				
pH	0,32	-0,01	-0,17	-0,02	1																			
Ca ⁺²	0,82***	0,26	-0,62***	0,61***	0,55***	1																		
Mg ⁺²	0,80***	0,33	-0,66***	0,72***	0,25	0,58***	1																	
Na ⁺	0,47**	-0,23	-0,12	0,42	0,08	0,25	0,33	1																
K ⁺	-0,49**	-0,22	0,41	-0,13	-0,34*	-0,38	-0,33	-0,37*	1															
CIC	0,93***	0,40*	-0,78***	0,81***	0,33	0,87***	0,79***	0,39*	-0,3	1														
PSI	-0,46*	-0,73***	0,72***	-0,34*	-0,16	-0,51**	-0,42*	0,49*	0,02	-0,56**	1													
SB	-0,36	-0,57***	0,56**	-0,43*	0,44*	0,07	-0,35*	-0,13	0,03	-0,37*	0,38	1												
HE	0,79***	0,22	-0,59**	0,72***	0,36*	0,71***	0,71***	0,43*	-0,20	0,83***	-0,33	-0,22	1											
COT	0,56***	0,41*	-0,63***	0,51**	0,17	0,51**	0,5*	0,1	0,05	0,65***	-0,50*	-0,41*	0,62***	1										
Dp	-0,39**	-0,51**	0,54**	-0,22	-0,13	-0,28	-0,38*	-0,1	0,36*	-0,38*	0,37*	0,31	-0,21	-0,16	1									
Lp	0,80***	0,53**	-0,78***	0,61***	0,32	0,78***	0,57**	0,12	-0,19	0,82***	-0,65***	-0,32	0,71***	0,81***	-0,34*	1								
LI	0,96***	0,36*	-0,77***	0,78***	0,35*	0,83***	0,81**	0,44*	-0,36*	0,94***	-0,46**	-0,33	0,88***	0,70***	-0,31	0,84***	1							
Ip	0,92***	0,22	-0,66***	0,77***	0,32	0,75***	0,84***	0,55**	-0,40*	0,89***	-0,29	-0,29	0,86***	0,54**	-0,25	0,65**	0,96***	1						
AA	0,43**	-0,18	-0,13	0,54**	0,12	0,31	0,56**	0,54**	-0,04	0,45*	0,16	-0,07	0,62***	0,33*	0,13	0,17	0,58**	0,73***	1					
E+I/E	0,81***	-0,01	-0,45*	0,69***	0,51**	0,74***	0,75***	0,64***	-0,42*	0,83***	-0,14	-0,1	0,78***	0,38*	-0,23	0,52*	0,83***	0,88***	0,61***	1				
Illita	-0,80***	0,01	0,45*	-0,68***	-0,52**	-0,75***	-0,74***	-0,64***	0,42*	-0,83***	0,13	0,09	-0,78***	-0,39*	0,23	-0,52*	-0,82***	-0,88***	-0,61***	0,99***	1			
Caolinita	-0,79***	0,00	0,45	-0,67**	-0,41*	-0,68***	-0,73***	-0,59**	0,37*	-0,81***	0,20	0,19	-0,70***	-0,28	0,2	-0,47*	-0,77***	-0,84***	-0,56**	-0,93	0,92***	1		
LBD	0,49**	0,48**	-0,59***	0,23	0,05	0,17	0,52**	0,25	-0,35*	0,37*	-0,22	-0,39*	0,33	0,28	-0,40*	0,27	0,44*	0,47**	0,26	0,34	-0,33	-0,08*	1	

CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, COT: carbono orgánico total, Dp: densidad de partícula, Lp: límite plástico, LI: límite líquido, Ip: índice de plasticidad, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificadas illita-esmectita, LBD: limos de baja densidad.

Tabla A.2. Correlación (Pearson) entre las variables medidas mediante la curva de contracción de agregados (1-5 cm). Pendiente, ordenada al origen: ordenada: Vmax: volumen máximo, Vmin: volumen mínimo, ΔVol: Diferencia entre Vmax y Vmin, θ max: humedad gravimétrica máxima) y las variables físicas, químicas, reológicas y mineralógicas.

Variables edáficas	Pendiente	Ordenada	Vmax	Vmin	ΔVol	θ max
Arcilla (<2 μm)	0,98***	-0,9***	0,46ns	-0,84***	0,85***	0,64*
Limo (2-50 μm)	0,41ns	-0,54ns	-0,21ns	-0,41ns	0,09ns	0,08ns
Arena (>50 μm)	-0,80**	0,83***	-0,13ns	0,72***	-0,53ns	-0,41ns
CE	0,87***	-0,76**	0,39ns	-0,69*	0,72**	0,47ns
pH	0,37ns	-0,15ns	0,68*	-0,16ns	0,59*	0,64*
Ca ⁺²	0,91***	-0,78**	0,61*	-0,76**	0,91***	0,72**
Mg ⁺²	0,88***	-0,82**	0,31ns	-0,7*	0,67*	0,47ns
Na ⁺	0,53ns	-0,41ns	0,48ns	-0,42ns	0,61*	0,46ns
K ⁺	-0,45ns	0,48ns	-0,14ns	0,55ns	-0,43ns	-0,39ns
CIC	0,96***	-0,85***	0,53ns	-0,76**	0,86***	0,66*
PSI	-0,51ns	0,54ns	0,01ns	0,46ns	-0,27ns	-0,18ns
SB	-0,59*	0,68*	0,07ns	0,5ns	-0,26ns	-0,16ns
HE	0,92***	-0,71*	0,74**	-0,61*	0,91***	0,84***
COT	0,62*	-0,50ns	0,48ns	-0,24ns	0,5ns	0,56ns
Dp	-0,31ns	0,50ns	0,33ns	0,45ns	-0,05ns	0,11ns
Lp	0,81**	-0,72**	0,48ns	-0,53ns	0,68*	0,64*
Ll	0,97***	-0,86***	0,57ns	-0,74**	0,88***	0,71**
Ip	0,96***	-0,85***	0,56ns	-0,79**	0,90***	0,68*
AA	0,59*	-0,48ns	0,5ns	-0,42ns	0,63*	0,45ns
E+I/E	0,84***	-0,65*	0,68*	-0,63*	0,90***	0,71*
Illita	-0,83***	0,64*	-0,7*	0,62*	-0,90***	-0,71**
Caolinita	-0,85***	0,69*	-0,59*	0,69*	-0,87***	-0,62*
LBD	-0,81**	0,80**	-0,30ns	0,81**	-0,71**	-0,48ns
CP1_suelo	0,97***	-0,86***	0,53ns	-0,75**	0,85***	0,69*
CP2_suelo	-0,08ns	-0,13ns	-0,54ns	-0,05ns	-0,37ns	-0,32ns

CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, COT: carbono orgánico total, Lp: límite plástico, Ll: límite líquido, Ip: índice de plasticidad, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificados illita-esmectita, LBD: limos de baja densidad.

Tabla A.3 Correlaciones (Pearson) entre la densidad aparente (DAP) y la resistencia a la penetración ($RP_{corr \theta}$) y las propiedades del suelo, fracciones de carbono orgánico y estabilidad estructural para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Se presentan las correlaciones para todos los suelos y para todos los suelos sin el suelo Hapludert -sin Hapludert-. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

	DAP						$RP_{corr \theta}$					
	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm		0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm	
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert
Propiedades del suelo												
Cp1_suelo					-0,39 *					-0,64 ***		-0,73 ***
Cp2_suelo	0,39 *											
Arcilla		0,40 *							-0,69 ***	-0,48 *	-0,70 ***	-0,74 ***
Limo		0,47 *							-0,49 **	-0,53 **	-0,72 ***	-0,65 ***
Arena		-0,47 *							0,70 ***	0,54 **	0,75 ***	0,83 ***
CE								0,47 *	-0,42 *			-0,55 ***
pH												
Ca ²⁺			-0,34 *		-0,43 *				-0,42 *			-0,49 **
Na ⁺	-0,46 **								-0,52 **			-0,37 *
CIC					-0,45 **				-0,54 ***		-0,40 *	-0,64 ***
PSI												0,35 *
SB									0,40 *	0,42 *	0,61 ***	0,48 **
HE					-0,41 *				-0,50 **			-0,58 ***
Lp									-0,52 ***		-0,52 **	-0,63 ***
Ll					-0,38 *				-0,67 ***	-0,43 *	-0,67 ***	-0,73 ***
Ip	-0,34 *				-0,37 *				-0,66 ***	-0,48 *	-0,65 ***	-0,68 ***
AA	-0,46 **	-0,42 *							-0,40 *			-0,37 *
E+I/E	-0,44 **		-0,45 *		-0,53 **				-0,49 **	0,45 *	0,56 **	-0,46 **
LBD									-0,55 ***	-0,44 *	-0,48 *	-0,57 ***
Fracciones de carbono orgánico												
COT			-0,41 *		-0,40 *				0,50 **	-0,56 ***	-0,53 **	-0,64 ***
COPg	-0,40 *		-0,40 *		-0,35 *				0,52 **			
COPf	-0,39 *				-0,34 *				0,51 **			
COM			-0,36 *		-0,35 *				-0,64 ***	-0,44 *	-0,63 ***	-0,70 ***
CHt								0,51 **	0,52 *			-0,54 **
CHs								0,57 ***	0,57 **			

CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, Lp: límite plástico, Ll: límite líquido, Ip: índice plástico, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificadas illita-esmectita, LBD: limo de baja densidad, COT: carbono orgánico total, COPg: Carbono orgánico particulado grueso, COPf: carbono orgánico particulado fino, COM: carbono orgánico mineralizable, CHt: hidratos de carbono total y CHs: hidratos de carbono soluble.

Tabla A.4. Correlaciones (Pearson) entre la porosidad total (PT), la porosidad estructural (Pestr) y la porosidad textural (Ptx) y las propiedades del suelo, fracciones de carbono orgánico y estabilidad estructural para las profundidades 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Se presentan las correlaciones para todos los suelos y para todos los suelos sin el suelo Hapludert -sin Hapludert-. * p<0,05; ** p<0,01, *p<0,001.

	PT						P _{estr}					
	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm		0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm	
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert
Propiedades del suelo												
CP1_suelo							0,50 **		0,48 **		0,50 **	
CP2_suelo	-0,46 **		-0,41 **		-0,36 *							
Arcilla		-0,53 **		-0,50 **		-0,57 **	0,56 ***			0,53 *		0,57 ***
Limo	-0,46 **	-0,60 ***	-0,42 *	-0,48 *	-0,34 *	-0,43 *						
Arena		0,61 ***		0,50 **		0,49 **						
CE							0,45 **			0,49 **		0,43 *
pH												
Ca ⁺²		-0,48 *					0,45 **			0,53 **		0,52 **
Na ⁺	0,46 **						0,57 ***			0,41 *		0,51 **
CIC		-0,49 **		-0,40 *			0,52 **			0,56 ***		0,56 ***
PSI	0,37 *	0,47 *										
SB		0,47 *		0,41 *								
HE				-0,58 **			0,37 *	-0,50 **	-0,61 **		0,40 *	-0,41 *
Lp		-0,42 *		-0,39 *		-0,39 *						
LI				-0,45 *		-0,48 *	0,51 **		-0,43 *	0,47 **	0,50 ***	
Ip						-0,46 *	0,59 ***		-0,42 *	0,55 ***	0,58 ***	
AA	0,38 *						0,37 *					
E+I/E	0,34 *				0,39 *		0,67 ***				0,67 ***	
LBD							0,37 *					
Fracciones de carbono orgánico												
COT							0,34 *					-0,41 *
COP _g								-0,44 *	-0,57 **			-0,55 **
COP _f									-0,50 *			-0,46 *
COM							0,38 *			0,39 *	0,36 *	
CH _t	-0,34 *		-0,36 *		-0,36 *		-0,62 ***		-0,42 *	-0,64 ***	-0,66 ***	-0,42 *
CH _s									-0,41 *	-0,38 *	-0,38 *	-0,41 *

CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, HE: humedad equivalente, Lp: límite plástico, LI: límite líquido, Ip: índice plástico, AA: actividad de arcillas, E+I/E: esmectitas más interstratificadas illita-esmectita, LBD: limo de baja densidad, COT: carbono orgánico total, COP_g: Carbono orgánico particulado grueso, COP_f: carbono orgánico particulado fino, COM: carbono orgánico mineralizable, CH_t: hidratos de carbono total y CH_s: hidratos de carbono soluble.

Tabla A.5. Valores promedio de las variables de tamaño de poros (P_{Mac} : Macroporosidad para >1000 , 300 y $50 \mu m$ y P_{Mic} : Microporosidad para $<50 \mu m$ para los tratamientos Ambiente Natural (AN), Buenas Prácticas (BP) y Malas Prácticas (MP) para las para los suelos, Haplustol, Argiudol – Monte Buey -, Argiudol -Pergamino- y Hapludert, para cada profundidad evaluada, 0-5, 5-10 y 10-20 cm. †Error estándar.

Sitio	Prof. (cm)	Tratamiento	$P_{Mac} >1000 \mu m$		$P_{Mac} >300 \mu m$		$P_{Mac} >50 \mu m$		$P_{Mic} <50 \mu m$	
			$m^3 m^{-3}$							
Haplustol	0-5	AN	0,0441	0,0065†	0,1158	0,0136	0,3013	0,0218	0,4288	0,0126
		BP	0,0093	0,0012	0,0336	0,0031	0,1711	0,0089	0,45	0,0288
		MP	0,0121	0,007	0,0398	0,0197	0,17	0,0413	0,3834	0,0124
	5-10	AN	0,0645	0,0308	0,1419	0,0426	0,3303	0,0298	0,3919	0,0631
		BP	0,011	0,0022	0,0389	0,0066	0,1862	0,0176	0,5027	0,0126
		MP	0,0081	0,0013	0,0298	0,0041	0,1544	0,0122	0,4116	0,0108
	10-20	AN	0,0151	0,0058	0,0497	0,0159	0,2042	0,0313	0,4519	0,0049
		BP	0,0371	0,0291	0,0807	0,0505	0,2236	0,0529	0,4144	0,0719
		MP	0,0186	0,0142	0,0482	0,0311	0,1567	0,0457	0,3345	0,0438
Argiudol Monte Buey	0-5	AN	0,0516	0,0181	0,14	0,0313	0,3558	0,0496	0,3278	0,0285
		BP	0,0164	0,0057	0,0616	0,0081	0,2244	0,0388	0,4718	0,027
		MP	0,0031	0,0013	0,017	0,0057	0,1503	0,0444	0,3489	0,0109
	5-10	AN	0,0076	0,0016	0,0377	0,0077	0,2003	0,0256	0,4689	0,008
		BP	0,0065	0,0031	0,0254	0,0072	0,1194	0,0165	0,4285	0,0314
		MP	0,0037	0,0005	0,0151	0,0013	0,0878	0,0129	0,3738	0,0049
	10-20	AN	0,0029	0,0012	0,0141	0,0021	0,1197	0,0409	0,4219	0,0384
		BP	0,0217	0,0089	0,057	0,0171	0,1463	0,0188	0,2915	0,0045
		MP	0,0042	0,0015	0,0169	0,0047	0,0909	0,0093	0,3468	0,034
Argiudol Pergamino	0-5	AN	0,0259	0,0027	0,0727	0,0127	0,2093	0,0648	0,3678	0,0732
		BP	0,0099	0,0045	0,0309	0,013	0,1274	0,0357	0,4889	0,0312
		MP	0,0041	0,0017	0,0173	0,0046	0,136	0,0144	0,4159	0,0493
	5-10	AN	0,0484	0,0083	0,0964	0,0179	0,1964	0,0379	0,4422	0,0346
		BP	0,0028	0,0006	0,0111	0,0011	0,0833	0,0049	0,4682	0,0082
		MP	0,0036	0,0017	0,0145	0,0055	0,1082	0,0063	0,449	0,0122
	10-20	AN	0,0186	0,0045	0,0453	0,0084	0,1194	0,0113	0,4142	0,0053
		BP	0,0018	0,0006	0,0082	0,0028	0,0643	0,0154	0,3952	0,0229
		MP	0,0091	0,0019	0,0313	0,0032	0,1323	0,0038	0,4284	0,0089
Hapludert	0-5	AN	0,0143	0,0003	0,054	0,0028	0,1804	0,0165	0,3855	0,0104
		BP	0,0351	0,0124	0,0912	0,0229	0,2458	0,0442	0,5682	0,0536
		MP	0,0176	0,0016	0,0551	0,0017	0,1643	0,0108	0,4292	0,0306
	5-10	AN	0,0369	0,0181	0,0822	0,0225	0,1978	0,0253	0,485	0,0212
		BP	0,017	0,0046	0,0471	0,0093	0,1513	0,0209	0,5902	0,0422
		MP	0,0118	0,0032	0,0338	0,0074	0,1105	0,0175	0,4701	0,0216
	10-20	AN	0,0209	0,0042	0,0528	0,0041	0,1362	0,0116	0,519	0,0264
		BP	0,0286	0,0139	0,076	0,0316	0,2136	0,0615	0,5116	0,0621
		MP	0,0135	0,004	0,0335	0,0087	0,0945	0,0161	0,4778	0,0189

Tabla A.6. Características micromorfológicas de la masa basal de los cuatro suelos estudiados.

	<i>Haplustol</i>	<i>Argiudol</i> (<i>Monte Buey</i>)	<i>Argiudol</i> (<i>Pergamino</i>)	<i>Hapludert</i>
Fracción gruesa	Distribución al azar. Granos eu-, sub- y anhedrales. Cuarzo y feldespatos, hornblendas (c), micas. Entre 40-100 um; tamaño frecuente 80 um	Distribución al azar. Granos suhedrales. Cuarzo y feldespatos, micas (c), vidrios volc. (r), fitolitos. Tamaño frecuente 50 um	Distribución al azar. Granos eu-, subhedrales. Cuarzo, feldespatos; plagioclasas (algunas sericitizadas) (c). Hornblendas (o), piroxenos (o), micas (c). Entre 20-100 um. Tamaño frecuente 60 um	Distribución al azar. Curazo, feldespatos Dominancia de granos pequeños Tamaño frecuente 40 um; escasa proporción de granos más gruesos (tendencia bimodal)
Relación g/f	90/10	80/20	75/25	60/40
Fracción fina	Micromasa organo-mineral; pardo-rojiza	Micromasa organo-mineral; pardo-rojiza	Micromasa organo-mineral; pardo-rojiza	Micromasa organo-mineral; pardo-oscura
Fábrica-b	Indiferenciada	Indiferenciada	Indiferenciada	Indiferenciada
Distribución relacionada	Enáulica fina, quitónica y porfírica	Porfírica de espaciado simple.	Porfírica de espaciado simple.	Porfírica de espaciado doble

Tabla A.7. Síntesis de las características microestructurales de los tratamientos AN, BP y MP de a) Haplustol, b) Argiudol (Monte Buey), c) Argiudol (Pergamino) y d) Hapludert.

a)

Trat. de Manejo	Prof. (cm)	Agregados	Porosidad	Excrementos	Mat. Org.	Microestructura	Modelo estructural
AN	0-5	I-Gránulos (1,5 cm de espesor) II-Gránulos coalescentes	I-Poros de empaq. complejo (f). Canales (f) II- Canales (f). Cavidades y fisuras curvas horizontales	Rellenando canales y en la m.b.; diam. aprox. 200 µm (m,f.)	Restos humif variados (f) en la m.b y en canales. Restos filamentosos en la m.b. de aprox. 60 µm de espesor y 2 mm de largo (c)	I-Granular II-De cavidades y canales	Bioconstruido
BP	0-5	I-Gránulos II-Láminas 1-2 cm espesor (interior denso)	I-Poros de empaquet. compuesto entre gránulos y restos veg II-Fisuras horizontales 600 µm ancho (f). Canales (o-c) Parte superior: Fisuras horizontales 300-700 µm ancho (f). Cavidades y canales Parte inferior densa, sin poros.	Rellenando canales (o-c)	Restos humif variados (f). Restos filamentosos.	I-Granular (0,8 cm.) II-Laminar, fuert. separados	Laminar
	5-10	III- Láminas 1,5-2 cm espesor.		Rellenando canales (o-c)	Restos humif variados (mf) Restos filamentosos (c)	Laminar	Transicional Laminar-Biodisturbado
MP	0-5	I-Gránulos y bloques subang. finos II-Láminas; bloques subang. finos (interior denso)	I-Poros de empaq. compuesto entre agreg. y restos veg. Cavidades, fisuras finas cortas II-Fisuras subhorizontales 300-600 µm ancho, simples y bifurcadas, rectas y curvas (f) Fisuras horizontales 700 µm ancho (f).	(r)	Restos humif en las fisuras (c) Restos filamentosos, horizontales (c)	I-Granular y bloques subang. finos mod. sep. (1,5 cm) II-Laminar, fuert. separados	Laminar
	5-10	III- Láminas 1,5 cm	Láminas densas, cavidades, canales y fisuras muy finas (o)	(r)	Restos humif (o)	Laminar	Laminar

b)

Trat. de Manejo	Prof. (cm)	Agregados	Porosidad	Excrementos	Mat. Org.	Microestructura	Modelo estructural
AN	0-5	I-Esféricos (grumos y gránulos) II-Bloques subangulares y láminas (porosos, c/poros biol.)	I-Poros de emp. Compuesto II-Fisuras subhorizontales y subverticales Canales (f). Poros de empaquetamiento compuesto (f).	Rellenando canales y en la m.b. (m,f.); Grandes (0,7-1,5 mm) y chicos (300 µm)	Restos humif variados (f) sobre todo parte sup. de II	I-Migajosa. , 1,5 cm espesor II-En bloques subangulares	Bioconstruído
BP	0-5	I-Esféroidales y láminas (o) de bioagregados coalescentes, pequeñas II-Esféroidales y bloques subangulares de coalescencia , finos, bioconstruídos.	I-De emp. comp. y fisuras rectas II-Cavidades, cav. en estrella, canales y poros de empaquetamiento. Fisuras curvas.	En la m.b. (mf) subesféricos y mamelonados grandes (2 mm) (lombrices) y chicos (300 µm).	Restos humif variados (f) Nódulos biol. c/impreg. MO y Fe	I-Granular 0,7-1,5 cm espesor II-Granular y en bloques subangulares finos. Tendencia a esponjosa.	Bioconstruído
	5-10	III- Bloques subangulares grandes (4 cm) incompletos, moderadamente separados	Canales (f) y cavidades (f) en el interior de agregados. Fisuras (c) entre bloques.	En relleno denso envejecido (r)	Restos humif variados, pequeños (c); áreas impregnadas con humus, pequeñas, irregulares	De cavidades(en bloques subangulares mod. separados)	Bioconstruído
MP	0-5	I-Esféroidales, compactados II-Láminas de agreg. esf. compactados con finas fisuras onduladas, III- Bloques subangulares grandes mod. separados, incompletos.	I-Cavidades irregul., canales, poros de empaquet. compuesto. II-Fisuras onduladas finas y cortas, horizontales Cavidades, irregulares y en estrella (mf),canales (c)	Pequeños sueltos y coalescentes (mf)	Restos humif pequeños (o)	I-De cavidades, espesor 3,0 cm II-Laminar	Transicional Biodisturbado-Laminar
	5-10	Láminas de agregados esféricos coalescentes en canal relleno.	Fisuras onduladas finas , cortas. Fisuras finas (300 µm) entrecruzadas definen bloques.	Rellenando canales (mf), soldados, con fisuras onduladas.	Restos humif muy pequeños (r)	Estructura de cavidades (en bloques subangulares mod. sep.)	Transicional Biodisturbado-Laminar

c)

Trat. de Manejo	Prof. (cm)	Agregados	Porosidad	Excrementos	Mat. Org.	Microestructura	Modelo estructural
AN	0-5	I-Grumosa (grumos grandes, 5 mm, de excrementos coalescentes) y bl. subangulares finos. II-Bloques subang. y grumos coalescentes.	I-Poros de emp. comp.(mf); canales; cavidades; fisuras finas circulares y rectas (en bordes de canales rellenos). II-Fisuras finas (200-300 µm). Canales y cavidades.	Grandes (1,5 mm) (lombrices)	I-Restos frescos, grandes (mf). II- Restos frescos, medios, (c).	I-Grumosa, muy separada. II-Bloques subangulares, mod. separados	Bioconstruido
	5-10	III- Granulos, grumos y bloques subangulares de 5 mm, derivados de excrementos coalescentes	Poros de emp. comp.(mf); canales (mf) vacíos y rellenos; cavidades; fisuras finas circulares (entre agreg. esferoidales y bloques).	Pequeños (150 um) y otros grandes (1 mm), coalescentes	Restos frescos (f) y humificados pequeños en la m.b. (f)	Esferoidal y en bl. subang., moderadamente separada	Bioconstruido
BP	0-5	I-Láminas muy finas (de gránulos compactados). Gránulos en superficie II-Sin agregados, poroso (de gránulos compactados)	I- Fisuras muy finas (100 um) cortas, onduladas , y otras extrem. finas (20 um). Cavidades mamelonadas y en estrella derivadas de canales y rellenos disturbados. Poros de emp. comp. II- Cavidades (f) y canales	Sueltos en superficie. Compactados en m. b. de capa I; relleno canales; (m,f.) medios (400-500 µm)	Restos humif. variados, escasos (o). Nódulos con impreg. de Fe y MO (c) (500 µm)	I-Laminar debilmente separada, 2,5 cm espesor II-De cavidades	Transicional Laminar- Biodisturbado
	5-10	III- Bloques subangulares grandes (4 cm) incompletos, debilmente separados. Láminas débil. separadas	Cavidades (mf) irregulares y en estrella; canales (o); en el interior de agregados. Fisuras finas (100-300 µm) (c) entre bloques y láminas.	Pequeños (400 µm) compactados en la m.b., generando cavidades	Restos escasos (r), pequeños	De cavidades (en bloques subangulares y láminas)	Transicional Laminar- Biodisturbado
MP	5-10	III- Bloques subang., incompletos, debilmente separados. Porosos.	Cavidades, irregulares (mf) y en estrella (f) (tamaño medio 500 um), canales (c). Fisuras finas (100 µm) horizontales y verticales (o). Fisuras onduladas muy finas (30 µm) (o) entre agr. esféricos coalescentes.	Pequeños (200 µm) compactados, generando cavidades. Rellenando canales (c). Soldados, con fisuras onduladas	Restos escasos (r), pequeños Nódulos pequeños con impreg. Fe y MO (o)	De cavidades (bloques subangulares deb. sep.)	Transicional Densificado- Biodisturbado

d)

Trat. de Manejo	Prof. (cm)	Agregados	Porosidad	Excrementos	Mat. Org.	Microestructura	Modelo estructural
AN	0-5	No se diferencian dos microhorizontes. Bloques subang. muy irregulares, 2,5-10 mm, resultantes de coalescencia de agreg. esferoidales en dos niveles de complejidad: 50-100 μm y 500 μm	Cavidades conectadas, de tamaños varios y poros de empaq compuesto.	De 400 μm (f) y de 200 μm (f), en cavidades y canales	Restos org. (mf) en diversos grados de humif, incluídos en agregados y sueltos en poros. Red de filamentos orgánicos (restos humificados) conectando agreg. y excrementos	Esponjosa	Bioconstruido
MP	0-5	I- Bloques subang. finos (1 cm) y gránulos grandes II-Agregados microlaminares en canal relleno (láminas de 1,5 mm largo y 400 μm espesor); bloques subang. mod. sep.	I-Poros de empaq. compuesto entre agreg. y restos orgánicos. Cavidades irreg., fisuras cortas. Canales. II-microfisuras onduladas subhorizontales en agregados microlaminares. Fisuras. Cavidades y canales.	En superficie, sueltos, pequeños (f). En m.b. y canales (mf), coalescentes, compactados	En capa I, restos frescos y humif. (f)	I- (espesor 2, 5 cm) bloques subang. finos mod. separados y gránulos II-de cavidades y laminar	Biodisturbado

Tabla A.8. Correlaciones entre tests de estabilidad estructural según la metodología de Le Bissonnais (1996). Humedecimiento rápido 10 s ($DMP_{rap\ 10s}$), humedecimiento rápido (DMP_{rap}), agitación previo humectación en etanol (DMP_{ag}), humedecimiento por capilaridad (DMP_{cap}) y para el promedio de DMP_{rap} , DMP_{ag} y DMP_{cap} ($DMP_{rap,ag,cap}$). * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

	DMP_{rap}	DMP_{ag}	DMP_{cap}	$DMP_{rap,ag,cap}$
$DMP_{rap\ 10s}$	0,92**	0,50**	0,94***	0,93***
DMP_{rap}		0,38*	0,84*	0,87***
DMP_{ag}			0,52**	0,74***
DMP_{cap}				0,94***

Tabla A.9. Autovectores correspondientes al análisis de componentes principales. La significancia corresponde al análisis de correlación efectuado entre los componentes principales y cada variable. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$. DAP_(0-20 cm): Densidad aparente, P_{Mac>300 (0-5 cm)}: Macroporosidad mayor a 300 μm , D_{moda}: Tamaño de poro más frecuente, CA: capacidad de aire, Icv: índice de calidad visual, Pv: porosidad visible y DMP_{rap}: diámetro medio ponderado para el pre-tratamiento de humectación rápida.

Variables	CP1	CP2
DAP (0-20 cm)	-0,26 *	0,84 ***
P _{Mac> 300 (0-5 cm)}	0,41 **	0,02
D _{moda}	0,38 **	-0,3
CA	0,43 **	0,14
Icv	-0,39 **	-0,31
Pv	0,33 **	0,25
DMP _{rap}	0,42 **	0,15

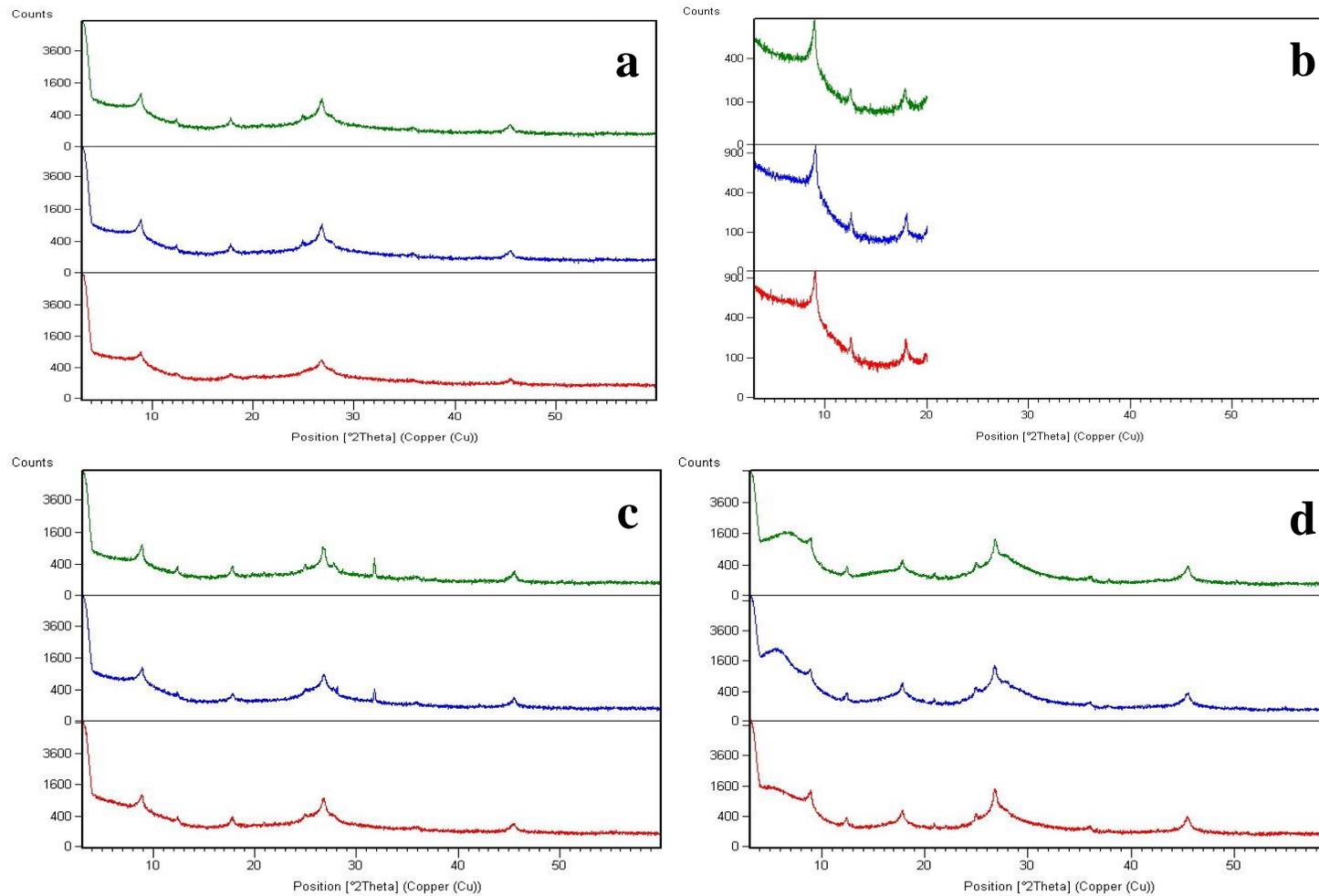


Figura A.1. Difractogramas de muestras de la fracción arcilla, naturales y orientadas de los cuatro suelos evaluados a) Haplustol, b) Argiudol Monte Buey, c) Argiudol (Pergamino) y d) Hapludert para los tres tratamientos, Ambiente Natural (verde), Buenas Prácticas (azul) y Malas Prácticas (rojo) para el subsitio 1. Las muestras fueron evaluadas de 3 a 60° (2 theta) con excepción de las muestras de Monte Buey las cuales fueron analizadas de 3 a 20°.

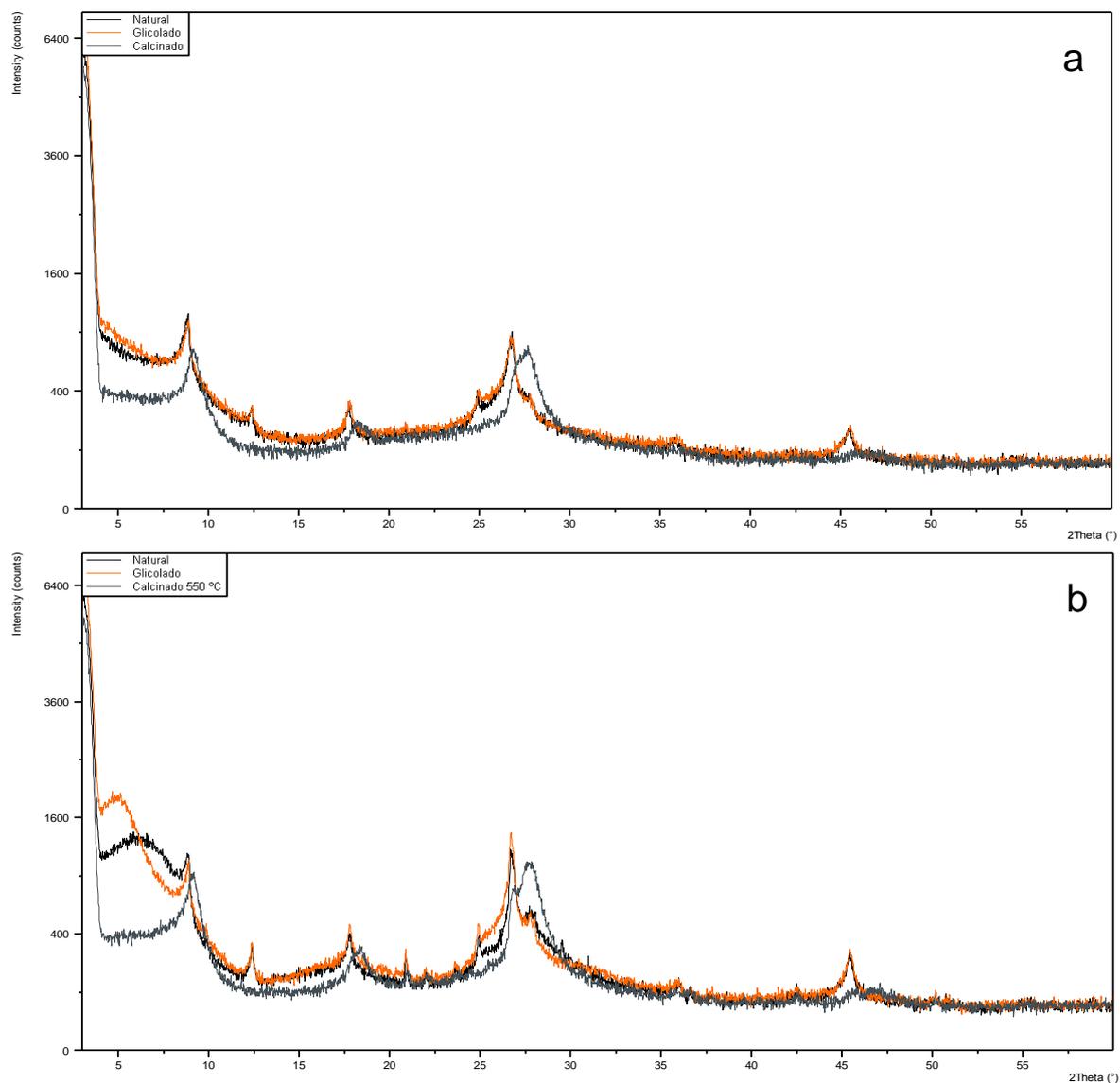


Figura A.2. Ejemplo de pre-tratamientos utilizados para la identificación de los minerales de arcilla para dos muestras contrastantes encontradas en esta tesis, (a) Ambiente natural del Haplustol, b) Ambiente natural del Hapludert.

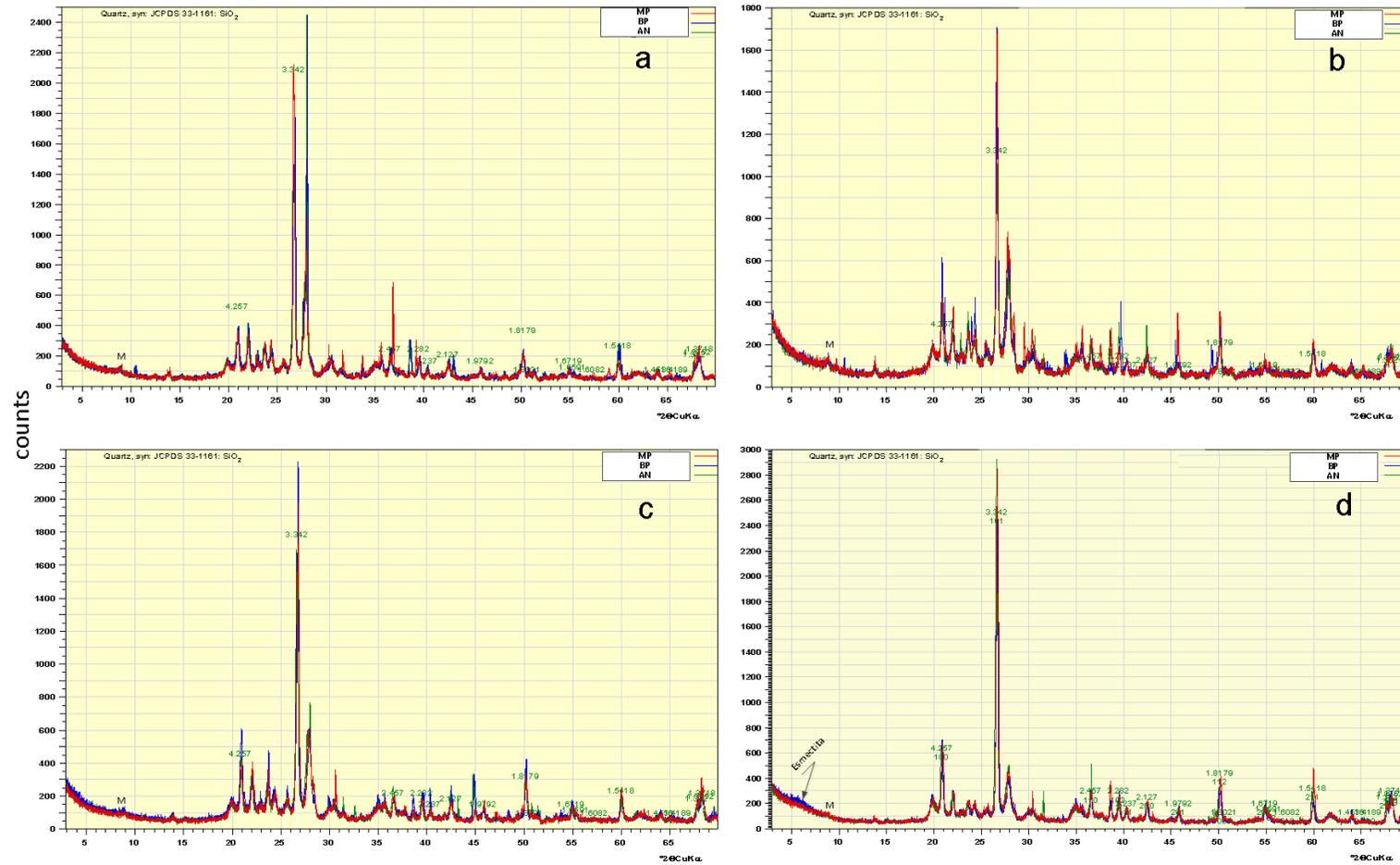


Figura A.3. Difractogramas de la composición mineralógica de la muestra total del suelo, a) Haplustol, b) Argiudol (Monte Buey), c) Argiudol (Pergamino) y d) Hapludert. M: Mica, Números en verde corresponden al cuarzo y picos restantes corresponden a Anortita, Albita y Microclina.

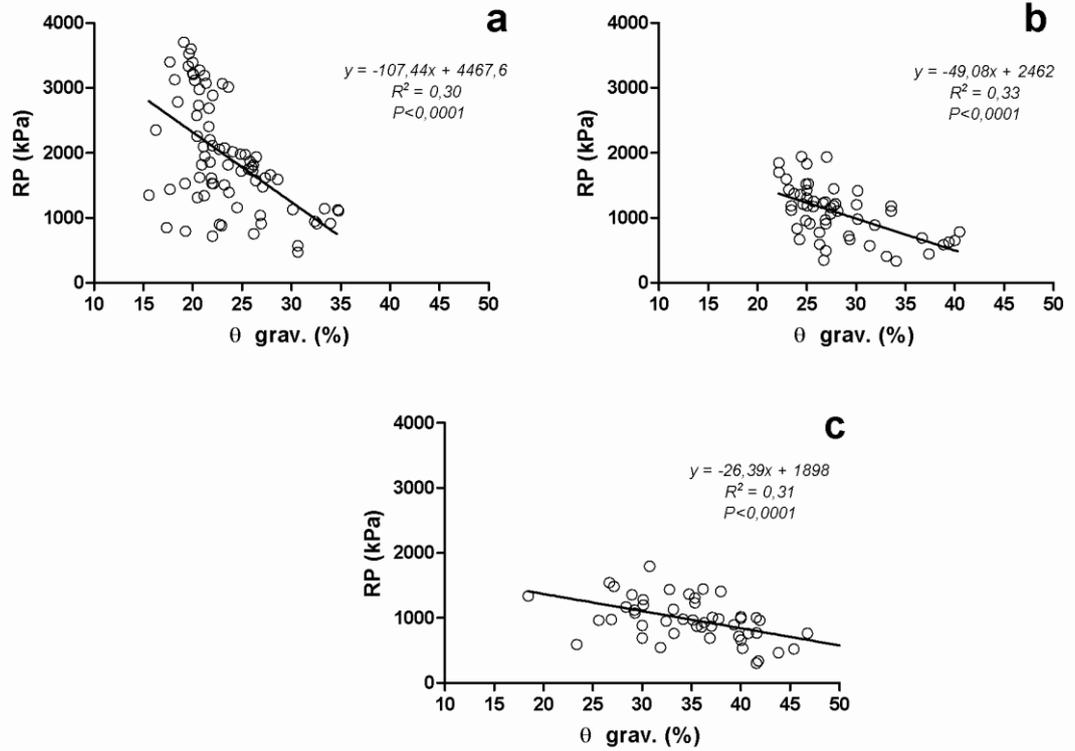


Figura A.4. Regresión lineal entre la resistencia a la penetración (RP) y la humedad gravimétrica (Θ grav. %) para todos los estratos para la corrección de la RP; a) Argiudol (Monte Buey), b) Argiudol (Pergamino) y c) Hapludert. El suelo Haplustol no necesitó ser corregido ya que no se encontraron relaciones entre la RP y la humedad.

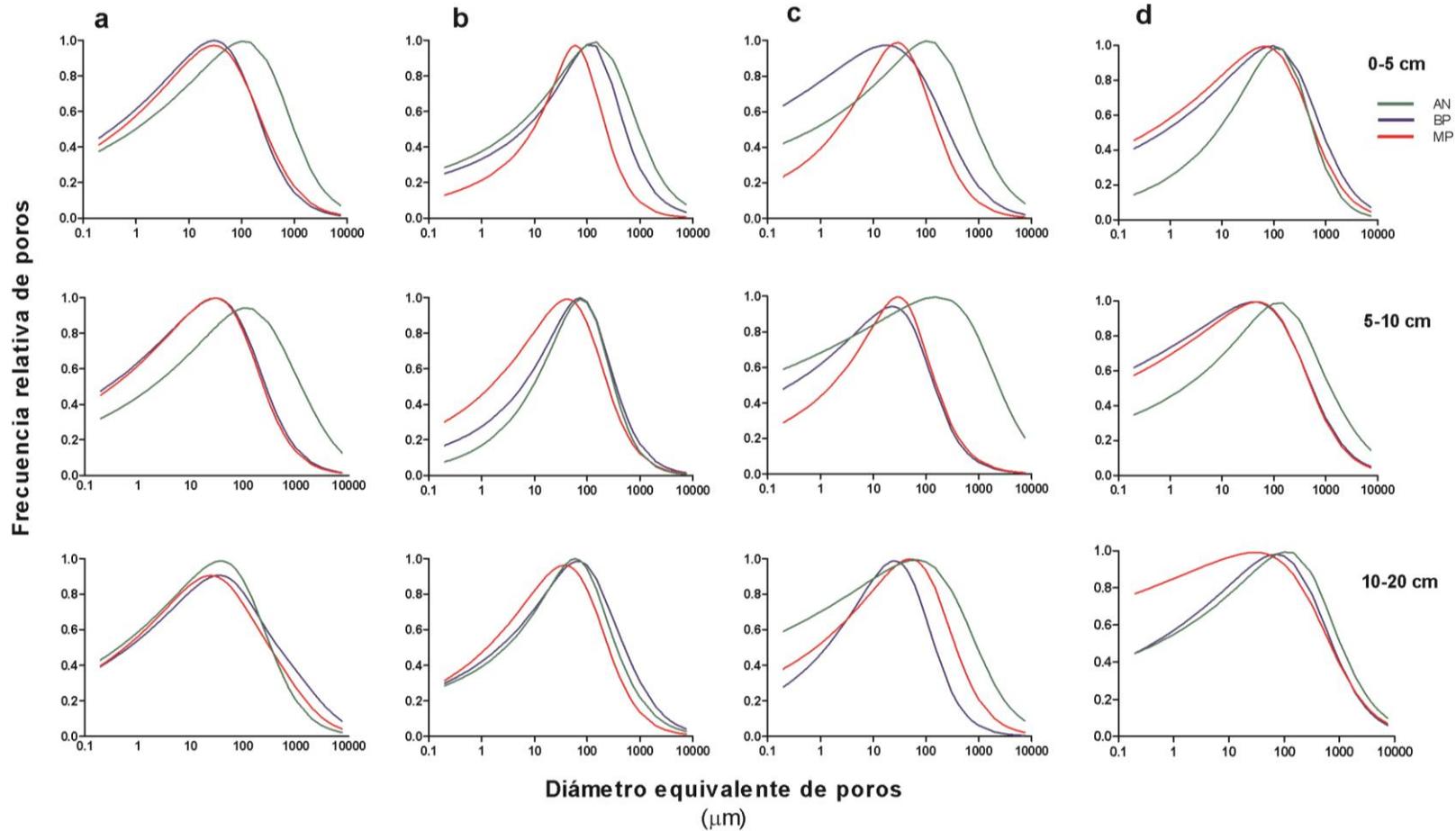


Figura A.5. Distribución volumétrica de poros (normalizada) para el manejo Ambiente natural (AN), Buenas prácticas (BP) y Malas prácticas (MP) para los suelos, (a) Haplustol, b) Argiudol – Monte Buey -,c) Argiudol -Pergamino y d) Hapludert, para cada profundidad evaluada, 0-5, 5-10 y 10-20 cm.

Apéndice 1

Hidrofobicidad del Suelo

1. Introducción

La calidad del suelo se refiere a la capacidad funcional que éste posee, para sostener la productividad vegetal y animal en ecosistemas naturales o manejados por el hombre, mantener o mejorar la calidad del aire y agua haciendo posible la vida humana (Karlen et al., 1997), en donde indicadores físicos, químicos y particularmente los indicadores biológicos han sido señaladas como herramientas sensibles para la evaluación de dicha calidad.

Uno de los objetivos del consorcio BIOSPAS es desarrollar indicadores de calidad de suelo robustos para discriminar entre prácticas de manejo sostenibles y no sostenibles. Estos indicadores deberían reflejar el impacto de las prácticas de manejo y, ser sensibles para detectar cambios tempranos en la calidad del suelo. También es de interés que los mismos estén relacionados con rasgos estructurales ya que diversos autores señalan el deterioro de la misma como una de las principales problemáticas en la región pampeana (Alvarez, et al., 2009, Sasal et al. 2012, Alvarez et al., 2014). Además dichos indicadores deben responder de forma predecible en distintos suelos y ante fluctuaciones climáticas y además ser fácil de comprender, rápido y barato para poder ser incluido en muestreos periódicos del suelo.

La hidrofobicidad del suelo (HS) es una propiedad que depende tanto de procesos físicos y químicos como biológicos. Este parámetro ha sido sugerido como un buen indicador de la calidad del suelo con respecto al impacto que los manejos agrícolas hacen al mismo (González-Peñaloza et al. 2012). También ha sido establecido que la HS es afectada por las prácticas de manejo agrícolas (De Bano 2000, Hallet et al., 2001) y por la inclusión de diferentes cultivos en la rotación (Dekker y Ritsema, 1997). De esta forma, Cosentino et al. (2010) encontraron altos valores de HS después de adicionar residuos de maíz al suelo mientras que Hallet y Young, (1999) mediante aplicaciones nitrogenadas encontraron también un incremento en los valores de HS debido a la promoción de la actividad microbiana y por ende un aumento de la producción de compuestos orgánicos hidrofóbicos en el suelo.

Desde la década del 90', diversos trabajos reportan sobre la ocurrencia de HS en un amplio rango de ambientes naturales, agrícolas y pastoriles alrededor del mundo y por consiguiente este fenómeno ha sido tomado como un importante componente en el manejo y productividad de los suelos (De Bano, 2000). Sin embargo, todavía permanece como incertidumbre si altos niveles de HS son comunes en suelos agrícolas bajo climas templados húmedos (Doerr, 2006). No obstante, estudios recientes han demostrado claramente que la HS es un fenómeno mucho más conspicuo en el suelo de lo que se asumía (Hallett y Young, 1999; Chenu et al., 2000; Cosentino et al. 2010). Diversos trabajos han demostrado que si bien la mayoría de los suelos aparentan ser rápidamente humectables, muchos en realidad son ligeramente hidrofóbicos (Tillman et al., 1989). Así, Tillman et al. (1989) introdujo el término 'hidrofobicidad subcrítica' para

diferenciar estos suelos de aquellos muy hidrofóbicos en donde la infiltración y la retención de agua están seriamente restringidas.

Uno de los primeros trabajos sobre la aparición de la hidrofobicidad bajo SD fue el realizado por Chan et al. (1992) y dicho fenómeno fue luego corroborado por diversos autores (Simon et al., 2009, Blanco-Canqui y Lal, 2009; Blanco-Canqui, 2011; González-Peñaloza et al., 2012). Así, una cantidad considerable de información puede ser encontrada en la literatura sobre el aumento de la HS en sistemas bajo SD en comparación con la labranza convencional (Pikul et al. 2009; Bottinelli et al., 2010). González-Peñaloza et al. (2012) encontraron que la HS puede detectar sensiblemente cambios de manejos en los primeros años (1-2) de la transición de labranza convencional a SD. Sin embargo, todavía es limitada la información de la HS en distintos manejos bajo SD considerando también el efecto del tipo de suelo y la variabilidad climática estacional.

La HS es afectada por el tipo de suelo, la textura y la mineralogía de los suelos entre otros factores (Jaramillo, 2003; Dlapa et al., 2004). Algunos investigadores enfatizan el rol de los materiales más gruesos en el aumento de la HS (Wallis y Horne, 1992; De Gryze et al. 2006). Sin embargo, otros autores no encontraron ninguna evidencia del efecto de la textura sobre la HS. En este sentido, Doerr et al. (2000) encontraron altos valores de HS tanto en suelos arenosos como en suelos arcillosos. Según Dekker et al. (2005) y Doerr et al. (2000) cada vez es más común la aparición de fenómenos de HS en suelos de textura fina. Por ejemplo, Crockford et al. (1991) encontró valores de HS más altos en suelos arcillosos con respecto a suelos arenosos. También ha sido establecido en experimentos de laboratorio que los minerales de arcillas de tipo 1-1 pueden reducir la HS, mientras que minerales de arcillas tipo 2-1, no afectan la HS o aún pueden aumentarla (Lichner et al. 2006). No obstante, pocos estudios han evaluado la HS en un gradiente textural y mineralógico.

Muchos trabajos evalúan la HS como una propiedad del suelo negativa debido a que la misma perjudica la infiltración de agua, aumenta el escurrimiento y la erosión del suelo (Jaramillo, 2003). Además la HS aumenta la ocurrencia de flujos preferenciales, causando posiblemente una rápida migración de xenobióticos o nutrientes al agua subterránea (White et al., 2000). Según Chan et al. (1992) en sistemas bajo siembra directa, la HS puede provocar humedecimientos desparejos de los lotes durante eventos de precipitaciones. Sin embargo, como se mencionó con anterioridad, la mayoría de los suelos agrícolas no presentan una alta HS y más que producir los efectos negativos recién mencionados, podría participar en procesos de formación y estabilización de la estructura del suelo (Baver et al., 1973; Porta et al., 1994; Eynard et al., 2006; Mataix-Solera et al. 2011; Vogelmann et al. 2013) y secuestro de C (Blanco-Canqui y Lal, 2009). Además, Roper et al. (2013) encontraron que el aumento de esta propiedad bajo SD no afectó el contenido hídrico del suelo y en algunos casos hasta lo aumentó.

También está sujeta a debate la relación entre la HS y otros indicadores de calidad del suelo como la EE (Vogelmann et al. 2013; Degryse et al. 2006) y el CO (Taumer et al., 2005; Chenu et al. 2000). Según Blanco-Canqui (2011) una repelencia al agua débil puede aumentar la agregación del suelo, la estabilidad de agregados al agua y disminuir el sellado. En este sentido se cree que la HS puede aumentar la

estabilidad de agregados al disminuir la magnitud del estallido de agregados debido al revestimiento de los poros con sustancias hidrofóbicas (Piccolo y Mbagwu, 1999). Este proceso se genera por fuerzas ejercidas por el aire comprimido durante la rehumectación del suelo (Le Bissonnais, 1996;) y ha sido demostrado que este mecanismo es uno de los factores principales en la disminución de la estabilidad estructural, principalmente en suelos limosos (Le Bissonnais, 1996, Varela et al., 2010). Caron (1996) demostró que el estallido debido a la presión de aire entrampado en los poros es función de la tasa de humedecimiento, la cual es directamente influenciada por la HS. Sin embargo la magnitud de esta interrelación en suelos con diferente texturas y mineralogías sigue siendo una interrogante. En este sentido los test propuestos por Le Bissonnais (1996) diferencian los mecanismos de EE permitiendo una mejor interpretación de los efectos de la HS en la formación y estabilización de la estructura. Sin embargo, De Gryzse et al. (2005) en experimentos en sistemas con pastura, encontraron que el índice de repelencia no presentó una correlación significativa con la macroagregación ($R^2 = 0.20$, $p > 0,05$) y en otro trabajo (De Gryze et al., 2006) sólo se encontraron correlaciones positivas entre la HS y la estabilidad estructural en un suelo arcillo-limoso. De esta forma este autor concluye que la HS no era el proceso dominante en la estabilidad estructural y que la formación de agregados no estaba necesariamente asociada a un aumento en la HS.

El uso de la HS como un indicador de calidad de suelo y su relación con la estabilidad estructural debe tomar en cuenta las condiciones ambientales estacionales como la temperatura y el contenido hídrico del suelo (Dekker y Ritsema, 2000). Ha sido establecido que la temperatura ambiente (King, 1981), la temperatura de secado del suelo (Franco et al., 1995; Dekker et al., 1998), el contenido de humedad actual del suelo (Berglund y Persson, 1996; DeJonge et al., 1999; Dekker y Ritsema, 2000), y la historia de humedecimiento y secado de las muestras (Doerr y Thomas, 2000) pueden afectar de forma importante la HS. En períodos secos en donde los suelos puede desarrollar más hidrofobicidad es esperado que el efecto de la HS sobre la estabilidad de agregados sea mayor (Vogelman et al., 2013). De forma contraria, en estaciones húmedas el efecto de la HS se minimiza y probablemente no presenta un aumento en la resistencia a la desagregación y a los agentes erosivos. Por ello, se debe considerar y estudiar la estacionalidad de la HS en diferentes tipos de suelos ya que este aspecto podría condicionar la utilidad de dicha variable como indicador.

Bajo SD, la ausencia de disturbios del suelo y la presencia de una capa permanente de material orgánica provee sustrato y condiciones favorables para el crecimiento microbiológico (sobre todo hongos) aumentado de esta forma la HS (Chan et al., 1992). Otros autores también han encontrado correlaciones positivas entre la HS y la MO (Chenu et al., 2000, McKissock et al., 1998; Roper et al., 2013). Por el contrario, algunos trabajos no encontraron dicha relación, infiriendo procesos más complejos debido a interacciones con la textura, tipo de suelo y el contenido hídrico del suelo (Doerr et al, 2006; Scott, 2000). También, no toda la materia orgánica (MO) del suelo es hidrofóbica por lo cual mejores correlaciones pueden ser encontradas si se consideran distintas fracciones de la MO (Capriel et al. 1995). Por ejemplo, la HS fue relacionada a la presencia de ácido húmicos (Roberts y Carbon, 1971; Jouany y Chassin, 1987), fracciones alifáticas (MacGhie y Posner, 1980), o fracciones que contenían una gran cantidad de restos poco descompuestos (MacGhie y Posner, 1981). Por otro lado,

Harper et al. (2000) señalan la única presencia de la MO más que la cantidad total es la clave para el desarrollo de la HS.

Por todo lo mencionado se hipotetiza que la HS puede ser un buen indicador de la calidad del suelo, debido a que la hidrofobicidad del suelo está relacionada directamente con la cantidad y calidad de materia orgánica, con su actividad microbiana y con el movimiento del agua en el mismo y a que se estima que puede aumentar la agregación del suelo y la estabilidad de agregados al agua.

Objetivos

- Determinar y analizar el comportamiento de la HS de diferentes manejos agrícolas bajo SD a lo largo de un gradiente textural y mineralógico en dos estaciones opuestas (invierno-verano).
- Evaluar la relación entre las características de manejo de suelos sobre la HS y su relación con la estabilidad estructural y distintas fracciones de carbono orgánico.
- Evaluar la pertinencia de la HS como indicador de calidad de suelo en algunos suelos de la región pampeana.

2. Materiales y métodos

2.2 Determinación de la hidrofobicidad del suelo (HS)

La hidrofobicidad del suelo fue determinada mediante el método del tiempo de penetración de la gota de agua, más conocido por su sigla en inglés WDPT (water drop penetration time). La HS_{WDPT} fue evaluada en muestras recolectadas en invierno y en verano para contabilizar la variabilidad estacional. En cada fecha de muestreo y en cada unidad experimental, se recolectaron tres monolitos sin disturbar (aproximadamente 6000 cm^3) a una profundidad de 0-20 cm y fueron tratados de la misma forma que para la determinación de la estabilidad estructural, en agregados de 3-5 mm. Como fuera sugerido por Cosentino et al. (2000) la determinación mediante WDPT fue seleccionada ya que es recomendada para muestreos de campo debido a su simplicidad, bajo costo de laboratorio y además discrimina hidrofobicidades sub-críticas por encima del umbral de relevancia práctica. En este método desarrollado por Letey, (1969) y luego adaptado por Chenu et al. (2000) se mide la velocidad de entrada completa de 3 μL de agua desionizada ubicada en la superficie de un agregado. Dicha determinación se realiza en 15 agregados para cada unidad experimental para un total de 45 determinaciones por tratamiento. Las medidas fueron realizadas bajo microscopio estereoscópico (Wild MZ8 Leica) y se utilizó una microjeringa Hamilton CR 700-200. Durante las mediciones la temperatura ambiente y la humedad relativa fue de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y $60 \pm 5\%$ respectivamente.

Dos temperaturas de secado fueron utilizadas (aire y estufa a 50°C , 48 horas). Las muestras secas al aire fueron utilizadas para eliminar el efecto del contenido hídrico en las variaciones de hidrofobicidad (HS potencial) y se realizaron las determinaciones de los agregados secos en estufa dado que dicha temperatura es usualmente alcanzada en suelos desnudos en verano (Doerr y Thomas, 2000). Las muestras de suelo del Argiudol (Monte Buey) fueron incorporados en el muestreo de invierno, por lo que se carece de datos para el muestreo de verano y para el secado en estufa para ambas fechas de muestreo.

2.4 Análisis estadísticos

Se estimaron modelos lineales generales de efectos mixtos de la influencia de distintos manejos (tres niveles: Ambiente natural, Buenas prácticas y Malas prácticas), estacionalidad (dos niveles: verano o invierno), tipo de secado (dos niveles: aire o estufa 50°C), y todas las interacciones sobre la hidrofobicidad medida por WDPT (HS_{WDPT}) como efecto fijo (media). Como los análisis preeliminares mostraron que las variables predictoras afectaban la variabilidad entre unidades muestrales, el modelo también estimó diferentes varianzas para cada nivel de manejo en cada estación y en cada suelo. Además, el modelo incluyó como efectos aleatorios (random intercepts) la influencia de los micrositios anidados dentro de subsitios anidados dentro de cada lote y estos anidados en cada tipo de suelo (i.e. cuatro niveles). La significancia fue testada por medio de un análisis de varianza (ANOVA), y se realizó una transformación Log a la HS_{WDPT} para cumplimentar los requerimientos del modelo y el ANOVA. El modelo fue estimado mediante la función lmer del paquete lme4 package (Bates, Maechler y Bolker 2011) en el software R (R Development Core Team 2011). Las variables de manejo (CP1_manejo, ISI, ISI_{agr} , Años bajo SD, Soja/Cultivos, Soja/Maíz, Maíz/Cultivos) y

Soja único cultivo, propiedades del suelo (contenido de arcilla, limo y arena, CIC, LI, Lp, Ip, AA, E+E/I, Dp, HE, CE, PSI, estabilidad de agregados, $DMP_{rap\ 10s}$, DMP_{rap} , DMP_{ag} , DMP_{cap} y $DMP_{rap,ag,cap}$ y las distintas fracciones de carbono orgánico, COT, COP_g, COP_f, COM, CH_t y CH_s. fueron correlacionadas con la HS_{WDPT} para cada fecha de muestreo. También para el evaluar el efecto del suelo Hapludert (mineralogía esmectítica y alto contenido de arcillas) sobre las correlaciones se procedió a realizar las correlaciones con todos los suelos y con todos los suelos con la previa remoción del Hapludert. Además se incluyó un análisis de correlación extra para la incorporación del suelo Argiudol (Monte Buey) en el muestreo de invierno.

3. Resultados

3.1 HS_{WDPT}

Los tratamientos evaluados presentaron hidrofobicidad sub-crítica, ($HS_{WDPT}=0-60$ s) (Doerr, 1998; Dekker et al., 2001) debido a que 99% de los valores se encontraron dentro de este rango, mientras que el 46% de las muestras se encontraron en el rango entre 0 y 1 segundo (Tabla 1). Los tipos de suelos mostraron valores diferentes de HS_{WDPT} con un promedio para todos los tratamientos de 1,27 s (n=539) para el Argiudol (Pergamino); 1,54 s (n=517) para el Haplustol y 9,87 s (n=537) para el Hapludert. Según King (1981), la HS_{WDPT} del Haplustol y de los Argiudoles se clasificaron como de muy baja repelencia (1-10 s) y en la categoría de ausencia de repelencia (<1 s). El Hapludert mostró valores más elevados de HS_{WDPT} , lo cual casi llevó a que se pudiera clasificar en la categoría de baja repelencia (10-60 s). El factor de manejo fue responsable de la alta variabilidad de la hidrofobicidad, con una tendencia AN>BP>MP con errores estándares del orden de 1,29, 0,66 y 0,22 respectivamente. El muestreo de verano presentó una media de 1,75 s, y el de invierno presentó un valor de 6,68 s. También la fecha de muestreo produjo una dispersión particular con altos valores de error estándar (Es) para el muestreo de invierno (0,65) en comparación con el muestreo de verano (0,08).

El modelo lineal mixto, considerando el tipo de suelo como factor principal presentó efectos significativos de los tres factores estudiados, tratamiento de manejo, fecha de muestreo y tipo de secado (Tabla 2). También se encontró una interacción entre la fecha de muestreo y el manejo sin interactuar con el tipo de secado. Esto permitió combinar los tipos de secado para estudiar los efectos del manejo y las propiedades edáficas sobre la HS_{WDPT} . Los contrastes realizados en los tratamientos de manejo presentaron diferencias significativas entre todos los tratamientos ($p<0,05$) con la siguiente tendencia AN>BP>MP para ambas fechas de muestreo (Tabla 2; Figura 1). Con relación a la fecha de muestreo, el muestreo de invierno presentó valores de HS_{WDPT} mayores al muestreo de verano ($p<0,05$) y los agregados secos al aire presentaron un valor promedio de 4,6 s mientras que el secado en estufa (50 °C) presentó una media de 3 s.

Tabla 1. Hidrofobicidad del suelo (HSWDPT) para el muestreo verano e invierno y secado da agregados al aire y estufa 50°C para la el suelo Haplustol, Argiudol (Pergamino), Hapludert y Argiudol (Monte Buey) y los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas). Coeficiente de variación (CV), Error estándar (Es).

HS _{WDPT} (s)	Trat. de Manejo	Verano								Invierno							
		Seco al aire				Seco en estufa (50 °C)				Seco al aire				Seco en estufa (50 °C)			
		Media	Es	Mín	Máx	Media	Es	Mín	Máx	Media	Es	Mín	Máx	Media	Es	Mín	Máx
Haplustol	AN	1,25	0,12	0,54	4,96	0,99	0,10	0,50	3,17	3,14	1,44	0,46	63,25	3,95	1,74	0,42	69,87
	BP	0,92	0,07	0,33	2,91	0,85	0,05	0,44	2,00	1,60	0,19	0,45	5,36	2,08	0,64	0,42	25,78
	MP	0,70	0,04	0,39	2,12	0,53	0,03	0,22	1,30	0,84	0,13	0,35	6,15	1,42	0,52	0,34	22,45
Argiudol (Pergamino)	AN	1,37	0,15	0,5	5,38	1,03	0,09	0,40	3,09	3,07	0,85	0,68	39,0	1,97	0,24	0,63	10,46
	BP	1,06	0,12	0,39	4,80	0,85	0,06	0,43	1,98	1,21	0,1	0,51	3,90	1,5	0,26	0,57	11,37
	MP	0,69	0,03	0,45	1,37	0,70	0,04	0,39	1,62	1,02	0,14	0,45	6,26	0,81	0,06	0,42	2,00
Hapludert	AN	5,24	0,75	0,76	23,9	3,31	0,38	0,61	12,0	51,11	7,69	1,23	281,0	16,95	1,97	1,54	61,11
	BP	4,56	0,65	1,07	21,6	2,88	0,31	0,77	14,0	11,90	2,62	0,87	95,0	9,12	2,82	0,68	118,1
	MP	3,03	0,39	0,68	15,5	1,66	0,09	0,78	3,50	5,33	0,79	0,93	28,70	3,33	0,34	0,96	11,31
Argiudol (Monte Buey)	AN	^a	-	-	-	-	-	-	-	3,75	0,59	0,74	23,91	-	-	-	-
	BP	-	-	-	-	-	-	-	-	1,73	0,18	0,47	5,84	-	-	-	-
	MP	-	-	-	-	-	-	-	-	0,96	0,08	0,39	3,01	-	-	-	-
CV		140,0			106,0					294,5			221,3				

^aNo determinado

Tabla 2. Análisis de modelo mixto para los efectos fijos, tratamientos de manejo, fecha de muestreo y temperatura de secado sobre la hidrofobicidad del suelo por el método de WDPT (Water Drop Penetration Time). El estadístico F es presentado para cada término del modelo.

	<i>df/num</i>	<i>df/den</i>	<i>F</i>	<i>Valor -p</i>
Tipo de secado	1	1584	14	0,0002
Fecha de muestreo	1	1584	55	<0,0001
Manejo	2	4 17	18	0,010
Tipo de secado: Fecha de muestreo + Manejo	1	1584	0.03	0,8717
Tipo de secado : Manejo	2	1584	1,1	0,3169
Fecha de muestreo: Manejo	2	1584	8.8	0,0002
Tipo de secado: Fecha de muestreo: Manejo	2	1584	0.25	0,780

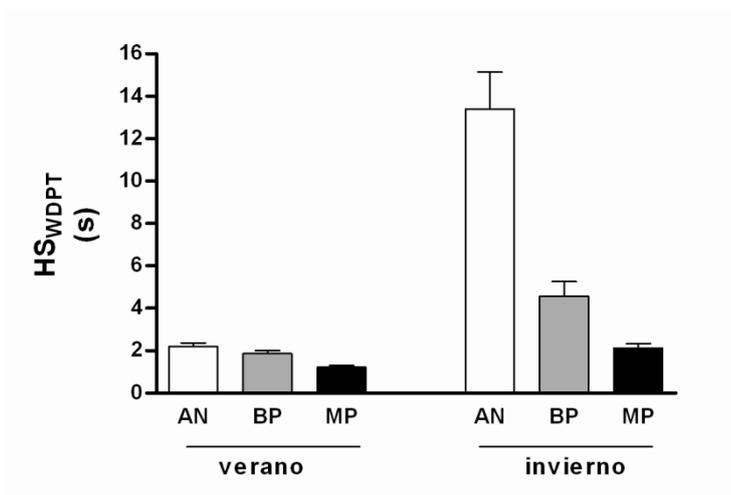


Figura 1. Valores promedios de la hidrofobicidad de todos los suelos evaluados (HS_{WDPT}) para los tratamientos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para los muestreos de verano e invierno.

3.2 HS y variables de manejo

La correlación de Pearson entre el HS_{WDPT} y las variables de manejo presentó una correlación negativa para el $CP1_{\text{manejo}}$, perdiendo significancia cuando se removió el Hapludert (Tabla 3). Esto significa que a mayor diversidad de rotaciones, mayor número de años bajo SD, una ocupación del suelo mayor y una presencia más importante del maíz en la rotación, los valores de HS_{WDPT} aumentaron. La intensificación del cultivo (ISI) se correlacionó positivamente con la HS_{WDPT} con coeficientes mayores para invierno y para los suelos sin el Hapludert, mientras que el ISI_{agr} únicamente presentó una correlación positiva en el muestreo de invierno para el set de datos restringido. Sin embargo, en esa ocasión presentó un coeficiente de correlación significativo y muy alto ($r= 0.81$). De la misma forma, los Años bajo SD y la Soja como único cultivo, sólo mostraron correlaciones significativas en invierno y sin el suelo Hapludert. La relación Maíz/Cultivos presentó correlaciones positivas y significativas en todos los casos, mientras que la Soja/Maíz presentó correlaciones negativas y significativas para todos los casos con excepción del muestreo de invierno para el análisis sin el Hapludert (Tabla 3). Cuando se incorporó el Argiudol (Monte Buey), en el muestreo de invierno, las correlaciones de la HS_{WDPT} con las variables de manejo presentaron coeficientes muy similares.

Tabla 3. Correlación de Pearson entre la hidrofobicidad del suelo medida por WDPT y las variables de manejo. Las correlaciones fueron efectuadas para todos los suelos para los muestreos de verano e invierno, para todos los suelos más el suelo Argiudol (Monte Buey) en invierno y con la remoción del suelo Hapludert en cada caso.

HS _{WDPT}	Verano		Invierno			
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos + Argiudol (Monte Buey)	Sin Hapludert
Variables de Manejo						
CP1_manejo	-0,50 *	-	-0,54 *	-	-0,44 *	-
ISI	ns	0,65 **	0,49 **	0,78 ***	0,53 ***	0,83 ***
ISI _{agr}	ns	ns	ns	0,81 **	ns	0,82 ***
Años bajo SD	ns	ns	ns	0,65 *	ns	0,59 ***
Soja/Cultivos	ns	ns	-0,48 *	-0,73 **	-0,44 *	-0,78 ***
Soja/Maíz	-0,75 ***	-0,68 *	-0,66 **	ns	-0,58 **	-0,64 ***
Maíz/Cultivos	0,68 **	0,80 **	0,62 **	0,69 *	0,53 **	0,69 **
Soja único cultivo	ns	ns	ns	-0,74 **	ns	-0,79 ***

CP1_manejo (combinación lineal de características de manejo obtenidos por análisis multivariado), ISI (Índice de intensificación de cultivo), ISI_{agr} (Índice de intensificación de cultivo para los manejos agrícolas), Años bajo SD (años bajo siembra directa), Soja/Cultivos (Relación de años con soja sobre la cantidad total de cultivos), (Soja/Maíz), Relación de años con soja sobre maíz, Maíz/Cultivos (Relación de años con maíz sobre la cantidad total de cultivos) y Soja único cultivo (soja como único cultivo). ***p<0,001, **p<0,01 y *p<0,05.

3.3 HS y propiedades del suelo, estabilidad estructural y fracciones de carbono orgánico.

La HS_{WDPT} se correlacionó con numerosas propiedades del suelo como se observa en la Tabla V.13. Cuando se analizan en detalle estas correlaciones se puede observar que el suelo Hapludert se comportó de forma muy diferente al resto de los suelos. Para las propiedades del suelo, a partir del análisis de todo el set de datos, se pudo observar una correlación positiva y significativa entre el CP1_suelo y la HS_{WDPT} tanto para verano como para invierno. Por ello, las correlaciones con el resto de las variables edáficas presentaron coeficientes muy altos. Los altos valores de HS_{WDPT} en conjunto con los altos valores del contenido de arcilla, propiedades reológicas y tipo de mineralogía produjeron posiblemente correlaciones “falsas”. Esto fue verificado al remover dicho suelo del análisis. Así la correlación con el CP1_suelo dejó de ser significativa y prácticamente todas las propiedades del suelo dejan de tener significancia. Una de las pocas variables edáficas que mantuvo su significancia fue la HE, la cual presentó una correlación positiva y significativa con la HS_{WDPT} tanto para el muestreo de verano como para el muestreo de invierno. Cuando a este análisis se incorporó el suelo Argiudol (Monte Buey), las tendencias fueron muy similares, verificándose también la correlación entre la HE y la HS_{WDPT}.

Cuando se analizó el efecto de la HS_{WDPT} sobre la EE se pudo observar coeficientes de correlación que dependieron de la fecha de muestreo. En verano, las correlaciones fueron pocas y muy débiles, mientras que en el muestreo de invierno, se encontró una estrecha vinculación entre los distintos tests de EE y la HS_{WDPT} , aumentando al remover el suelo Hapludert (Tabla 4). Los tests que reflejan el humedecimiento rápido ($DMP_{rap\ 10s}$ y DMP_{rap}) presentaron los mayores coeficientes de correlación los cuales fueron significativos y positivos, mientras que también el DMP_{cap} se correlacionó de forma positiva con la HS_{WDPT} . Si bien el DMP_{ag} se comportó de la misma forma que el resto de los test su coeficiente no fue tan alto. La incorporación del Argiudol (Monte Buey) (Tabla 4), presentó coeficientes semejantes, con valores más altos cuando se correlacionó sin tener en cuenta el Hapludert y con valores apenas superiores del $DMP_{rap\ 10s}$ y DMP_{cap} con respecto al DMP_{rap} .

En cuanto a las fracciones de carbono orgánico, también se registraron numerosas correlaciones con el HS_{WDPT} , todas ellas con signo positivo (Tabla 4). Además se encontró una marcada diferencia entre el muestreo de verano y de invierno. Mientras que el muestreo de invierno presentó diversas correlaciones significativas, en el muestreo de verano únicamente se detectó una correlación positiva con el COT para todo el set de datos y para CHt cuando se removió el Hapludert. En el muestreo de invierno, el COP_g presentó el mayor coeficiente, mientras que para todo el set de datos se encontraron correlaciones significativas con altos coeficientes para COT, COPf y COM. Por otro lado, cuando se removió el Hapludert se detectaron correlaciones significativas con las fracciones de carbono más lábiles (CH_s y CH_l). Cuando se incorporó el Argiudol (Monte Buey), las tendencias fueron muy semejantes notándose un incremento débil de los coeficientes de correlación (Tabla 4).

Tabla 4. Correlación de Pearson entre la hidrofobicidad del suelo medida por WDPT y las propiedades del suelo. Las correlaciones fueron efectuadas para todos los suelos para los muestreos de verano e invierno, para todos los suelos más el suelo Argiudol (Monte Buey) en invierno y con la remoción del suelo Hapludert en cada caso.

	Verano		Invierno			
	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos	Sin Hapludert	Todos los suelos + Argiudol (Monte Buey)	Sin Hapludert
<i>Propiedades del suelo</i>						
CP1_suelo	0,91 ***	ns	0,79 ***	ns	0,77 ***	ns
CP2_suelo	ns	ns	-0,33	ns	ns	ns
Arcilla	0,88 ***	ns	0,69 ***	ns	0,67 ***	ns
Limo	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Arena	-0,67 ***	ns	-0,49 **	ns	-0,43 **	ns
CIC	0,91 ***	ns	0,79 ***	ns	0,76 ***	ns
Lp	0,77 ***	ns	0,69 ***	ns	0,62 ***	ns
Ll	0,92 ***	0,49 *	0,78 ***	ns	0,78 ***	0,38 *
Ip	0,93 ***	0,47 *	0,78 ***	ns	0,76 ***	ns
AA	0,66 ***	ns	0,65 ***	0,51 *	0,63 ***	ns
E+ E/I	0,87 ***	ns	0,80 ***	ns	0,77 ***	ns
Dp	-0,29 ***	ns	ns	ns	ns	0,42 *
HE	0,93 ***	0,76 *	0,82 ***	0,49 *	0,8 ***	0,53 **
CE	0,87 ***	ns	0,81 ***	ns	0,74 ***	ns
pH	0,41 ***	ns	0,47 *	ns	ns	ns
Ca ⁺²	0,74 ***	ns	0,64 ***	ns	0,60 ***	ns
PSI	-0,6 ***	ns	-0,46 *	ns	ns	ns
<i>Estabilidad estructural de agregados (Le Bissonnais, 1996)</i>						
DMP _{rap10s}	ns	ns	0,51 *	0,75 ***	0,36 *	0,77 ***
DMP _{rap}	0,49 **	ns	0,47 *	0,79 ***	0,4 *	0,73 ***
DMP _{ag}	ns	ns	0,51 *	0,48 *	ns	0,61 ***
DMP _{cap}	0,44 *	ns	0,53 *	0,71 ***	0,33 *	0,78 ***
DMP _{rap+ag+cap}	ns	ns	0,54 *	0,76 ***	ns	0,81 ***
<i>Fracciones de carbono orgánico</i>						
COT	0,75 ***	ns	0,71 ***	0,45 **	0,72 ***	0,51 **
COP _g	ns	ns	0,82 ***	0,80 ***	0,82 ***	0,80 ***
COP _f	ns	ns	0,63 ***	0,38 *	0,64 ***	0,38 *
COM	ns	ns	0,6 ***	ns	0,61 ***	ns
CH _s	ns	ns	ns	0,42 *	ns	0,47 *
CH _t	ns	0,48 *	ns	0,68 ***	-0,45 *	0,71 ***

Capacidad de intercambio catiónico (CIC), límite líquido (Ll), límite plástico (Lp), índice de plasticidad (Ip), actividad de arcillas (AA), esmectitas más interstratificadas illita-esmectita (E+E/I), densidad de partícula (Dp), humedad equivalente (HE), conductividad eléctrica (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), estabilidad de agregados, DMP_{rap 10s} (humedecimiento rápido 10 s), DMP_{rap} (humedecimiento rápido), DMP_{ag} (agitación previo humectación en etanol), DMP_{cap} (humedecimiento por capilaridad) y DMP_{rap,ag,cap} (promedio de DMP_{rap}, DMP_{ag} y DMP_{cap}) y las distintas fracciones de carbono orgánico COT (carbono orgánico total), COP_g (carbono orgánico particulado grueso), COP_f (carbono orgánico particulado fino), COM (carbono orgánico mineralizable, CH_t (hidratos de carbono total) e CH_s (hidratos de carbono soluble). ***p<0,001, **p<0,01 y *p<0,05.

4. Discusión

4.1 Efectos estacionales y temperatura de secado sobre la HS_{WDPT} .

Usualmente la HS responde a efectos estacionales (De Jong et al., 1999; Dekker y Ritsema, 2000; Doerr y Thomas, 2000) presentando generalmente valores más altos en verano, donde el secado del suelo es más pronunciado. Sin embargo, en este estudio los valores más altos de HS_{WDPT} fueron encontrados en invierno. Esto puede ser atribuido a la ocurrencia de un período muy húmedo, con tormentas de alta intensidad en los meses previos al muestreo de verano en todos los suelos evaluados (Figura 2). Este mismo comportamiento fue encontrado por Doerr et al. (2000), los cuales concluyeron que la HS puede reducirse o aún ser eliminada por tormentas prolongadas o de alta intensidad. Por el contrario, períodos secos de hasta 3 meses fueron registrados en los meses previos al muestreo de invierno (Figura 2). Esto también fue corroborado mediante el contenido hídrico del suelo para cada fecha de muestreo (capítulo 3, Figura 3.15).

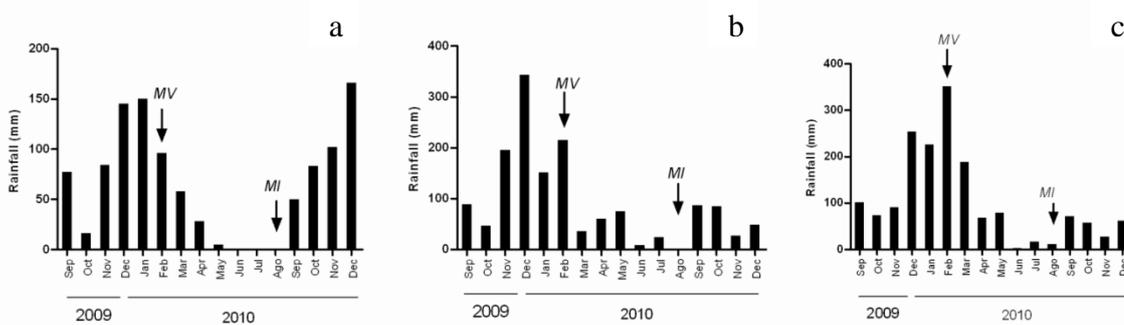


Figura 2. Precipitación mensual (mm) para el muestreo de verano (MV) e invierno (MI) para a) Haplustol, b) Argiudol (Pergamino) y c) Hapludert.

Con relación al tipo de secado, aun cuando existieron diferencias significativas entre ambos secados, la magnitud de esta diferencia es muy baja, lo que no influenciaría en el efecto del manejo o estacionalidad sobre la HS. Además el comportamiento de este factor fue influenciado por el tipo de suelo. El suelo Haplustol presentó un aumento en la HS_{WDPT} con temperaturas de secado mayores (datos no mostrados). Este mismo comportamiento fue encontrado en diversos trabajos (DeBano, 2000; Doerr et al., 2000) donde este aumento es atribuido a la transformación de la MO hacia formas más hidrofóbicas. Por el contrario, el suelo Argiudol (Pergamino) y el Hapludert presentaron valores más altos de HS_{WDPT} en las muestras secadas al aire. Una hipótesis, podría ser que en los suelos de textura fina la mayor temperatura de secado causa una contracción parcial de agregados lo cual conllevaría a la formación de microgrietas aumentando la tasa de infiltración y por ende un decrecimiento de la HS_{WDPT} .

4.2 Efecto de las prácticas de manejo sobre la HS_{WDPT}

Para la HS_{WDPT} , considerando los tipos de suelos como variables aleatorias, las prácticas de manejo presentaron una fuerte influencia en la HS con una tendencia $AN > BP > MP$. Si bien entre fechas de muestreo los valores de HS_{WDPT} se modificaron sensiblemente, no se modificó dicha tendencia, siendo la misma una relación muy robusta. Se debe destacar también que esta metodología sencilla pudo diferenciar estadísticamente los tres manejos evaluados, siendo de gran utilidad como indicador de calidad de suelo. La diferencia entre estos manejos fue comprobada para los suelos Molisoles por otras determinaciones de HS como el R_{index} y el ángulo de contacto (datos no mostrados). No obstante, mediante estas dos últimas metodologías el Hapludert no presentó la misma tendencia, si no que el MP fue superior al BP. Por ello, sigue necesitándose más estudios sobre la variación de las metodologías de HS en suelos de textura y mineralogías diferentes.

La buena aptitud de la HS_{WDPT} como indicador de la calidad de suelo también se vio reflejada en las correlaciones encontradas con $CP1_{manejo}$, la cual es la combinación lineal de todas las variables de manejo medidas (Tabla 3). De forma detallada, se pudieron observar efectos positivos importantes del tiempo de permanencia de raíces vivas (ISI , ISI_{agr}) y de la abundancia en la rotación del maíz con respecto a los resto de los cultivos y principalmente con respecto a la soja (Tabla 3).

Así rotaciones de cultivos más variadas se relacionaron con valores mayores de HS. Por el contrario, en rotaciones menos diversas, en donde el ambiente edáfico puede estar limitado en la cantidad y calidad de recursos para mantener una comunidad microbiana más estable y diversa los valores de HS fueron menores. Por ejemplo, rotaciones con preponderancia de soja producen residuos con una baja relación (C/N), lo cual conlleva a una rápida descomposición del mismo con respecto al residuo de maíz (Ernst et al., 2002). De esta forma la actividad biológica puede ser alta pero con un tiempo de relativo muy corto, afectando de forma negativa a la HS.

Cuando se incorporó en el análisis el suelo Argiudol (Monte Buey), dicho escenario se mantuvo y aumentaron los coeficientes, seguramente al aumentar el número de repeticiones (Tabla 3). Se debe señalar también que los coeficientes de correlación en la mayoría de los casos fueron mayores en el muestreo de invierno y cuando se removió el suelo Hapludert. Como se señaló con anterioridad, este comportamiento se puede deber a que en el verano los valores de HS fueron muy bajos y dependientes de las precipitaciones ocurridas. En cuanto a la remoción del suelo Hapludert, seguramente este comportamiento está vinculado a las características edáficas intrínsecas de dicho suelo (arcillas esmectitas), lo cual enmascara el efecto del manejo sobre la HS. Este efecto se verá en el punto 4.3.

4.3 Efecto del tipo de suelo sobre la HS_{WDPT}

En esta tesis, el efecto del suelo sobre la HS_{WDPT} , estuvo dictaminada por el alto contenido de arcillas y la mineralogía expandible del suelo Hapludert. Esto es válido en

cuanto se considere en el análisis al Hapludert, ya que cuando se removió este suelo prácticamente no se evidenciaron relaciones entre la HS_{WDPT} y las propiedades del suelo (Tabla 4). No obstante es cierto que la HS_{WDPT} presentó valores altos en suelos con alto contenido de arcillas. Los mismos resultados han sido reportados por otros investigadores (Dapla, 2004; Doerr et al. 2007) aunque dicho resultado se encuentra en contradicción con el concepto aceptado que la HS_{WDPT} debe ser más alta en suelos de texturas más gruesas (Harper et al., 2000, Jaramillo, 2003). De acuerdo a este concepto el Haplustol franco arenoso debería haber presentado valores más altos, sin embargo debe mencionarse que la mayoría de las arenas de este suelo corresponden a arenas muy finas (50-100 μm) y probablemente se comporten como limos gruesos.

Las correlaciones de Pearson efectuadas para todos los suelos en conjunto sobre el contenido de arcillas arrojaron una relación positiva con la HS_{WDPT} , pero como se mencionó con anterioridad, dicha correlación perdió significancia con la remoción del Hapludert. Este hallazgo concuerda con diversos estudios donde no se encontró influencia de la textura sobre la HS (Vogelman et al., 2009; Doer et al., 2007; Scott, 2000). Esto puede indicar que, o existe un contenido de arcilla umbral que tenga efecto sobre la HS, o que dicho efecto dependa de la mineralogía de arcillas, ya que este efecto está confundido en esta tesis. El alto valor de HS_{WDPT} encontrado en suelos Vertisoles ha sido reportado por Vogelman et al. (2013) y Lichner et al. (2006), los cuales establecieron que el tipo de mineralogía de arcilla puede influenciar la HS. En el mismo sentido, Dapla et al. (2000, 2002) encontraron altos valores de HS medida por WDPT en tratamientos con arcillas montmorillonitas homiónicas al Ca^{+2} . También, en muestras de arenas, en la cual la hidrofobicidad fue artificialmente inducida por el acetyl alcohol, la arcilla montmorillonita fue más efectiva que la caolinita (Ward y Oades, 1993). Uno de los mecanismos propuestos por Dapla, (2004) se refiere al aumento de la HS relacionada a la tendencia agregante de las arcillas con alta superficie específica. Así en el suelo franco arenoso (Haplustol) es probable que las arcillas de menor superficie específica estén más dispersas en comparación con el Hapludert. Por otro lado, el menor tamaño de poros y una conectividad de poros relativamente baja (indicada por la baja sortividad en etanol) podrían explicar la disminución de la tasa de entrada de agua en el Hapludert, lo cual aumentaría la HS_{WDPT} .

4.4 Relación entre estabilidad estructural y la HS_{WDPT}

La HS medida por WDPT, correspondió a una categoría de hidrofobicidad sub-crítica. Por esta razón no es esperable que los suelos presenten rasgos negativos asociadas a altos valores de HS como la reducción de la infiltración o el aumento del escurrimiento. Por el contrario, como fuera descrito por Vogelman et al., (2013), Mataix-Solera et al., (2011) y Chenu et al. (2000) entre otros, se encontraron altas correlaciones entre la HS (HS_{WDPT} , R_{index} y ángulo de contacto) y los distintos tests de la EE. Así, de la misma forma que lo encontrado por Ellies et al. (1996), los suelos cuyo manejo promueven la aparición de hidrofobicidad, presentan agregados estables a la dispersión y por ende muestran pequeñas variaciones del diámetro medio ponderado de los agregados (Ellies et al., 1996).

Como se presentó en la Tabla 4, estas altas correlaciones de establecieron únicamente para el muestreo de invierno. Como fuera explicado con anterioridad, el alto

contenido hídrico del suelo y las tormentas previas a los muestreos de verano, modificaron y en algunos casos prácticamente eliminaron la HS. De esta forma se corrobora la hipótesis propuesta por Vogelmann et al. (2013) en donde se esperaba que en períodos secos, con el aumento de la HS, una mayor correlación de la misma sobre la estabilidad de agregados y viceversa.

También, debe mencionarse que el suelo Hapludert, debido a los diferentes mecanismos de formación y estabilización de la estructura (mayor contenido de arcillas y arcillas esmectitas) disminuyeron la correlación entre EE y la HS cuando se tuvo en cuenta este suelo en los análisis.

Dentro de estas correlaciones se puede generalizar que los tests DMP_{rap10s} y DMP_{cap} , fueron los que presentaron coeficientes más altos y que resultaron más consistentes según se considerara o no el suelo Hapludert. En concordancia con Caron et al. (1996), puede hipotetizarse que la estrecha vinculación entre la DMP_{rap10s} y la HS_{WDPT} , se debe a la disminución de la presión del aire entrampado en los agregados, ya que un mayor valor de HS redundaría en una entrada de agua más lenta. Por otro lado, la alta correlación encontrada con el DMP_{cap} , puede estar dada en parte por este mismo proceso y por el aumento de la agregación general atribuible a los compuestos hidrofóbicos de la MO. En cuanto a la correlación un poco menor con el DMP_{ag} , puede deberse a que es el único test que no tiene en cuenta la velocidad de entrada de agua a los agregados ya que se realiza con alcohol (el DMP_{ag}) debido a que dicho test busca comprobar la estabilidad por la cohesión interna de los agregados. No obstante este test está relacionado fuertemente con la MO y por ello también presenta una asociación positiva con la HS.

4.4 Relación entre las fracciones de carbono orgánico y la HS_{WDPT}

Como se discutió con anterioridad, los valores más altos de hidrofobicidad se encontraron en AN mientras que los valores más bajos le correspondieron a MP. Esto podría explicarse, por un lado por el menor contenido de CO de este último manejo y la ausencia de cultivos de invierno que aumentaría la cantidad de fuente carbonada para la actividad biológica. En este sentido, la MO y la actividad biológica son destacados en varios trabajos como los factores más importantes en los fenómenos hidrofóbicos (Harper, 2000). En esta tesis, la HS_{WDPT} presentó para el muestreo de invierno una estrecha relación positiva con COT (Tabla 4). Similares resultados han sido presentados por Dekker et al. (1998), Taumer et al. (2005), entre otros autores, mientras que a su vez Vogelmann et al. (2009), Wallis y Horne (1992) y Jaramillo et al. (2006) no encontraron ninguna vinculación entre la HS y la MO. Existen varias razones por la cual puede hipotetizarse la no existencia de correlaciones significativas entre la MO y la HS. Diversos estudios, resaltan que las distintas fracciones carbonadas tendrían un comportamiento diferente en relación a la hidrofobicidad del suelo (Capriel, 1995). También, Becerra et al., (2006) puso de manifiesto en suelos de ceniza volcánica que más que la cantidad de MO, es importante conocer el tipo y calidad de material orgánico. Por ejemplo, Chenu et al. (2000) sugieren que la materia orgánica particulada impone características hidrofóbicas a las arcillas. Sin embargo, esta sugerencia no fue corroborada por Greyse et al. (2006), en donde datos de campo mediante el índice de repelencia, no presentaron correlaciones, ni para el carbono orgánico total ni para el carbono orgánico particulado. En esta tesis, todas las mediciones de hidrofobicidad

presentaron correlaciones muy altas con el COP_g , lo cual también indica la sensibilidad de la hidrofobicidad como indicador de cambios rápidos de manejo, ya que esta fracción es sumamente dinámica, modificándose rápidamente con las prácticas agrícolas (Duval et al., 2013). En este mismo sentido, para la HS_{WDPT} , cuando se removió el suelo Hapludert se encontraron correlaciones positivas con dos de las fracciones de carbono más lábiles del suelo (CHs y CHt), las cuales indican también la actividad biológica del suelo (Wander et al., 2004; Jackson et al., 2007). Una explicación de la mejoría de dichas correlaciones con la remoción del suelo Hapludert puede estar dada por la inmovilización de dicha fracción por las arcillas.

5. Conclusiones

En esta sección se puso en evidencia que además del rol de la HS en los mecanismos de estabilización del suelo (principalmente en los tests de humectación rápida), la HS en si misma demostró ser un importante indicador de calidad de suelos. Así, este indicador logró separar los manejos agrícolas y cumplió con numerosos requisitos que debe tener un indicador. La determinación de HS es de bajo costo, se vinculó con varios procesos de importancia como la estabilidad estructural, con las fracciones más lábiles del carbono orgánico, indicando la sensibilidad ante cambios de manejo y una estabilidad en dos estaciones las cuales presentaron condiciones ambientales muy contrastantes (muy húmeda y seca, respectivamente). No obstante, si bien en estas dos estaciones se lograron separar de la misma forma los tratamientos, las diferencias de magnitudes encontradas entre las mismas podría imposibilitar la comparación directa de los valores en un plan de monitoreo. Por otro lado, si bien en esta metodología el efecto del tipo de suelo fue muy bajo, se debe seguir estudiando el efecto de los tratamientos en los suelos con minerales expansivos ya que otras metodologías de determinación de la HS utilizadas en ese suelo (Índice de repelencia y ángulo de contacto –datos no mostrados) presentaron resultados diferentes para el Hapludert comparadas a la HS_{WDPT} .

Bibliografía

- Alvarez, C.R., M.A. Taboada, F.H. Gutierrez Boem, A. Bono, P.L. Fernandez y P. Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1251.
- Alvarez, C.R., M.A. Taboada, S. Perelman y H.J.M. Morrás. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Res.* <http://dx.doi.org/10.1071/SR13281>.
- Baver, L., W.H. Gardner y W.R. Gardner. 1973. Física de suelos. México: Centro Regional de Ayuda Técnica. Agencia para el Desarrollo Internacional (A.I.D.).
- Berglund, K. y L. Persson. 1996. Water repellence of cultivated- organic soils. *Acta Agric. Scand.* 46: 145–152.
- Blanco-Canqui, H. 2011. “Does No-till Farming Induce Water Repellency to Soils?” *Soil Use Managet* 27: 2-9.
- Blanco-Canqui, H. y R. Lal. 2009. Corn stover removal for expanded uses reduces soil fertility and structural stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 418-426.

- Bottinelli, N., V. Hallaire, S. Menasseri-Aubry, C. Le Guillou y D. Cluzeau. 2010. Abundance and stability of belowground earthworm casts influenced by tillage intensity and depth. *Soil Till. Res.* 106: 263–267.
- Caron, J. 1996. Describing pressure buildup within aggregates following immersion: a model. En: *Proceedings of the 3rd Eastern Canada Soil Structure Workshop* (J. Caron, D.A. Angers y G.C. Topp, eds). Colloque Canadien sur la structure du sol, Merrickville, Ontario. pp. 59–73.
- Chan, K.Y. 1992. Development of seasonal water repellence under direct drilling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 326–329.
- Chenu, C., Y. Le Bissonnais y D. Arrouays. 2000. Organic Matter Influence on Clay Wettability and Soil Aggregate Stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1479–1486.
- Cockroft, B. y K.A. Olsson. 1997. Case study of soil quality in south-eastern Australia: management of structure for roots in duplex soils. En: *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 339–350.
- Cosentino, D., P.D. Hallett, J.C. Michel y C. Chenu. 2010. Do different methods for measuring the hydrophobicity of soil aggregates give the same trends in soil amended with residue? *Geoderma* 159: 221–227.
- De Gryze, S., J. Six, C. Brits, y R. Merckx. 2005. A quantification of short-term macro-aggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biol Biochem.* 35: 55–66.
- De Gryze, S., L. Jassogne, H. Bossuyt, J. Six, R. Merckx. 2006. Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture. *Eur. J. Soil Sci.* 57 : 235–246.
- De Jonge, L.W., O.H. Jacobsen y P. Moldrup. 1999. Soil water repellency: Effects of water content, temperature and particle size. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 437–442.
- DeBano, L.F. 2000. Water Repellency in soils: a historical overview. *J. Hydrol.* 31: 4-32.
- Dekker, L.W. y C.J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.* 30: 2507-2517.
- Dekker, L.W. y C.J. Ritsema. 1997. Effect of maize canopy and water repellency on moisture patterns in a Dutch black plagen soil. *Plant Soil.* 195: 339–350.
- Dekker, L.W. y C.J. Ritsema. 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *J. Hydrol.* 231–232,148–164.
- Dekker, L.W., S.H. Doerr, K. Oostindie, A.K. Ziogas y C.J.Ritsema. 2001. Water repellency and critical soil water content in a dune sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1667-1674.
- Dlapa, P., S.H. Doerr, L. Lichner, M. Šír, y M. Tesař. 2004. Effect of kaolinite and Ca-montmorillonite on the alleviation of soil water repellency. *Plant Soil Environ.* 50: 358–363.
- Doerr S.H., R.A. Shakesby, L.W. Dekker y C.J. Ritsema. 2006. Occurrence prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in a humid temperate climate. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 741-754.
- Doerr, S.H. C.T. Llewellyn, J.T. Douglas, C.P. Morley, K.A. Mainwaring, C. Hskins, L. Johnsey, C.J. Ritsema, F. Stagnitti, G. Allinson, A.J.D. Ferreira, J.J. Keizer, A.K. Ziogas y J. Diamantis. 2005. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different origin. *Aust. J. Soil Res.* 43: 225–237.
- Doerr, S.H., C.J. Ritsema, L.W. Dekker, D.F. Scott y D. Carter. 2007. Water repellence of soils: new insights and emerging research needs. *Hydrol. Proc.* 21: 2223–2228.

- Doerr, S.H., L.W. Dekker, C.J. Ritsema, R.A. Shakesby y R. Bryant. 2002. Water repellency of soils: The influence of ambient relative humidity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 401-405.
- Doerr, S.H., R.A. Shakesby y R.P.D. Walsh. 1998. Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. *Soil Sci.* 163: 313-324.
- Doerr, S.H., R.A. Shakesby y R.P.D. Walsh. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51: 33-65.
- Doerr, S.H., y A.D. Thomas. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *J. Hydrol.* 231-232: 134-147.
- Ellies, A., R. Grez y C. Ramirez. 1996. Efecto de la materia orgánica sobre la capacidad de humectación y las propiedades estructurales de algunos suelos de la zona centro sur de Chile. *Agro Sur.* 24:48-58.
- Eynard, A., T.E. Schumacher, M.J. Lindstrom, D.D. Malo, R.A. Kohl. 2006. Effects of aggregate structure and organic C on wettability of Ustolls. *Soil Till. Res.* 88: 205-216.
- Franco, C.M.M., M.E. Tate, y J.M. Oades. 1995. Studies on non-wetting sands. I - The role of intrinsic particulate organic matter in the development of water repellency in non-wetting sands. *Aust. J. Soil Res.* 33: 253-263.
- González-Peñaloza, F.A., A. Cerdà, L.M. Zavala, A. Jordán, A.G. Giménez-Morera, V. Arcenegui. 2012. Do conservative agriculture practices increase soil water repellency? A study in citrus-cropped soils. *Soil Till. Res.* 124: 233-239.
- Hallett, P.D. y I.M. Young. 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *Eur. J. Soil Sci.* 50: 35-40.
- Hallett, P.D., T. Baumgartl y I.M. Young. 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 184-190.
- Harper, R., I. Mckissock, R. Gilkes, D. Carter y D.P. Blackwell. 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and land use on water repellency. *J. Hydrol.* 231-232: 371-383.
- Jaramillo, J.D.F. 2003. Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Informe de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 36 p.
- Jouany, C. y P. Chassin. 1987. Determination of the surface energy of clay-organic complexes from contact angles measurements. *Colloids Surf.* 27: 289-303.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris y G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-14.
- King, P.M. 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affects its measurement. *Aus. J. Soil Res.* 19: 275-285.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Lichner, L., P. Dlapa, S.H. Doerr y J. Mataix-Solera. 2006. Evaluation of different clay mineralogies as additives for soil water repellency alleviation. *Appl. Clay Sci.* 31: 238-248.
- MacGhie, D.A. y A.M. Posner. 1981. The effect of plant top material on the water repellence of fired sands and water repellent soils. *Aust. J. Agric. Res.* 32:600-620.
- Mataix-Solera, J., A. Cerdà, V. Arcenegui, A. Jordán y L.M. Zavala. 2011. Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews* 109: 44-60.
- McGhie, D.A. y A.M. Posner. 1980. Water repellence of a heavy textured Western Australian surface soil. *Aust. J. Soil Res.* 18: 309-323.

- McKissock, I., R.J. Gilkes y E.L. Walker. 2002. The reduction of water repellency by added clay as influenced by clay and soil properties. *Appl. Clay Sci.* 20: 225–241.
- Piccolo, A. y J.S.C Mbagwu. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1801–1810.
- Pikul, J.L., G. Chilom, J. Rice, A. Eynard, T.E. Schumacher, K. Nichols, J.M.F. Johnson, S. Wright, T. Caesar y M. Ellsbury. 2009. Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 197–206.
- Roberts, F.J. y B.A. Carbon. 1971. Water repellence in sandy soils of South-western Australia: I. Some studies related to field occurrence. *Fld. Stn. Rec. Div. Pl. Ind. CSIRO (Australia)* 10: 13–20.
- Roper, M.M., P.R. Ward, A.F. Keulen, y J.R. Hill. 2013. Under no-tillage and stubble retention, soil water content and crop growth are poorly related to soil water repellency. *Soil Till. Res.* 126: 143-150.
- Scott, D.F. 2000. Soil wettability in forested catchments in South Africa; as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. *J. Hydrol.* 231-232: 87-104.
- Simon, T., M. Javurek, O. Mikanova y M. Vach. 2009. The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity. *Soil Till. Res.* 105: 44–48.
- Täumer K., H. Stoffregen y G. Wessolek. 2005. Determination of repellency distribution using soil organic matter and water content. *Geoderma.* 125: 107–115.
- Tillman, R.W., D.R. Scotter, M.G. Wallis y B.E. Clothie. 1989. Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Aust. J. Soil Res.* 27: 637–644.
- Vogelmann, E.S., J.M. Reichert, J. Prevedello, G.O. Awe, J. Mataix-Solera. 2013. Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? *Catena.* 110: 24-31.
- Wallis, M.G. y D.J. Horne. 1992. Soil water repellency. *Adv. Soil Sci.* 20: 91–146.
- White, N.A., P.D. Hallett, D. Feeney, J.W. Palfreyman y K. Ritz. 2000. Changes to water repellence of soil caused by the growth of white-rot fungi: studies using a novel microcosm system. *FEMS Microbiology Letters* 184: 73–77.

Apéndice 2

Movimiento de agua en suelos de textura y mineralogía contrastantes bajo siembra directa y ambiente natural.

1. Introducción

Algunos trabajos demuestran que la SD promueve la conservación del contenido de carbono orgánico (Alvarez et al., 1998; Steinbach y Alvarez, 2006) y el aumento de la estabilidad estructural (Derpsch et al., 2010). Por otro lado, son frecuentes los reportes sobre aspectos negativos de la SD relacionados con el aumento de la densidad aparente, de la resistencia a la penetración (Nesmith et al., 1987; Mahboubi et al., 1993; Chagas et al., 1994) y la aparición de estructura laminares (Ball y Robertson, 1994; Morrás et al., 2004; Bonel et al., 2005; Sasal et al., 2006). A su vez, algunos trabajos han demostrado que la compactación superficial genera disminuciones en la tasa de infiltración, y por lo tanto mayor escurrimiento, pérdidas de suelo y consecuente restricciones para el crecimiento de las raíces (Schafer et al., 1992; Unger y Kaspar, 1994). Por lo tanto, la infiltración se torna un aspecto fundamental en el conocimiento de la calidad hidrofísica de un suelo ya que regula la cantidad y velocidad de agua que ingresa al perfil del suelo.

A pesar de la mayor densidad y menor porosidad total encontrada en algunos sistemas bajo SD, en muchos casos la penetración de agua es igual o mayor que en la labranza convencional (Bauder et al., 1981; Morrás et al., 2001). Algunos autores atribuyen esto a una mayor estabilidad de la estructura en SD que da lugar a macroporos más estables y con mayor interconexión entre sí (Zacagnini y Calamari, 2001).

Por otro lado, otra explicación se sostiene en las diferentes secuencias de cultivos utilizadas bajo SD. En general, los cambios edáficos por el uso de la tierra no sólo surgen ante modificaciones del sistema de cultivo aplicado, sino que también pueden influir la secuencia y el rendimiento de los cultivos implantados (Díaz-Zorita et al., 2004). En este sentido, en los últimos años, se ha incrementado de manera importante la proporción de la superficie destinada casi exclusivamente al cultivo de soja (Novelli et al., 2011). El cultivo de soja aporta no sólo una menor cantidad de residuos al suelo, sino que también poseen una baja relación C/N que favorece su descomposición. Además en el caso de que sea el único cultivo en la rotación (soja de primera), existe la posibilidad de que el suelo permanezca con baja cobertura durante gran parte del año (Sanford, 1982; Bathke y Blake, 1984). Así, en suelos descubiertos o con baja cobertura, el movimiento de agua puede ser afectado. Como mencionan Chagas et al. (2004) para un Argiudol típico de la serie Ramallo bajo SD, el suelo descubierto presentó una menor infiltración y mayor escurrimiento que el suelo que se hallaba con mayor rastrojo. Esto fue debido a una mayor duración de la fase inicial del escurrimiento.

En sistemas con mayor intensidad agrícola se genera una contradicción debido a que por un lado el suelo está sujeto a una alta presión física (compactación y aparición de estructuras desfavorables) (Botta et al., 1997; Balbuena et al., 2009) y por el otro lado, se obtiene una mayor presencia de raíces vivas por año y secuencias de cultivos más variadas las cuales pueden mejorar la condición física, química y también estructural del suelo (Alvarez et al., 2014, Sasal, 2012).

A su vez, el movimiento de agua se halla relacionado con la distribución de tamaños de poros, la forma de los mismos y su continuidad (Hillel, 1998). Además, la entrada de agua en el suelo también es afectada por el tipo de suelo a través de la textura, estructura y materia orgánica y estado superficial del suelo (rugosidad, cobertura, etc.), entre otras variables (Chagas et al., 2004; Marelli et al., 2006). En este sentido, los suelos limosos conllevan a procesos de erosión y escurrimiento (Vermang, 2012; Roger Estrade et al., 2011). Así, es de esperar que en la región pampeana, con elevados contenidos de limos y fitolitos, la fragilidad estructural sea alta (Wischmeier et al. 1971, Pecorari et al., 1988) y que el movimiento de agua este explicada por la estabilidad estructural de dichos suelos.

Por otra parte, suelos con alto contenido de arcillas expansibles pueden originar disminuciones en la estabilidad estructural, aumentando el escurrimiento y pérdida de suelo (Stern et al., 1991; Igwe et al., 1999). Sin embargo todavía es muy escasa la información en la región pampeana sobre el efecto de dichos factores sobre el movimiento de agua bajo diferentes secuencias bajo SD en suelos de textura y mineralogía contrastantes.

Existen diversas formas de cuantificar la infiltración del suelo, el balance entre infiltración y escurrimiento y a su vez la pérdida de suelo por erosión laminar. Entre ellas, el uso de simuladores de lluvia permite evaluar estas variables en forma comparativa en el terreno (Chagas, 1995; Chagas et al., 2009) evaluando de forma directa la dinámica de agua en el suelo. En este sentido diversos autores han podido establecer diferencias de manejos a través de esta metodología (Morrás et al., 2001; Chagas et al., 2011; De la Vega et al., 2004). Morrás et al. (2001) en ensayos con simulador de lluvia encontraron que los valores de infiltración total fueron semejantes entre labranza convencional y distintas situaciones del suelo en SD con suelo cubierto. También en dicho trabajo se observó que el grado de infiltración en SD estuvo relacionado con el grado de degradación previa del suelo. De la Vega et al. (2004) al comparar la tasa de infiltración en suelos cubiertos y descubiertos bajo SD comprobaron que la duración del período inicial de infiltración era afectada por la condición superficial del suelo (cubierto o descubierta) y por su contenido de agua, mientras que la tasa de infiltración final y la producción de sedimentos dependían del estado de cobertura del suelo pero no de su contenido hídrico inicial. Morrás et al. (2008) encontraron también una alta susceptibilidad al sellado en un suelo en SD sin rastrojo, equivalente a la encontrada en el suelo con LC.

Una vez que el agua ingresó en el suelo, es de gran utilidad para el conocimiento de la calidad hidrofísica el movimiento del agua en el suelo, es decir, la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}). Esta expresa la capacidad de un medio poroso para transmitir agua. La conductividad hidráulica saturada representa el efecto de la

gravidad en el flujo de agua en el suelo (Filgueira et al., 2006), siendo entonces gobernada por los poros mayores. Muchos investigadores concuerdan con que la densidad, tamaño y distribución de los poros, tendencia de los suelos a dispersarse, cambios de volumen en los poros de los agregados formados por montmorillonita, son factores que pueden cambiar el valor de la conductividad hidráulica (Baver, 1956). Esta propiedad está muy afectada por la presencia de grietas y bioporos (Topp et al., 1997), como así también por la rugosidad, tortuosidad y conectividad que presentan los poros de conducción de agua (Hillel, 1998). En este sentido, y de acuerdo a la metodología empleada para la cuantificación del movimiento de agua, puede obtenerse información valiosa para conocer la dinámica de los suelos con diferente intensidad de manejo bajo SD. Así, en los últimos años diversos trabajos han utilizado esta variable para evaluar la calidad hidrofísica del suelo (Reynolds et al., 2009; Castiglioni et al., 2011; Castellini et al., 2013; Shahab et al., 2013).

Por todo lo mencionado, en este capítulo se evaluará el efecto de distintos manejos agrícolas bajo SD (Buenas prácticas y Malas prácticas) y una situación de referencia (Ambiente natural) en el movimiento de agua en el suelo. También se evaluará el efecto del tipo de suelo y sus variables composicionales, variables físicas, químicas y estructurales en el comportamiento hidrológico de los tratamientos de manejo. Así se pondrán en evidencia los rasgos edáficos más importantes en el balance hidrológico del suelo.

Objetivos

- Determinar el movimiento de agua en distintos manejos bajo SD mediante simulaciones de lluvias y la conductividad hidráulica saturada.
- Evaluar el efecto de distintas variables composicionales, físicas en el movimiento de agua en el suelo.
- Jerarquizar dichas variables como posibles indicadores de calidad hidrofísica en manejos bajo SD en suelos contrastantes.

Hipótesis

- 1- La estabilidad estructural del suelo tiene más influencia que el estado de compactación en las variables hidráulicas del suelo (determinadas por simulación de lluvias).
- 2- Las variables hidráulicas responden de forma más sensible al tratamiento de manejo que al tipo de suelo en sistemas bajo SD.
- 3- Las variables hidráulicas medidas por la simulación de lluvias y la conductividad saturada en SD presentan las mismas tendencias en todos los suelos y tratamientos de manejo evaluados.

2. Materiales y Métodos

2.1 Simulación de Lluvias

Para evaluar la dinámica hídrica del suelo se realizaron simulaciones de lluvia mediante un microsimulador de lluvia. El microsimulador aplicaba agua destilada en forma de gotas de 4,7 mm cayendo desde 150 cm de altura, sobre parcelas enmarcadas por un bastidor metálico cuadrado de 25 cm de lado. Los goteros totalizaban 49 unidades estando dispuestos en forma de cuadrícula sobre una placa de acrílico (Kamphorst, 1987; Iruña y Mon, 2004) (Anexo II, Figura A.II.1abc). Se aplicó lluvia simulada durante 1-2 h, hasta llegar a una infiltración constante, con una intensidad promedio de 60 mm h^{-1} equivalente a la precipitación máxima esperable en la región con un período de retorno de 10 años. La energía aplicada fue de $15 \text{ kJ m}^2 \text{ m}^{-1}$. En cada tratamiento se realizaron 6 simulaciones de lluvias correspondiendo 2 para cada subsitio (Anexo II, Figura II.2) Esta medición se realizó sobre los suelos Argiudoles y sobre el Hapludert, mientras que no se realizó para el Haplustol. Algunas de las razones por lo cual no se realizó en este suelo son: (1) la dinámica hídrica en este suelo con gran porcentaje de arenas no es fácilmente evaluada con este método ya que se requerirían tiempos para el comienzo del escurrimiento mayores a 120 minutos; (2) por esta misma razón algunos investigadores han sugerido la utilización de intensidades mayores (120 mm h^{-1}) lo que imposibilitaría la comparación con los tratamientos de los otros sitios evaluados y; (3) en todas las simulaciones se utilizó agua destilada para evitar cambios en el contenido iónico del suelo que pudiese alterar la floculación/dispersión del suelo y en el Haplustol se hubiera necesitado una cantidad de agua destilada que sería operativamente muy complicado de aplicar. En todas las parcelas dispuestas al azar se removió el rastrojo de forma cuidadosa con el fin de no provocar disturbio en la estructura del suelo. En los ambientes naturales se cortó la vegetación al ras y se removió toda la cobertura posible, sin embargo existió un remanente de cobertura de un 10 a 20% (Anexo II, Figura II.3a, b). Por último, en el suelo Hapludert en muchos casos se encontraron grietas de mayor o menor magnitud dentro de las parcelas de simulación (Anexo II, Figura II.3c).

Las variables medidas a partir de las simulaciones fueron las siguientes:

- 1- Infiltración básica (Ib). Para el cálculo de dicha variable se modeló la caída de la infiltración en el tiempo (se registró cada 5 minutos) mediante el modelo de Horton con la ayuda de un software realizado para tal fin (Eiza, 2012).
- 2- Escurrimiento en 1 hora (Esc.1h). Se registró, en ml, el escurrimiento ocurrido dentro de la primer hora de escurrimiento
- 3- Pérdida de Suelo (P_{suelo}). El escurrimiento de todo el ensayo fue recolectado y transportado al laboratorio donde se filtró el sólido para su posterior secado a 50°C y pesado en balanza analítica (0,001 g).
- 4- Tiempo de comienzo del escurrimiento (T.IN.Esc). El tiempo de inicio de escurrimiento fue registrado (en minutos), asignando un valor de 0 para aquellos tratamientos que no registraron escurrimientos.

- 5- Tiempo de estabilización del escurrimiento (T.Est.Esc). Tiempo registrado en minutos en donde la infiltración se hace constante (los valores de infiltración de las últimas 3 lecturas son virtualmente iguales).
- 6- Tiempo de predominio de la infiltración (T.Pred.Inf). Tiempo transcurrido durante el ensayo de simulación donde los mm infiltrados superan los mm escurridos.

2.2 Conductividad hidráulica saturada (K_{sat})

Para la determinación de la K_{sat} se tomaron 9 cilindros (135 cm^3) sin disturbar de 0-5 cm. Para cada tipo de suelo y tratamiento para luego aplicar la metodología propuesta por Klute y Dirksen (1986). Algunos autores han propuesto algunos rangos óptimos de K_{sat} : $43.2 - 432 \text{ cm d}^{-1}$ (Reynolds et al., 2008; Castellini et al., 2013) mientras que para suelos de textura gruesa o con grietas o bioporos excesivos ha sido propuesto un límite superior de K_{sat} : 846 cm d^{-1} con un límite inferior de K_{sat} : 8.6 cm d^{-1} .

2.3 Análisis estadístico

El análisis de las variables provenientes de dichas metodologías fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA, Snedecor y Cochran, 1980) (Tratamiento de manejo: Ambiente natural, Buenas prácticas y Malas prácticas y tipo de suelos: Argiudol -Monte Buey-, Argiudol -Pergamino- y Hapludert) El efecto de las variables composicionales, físicas y estructurales sobre las variables de movimiento de agua (I_b , Esc.1h, P_{suelo} , T.IN.Esc, T.Est.Esc, T.Pred.Inf, K_{sat}) fue evaluado mediante correlaciones de Pearson. Todos los análisis fueron efectuados mediante el programa Infostat (2012).

3. Resultados

3.1 Simulación de lluvias

Las diferentes variables obtenidas a partir de la simulación de lluvias presentaron importantes diferencias entre los tratamientos de manejo evaluados. Como se observa en la Tabla 1, la I_b mostró diferencias significativas del tipo de suelo, del tratamiento de manejo, presentando también una interacción tipo de suelo vs. tratamiento de manejo. Así se encontraron diferencias significativas entre AN y los tratamientos agrícolas para el suelo Argiudol (Monte Buey) y Hapludert, mientras que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos del Argiudol (Pergamino). El AN de este suelo presentó valores significativamente más bajos con respecto a los otros dos suelos, mientras que BP y MP también presentaron los valores más bajos pero sin diferencias estadísticas. No obstante, en general se observó un ordenamiento de I_b de la siguiente forma $AN > BP > MP$.

El volumen escurrido en 1 hora (Esc.1h), presentó efectos del tipo de suelo y del tratamiento de manejo no encontrándose interacción (tipo de suelo vs. tratamiento de manejo) (Tabla 1). Se encontraron valores significativamente mayores para el Argiudol (Pergamino) (445,2 ml) con respecto al Argiudol (Monte Buey) (139,2 ml) y el

Hapludert (214,7 ml). De la misma forma el AN (118,5 ml) presentó diferencias significativas con BP (328,3 ml) y MP (352,3 ml) no encontrándose diferencias entre estos dos últimos tratamientos.

La pérdida de suelo (P_{suelo}), presentó efectos del tipo de suelo ($p=0,02$) pero los efectos debido al tipo de tratamiento fueron mucho más robustos ($p=0,008$). No existió interacción entre tipo de suelos vs. tratamiento de manejo (Tabla 1). El Hapludert mostró los mayores valores de P_{suelo} ($6,3 \text{ g L}^{-1}$) diferenciándose significativamente del Argiudol (Monte Buey) ($1,0 \text{ g L}^{-1}$) pero no así del Argiudol (Pergamino) ($3,5 \text{ g L}^{-1}$). En cuanto a los tratamientos, MP presentó los mayores valores de P_{suelo} con diferencias significativas con respecto a AN ($0,5 \text{ g L}^{-1}$) mientras que a su vez no se encontró diferencias con BP ($3,7 \text{ g L}^{-1}$) y este no se diferenció de AN. Debe destacarse que respecto a la pérdida de suelo existió una clara tendencia $MP > BP > AN$ en donde la diferencia entre los sitios agrícolas podría haberse detectado con la utilización de un p apenas menos exigente.

El tiempo transcurrido para el inicio del escurrimiento (T.IN.Esc) presentó efectos para todos sus factores. La interacción se presenta en la Tabla VI.1. El Argiudol (Monte Buey) presenta un T.IN.Esc mayor en BP con respecto a MP, y este mayor a los tratamientos agrícolas del Argiudol (Pergamino), pero estadísticamente similares a los tratamientos del Hapludert. En estos dos últimos suelos no existieron diferencias significativas entre los tratamientos agrícolas (Tabla 1).

Por su parte, el tiempo hasta la estabilización del escurrimiento (T.Est.Esc) y el tiempo de predominio de la infiltración (T.Pred.Inf) sólo presentaron efectos de tipo de suelo, presentando mayores valores de T.Est.Esc para el Argiudol (Monte Buey) (85,2 min) con respecto al Argiudol (Pergamino) (46,7 min) y al Hapludert (56,7 min). A su vez para el T.Pred.Inf, el Argiudol (Monte Buey) (68,6 min) se diferenció estadísticamente del Argiudol (Pergamino) (26,9 min) y del Hapludert (41,9 min).

Tabla 1. Resultados de los ensayos de simulación de lluvias para los tres suelos evaluados para cada tratamiento (AN: Ambiente Natural, BP: Buenas prácticas y MP: Malas prácticas).

Ib (infiltración básica), Esc.1h (volumen de escurrimiento en 1 hora), P_{suelo} (pérdida de suelo), T.IN.Esc (tiempo inicio del escurrimiento), T.Est.Esc (tiempo de estabilización del escurrimiento), T.Pred.Inf (tiempo de predominio de la infiltración). Letras diferentes indican diferencias significativas de la interacción tipo de suelo vs. tratamiento de manejo (LSD, $p < 0,05$). * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Suelo	Trat.	Ib mm h ⁻¹	Esc.1h ml	P_{suelo} g L ⁻¹	T.IN.Esc	T.Est.Esc (minutos)	T.Pred.Inf
	AN	60,0(0,0) a	-	-	-	-	-
Argiudol	BP	19,7(4,0) bc	108,9(66,1)	0,6(0,1)	46,3(11,0) a	78,5(9,8)	65(11,5)
(Monte Buey)	MP	15,1(0,4) c	308,7(43)	2,4(0,8)	7,8(2,4) b	63,3(5,1)	47,5(5,0)
	AN	20,3(9,4) bc	355,4(19,5)	1,4(1,0)	17,2(4,1) ab	53,3(6,0)	25,8(3,6)
Argiudol	BP	17,9(6,5) bc	545,6(53,9)	3,9(0,5)	7,1(1,6) b	40,0(8,8)	23,3(4,6)
(Pergamino)	MP	11,8(3,0) c	434,7(0,7)	5,2(1,7)	12(2,5) b	46,7(3,0)	31,7(2,2)
	AN	60,0(0,0) a	-	-	-	-	-
Hapludert	BP	24,7(4,5) bc	330,5(14,1)	9,7(5,5)	22(0,1) ab	50,0(7,5)	35,0(10,0)
	MP	24,6(3,1) b	313,6(37,3)	12,4(4,1)	17,2(8,6) ab	53,3(6,8)	42,5(6,3)
Tipo de suelo		***	***	*	*	*	***
Tratamiento de manejo		***	***	**	*	ns	ns
Tipo de suelo*Tratamiento		**	ns	ns	**	ns	ns

3.1 Conductividad hidráulica saturada

La K_{sat} por su parte, presentó únicamente efectos débiles del tratamiento de manejo ($p=0,012$). Como se observa en la Figura 1, el error estándar es muy alto imposibilitando la detección de efectos más contundentes. No obstante se puede afirmar que el tratamiento BP ($37,4 \text{ cm día}^{-1}$) presentó los valores más bajos, diferenciándose significativamente del AN ($64,1 \text{ cm día}^{-1}$). Por su parte, MP ($53,1 \text{ cm día}^{-1}$) no se diferenció significativamente ni de AN ni de BP. Como se observa en esta misma figura el AN y MP presentaron valores por encima del umbral señalado mientras que para todos los suelos con excepción del Argiudol Monte Buey el valor se encontró por debajo de este umbral. El único suelo que presentó alguna tendencia diferente fue en el Argiudol (Monte Buey) donde el ordenamiento fue el siguiente ($AN > BP > MP$).

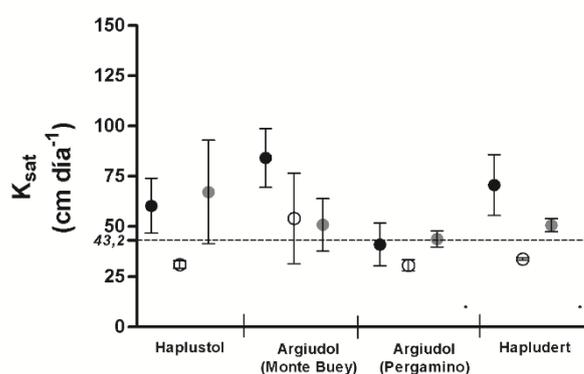


Figura 1. Conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) para los distintos suelos evaluados (Haplustol, Argiudol- Monte Buey, Argiudol -Pergamino y Hapludert) para los tratamientos de manejo, Ambiente natural (círculo negro), Buenas prácticas (círculo blanco) y Malas prácticas (círculo gris). Línea punteada, umbral óptimo inferior según Reynolds et al. (2008).

3.1 Efecto de las variables composicionales, físicas y estructurales sobre el movimiento de agua.

Las variables medidas a través de las simulaciones de lluvias y la K_{sat} fueron correlacionadas con las variables composicionales del suelo, así como con variables de manejo, y otros indicadores de calidad física, química y estructural. Las variables hidráulicas no presentaron correlaciones fuertes con las propiedades composicionales del suelo presentadas en el capítulo II, por ello no se presentaron en este capítulo. Sólo se puede mencionar que la humedad equivalente presentó una correlación significativa con la I_b ($r= 0,52$, $p=0,006$) así como el límite plástico ($r= 0,74$; $p=0,001$) y el límite líquido ($r= 0,52$; $p= 0,007$). También el Esc. 1h presentó un coeficiente de correlación alto con el límite plástico ($r= -0,63$; $p=0,006$). De la misma forma las variables estructurales medidas en el capítulo V (Índice visual a campo, redondez, excentricidad, porosidad visible y número de caras, vértices y aristas), no presentaron tampoco, asociaciones muy fuertes con las variables hidráulicas.

Por el contrario, las variables de manejo del suelo, las variables físicas, las fracciones de carbono orgánico y la estabilidad estructural, presentaron numerosas correlaciones significativas con las variables de movimiento de agua en el suelo medidas por las simulaciones de lluvias, aunque no fue así con la K_{sat} . Dichas correlaciones se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Correlación de Pearson entre Ib (infiltración básica), Esc.1h (volumen de escurrimiento en 1 hora), Psuelo (pérdida de suelo), T.IN.Esc (tiempo inicio del escurrimiento), T.Est.Esc (tiempo de estabilización del escurrimiento), T.Pred.Inf (tiempo de predominio de la infiltración) y las variables de manejo, compactación y porosidad, tamaño y distribución estadística de tamaño de poros, de almacenamiento de agua, fracciones de carbono orgánico y estabilidad estructural. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

	<i>Ib</i>	<i>Esc.1h</i>	<i>P_{suelo}</i>	<i>T.IN.Esc</i>	<i>T.Est. Esc</i>	<i>T.Predom.Inf</i>
Manejo						
ISI	0,72 ***	-0,59 **	-0,51 **			
ISI _{agr}				0,61 **		
Años bajo SD		-0,76 ***		0,78 ***	0,68 **	0,68 **
Soja/Cultivos				-0,57 *		
Soja/Maíz	-0,52 *			-0,50 *		
Maíz/Cultivos	0,52 *					
Soja único cultivo				-0,59 *		
Compactación y porosidad						
DAP	-0,48 *	0,50 *				
R _{p_{corr} θ}					0,51 *	0,53 *
PT	0,53 **	-0,58 **				
P _{tx}				0,53 *		
P _{estr}						
Almacenamiento de agua						
CC						
CAD		0,51 **			-0,44 *	
CA	0,41 *	-0,55 **				
CCR		0,58 **			-0,43 *	
Tamaño y distribución estadística de tamaño de poros						
P _{Mac >1000 μm}						
P _{Mac >300 μm}		-0,44 *		0,47 *		
P _{Mac >50 μm}		-0,51 **				
P _{Mic <50 μm}						
D _{moda}	0,40 *	-0,62 ***		0,55 *	0,50 *	
D _{mediana}		-0,61 ***	-0,46 *		0,50 *	0,58 *
D _{media}		-0,56 **	-0,42 *		0,43 *	0,54 *
DE			0,35 *			
Asimetría			-0,41 *			
Fracciones de carbono orgánico						
COT	0,59 **	-0,44 *				
COPg	0,58 **	-0,46 *				
COPf		-0,41 *		0,69 ***		
COM	0,58 **					
CHt			-0,45 *		0,45 *	
CHs	0,43 *		-0,45 *			
Estabilidad estructural						
DMP _{rap 10s}	0,57 **	-0,55 **				
DMP _{rap}	0,56 **	-0,45 *				
DMP _{ag}				0,50 *		
DMP _{cap}	0,62 ***	-0,65 ***	-0,50 **	0,49 *		
DMP _{rap, ag, cap}	0,48 *	-0,51 **	-0,45 *			

Índice de intensificación de cultivo -ISI-, Índice de intensificación de cultivo para los manejos agrícolas -ISI_{agr}-, Años bajo siembra directa -años bajo SD-, Relación de años con soja sobre la cantidad total de cultivos -Soja/Cultivos-, Relación de años con soja sobre maíz -Soja/Maíz-, Relación de años con maíz sobre la cantidad total de cultivos -Maíz/Cultivos- y soja como único cultivo -Soja único cultivo. Densidad aparente -DAP-, Resistencia a la penetración -R_{p_{corr} θ}-, Porosidad total -PT-, Porosidad estructural -P_{estr}-, Porosidad textural -P_{tx}-. Macroporosidad >1000 μm -logP_{Mac >1000 μm}-, Macroporosidad >300 μm -logP_{Mac >300 μm}-, Macroporosidad >50 μm -P_{Mac >50 μm}-, Microporosidad <50 μm -P_{Mic <50 μm}-, Moda -D_{moda}-, Mediana -D_{mediana}-, Media -D_{media}-, Desvío estándar -DE-, Capacidad de campo -CC-, Capacidad de agua disponible -CAD-, Capacidad de aire -CA-, Capacidad de campo relativa -CCR-, carbono orgánico total -COT-, Carbono orgánico particulado grueso -COPg-, carbono orgánico particulado fino -COPf-, carbono orgánico mineralizable -COM-, hidratos de carbono total -CHt- y hidratos de carbono soluble -CHs- Diámetro medio ponderado por inmersión rápida 10 segundos, humectación rápida, agitación, por capilaridad y promedio de los últimos tres índices (DMP_{rap 10s}, DMP_{rap}, DMP_{ag}, DMP_{cap} y DMP_{ap}, ag., cap., respectivamente.

3.1.1 Manejo

Como se observa en la Tabla 2, las variables de manejo que mejor se correlacionaron con las variables medidas fueron el ISI con I_b , Esc.1h y P_{suelo} y los años bajo SD con el Esc.1h, T.IN.Esc, T.Est.Esc y T.Pred.Inf Por su parte la variable que resultó más adecuada para inferir los manejos fue el T.IN.Esc ya que se correlacionó con el ISI_{agr} , con los años bajo SD y con todas las variables que señalan cambios de rotación con excepción de la relación Maíz/Cultivos.

3.1.2 Compactación y Porosidad

En este caso la DAP se correlacionó de forma negativa con la I_b y positiva con el Esc.1h, mientras que la PT presentó coeficientes de correlación más altos e inversos con respecto a la DAP.

3.1.2 Tamaño de poros y distribución estadística de poros

De forma coherente con los coeficientes de correlación encontrados con la PT, las variables de tamaño y medidas de tendencia central de poros también presentaron coeficientes de correlación altos con el Esc.1h. El tamaño de poros que presentó el mayor coeficiente fue el $P_{\text{Mac}>300}$, el cual se correlacionó de forma negativa con el Esc.1h y positiva con el T.IN.Esc, mientras que la D_{moda} presentó el coeficiente negativo más alto con dicha la Esc.1h y al igual que el $P_{\text{Mac}>300}$, positivo con el T.IN.Esc (Tabla 2). Por otro lado, se debe destacar que esta variable también se correlacionó con la mayoría de las variables hidráulicas. También, la D_{media} , D_{mediana} y asimetría se correlacionaron de forma negativa con la P_{suelo} , mientras que la DE se correlacionó de forma positiva (Tabla 2).

3.1.3 Almacenamiento de agua

Al igual que las variables anteriores, las variables de almacenamiento de agua evaluadas presentaron numerosas correlaciones significativas con el Esc.1h. La CAD y la CCR presentaron coeficientes positivos con el Esc.1h, mientras que la capacidad de aire presentó un coeficiente positivo. No obstante, ninguno de los coeficientes resultó muy elevados.

3.1.4 Fracciones de carbono orgánico

Si bien existieron muchas correlaciones significativas entre las distintas fracciones de carbono y las variables medidas en los ensayos de simulación de lluvia, los coeficientes son más bien bajos, con excepción del COP_f y el T.Est.Esc No obstante, la I_b y el Esc.1h se correlacionaron de forma positiva y negativa respectivamente con varias fracciones orgánicas.

3.1.4 Estabilidad estructural

La estabilidad estructural, presentó un comportamiento muy similar a las fracciones de carbono orgánico, presentado diversas correlaciones significativas con la I_b , Esc.1h y algunas con la P_{suelo} . Así, las correlaciones más altas fueron encontradas para $DMP_{\text{rap } 10s}$ y para DMP_{cap} para I_b y Esc.1h, con signos positivos y negativos respectivamente (Tabla VI.2). Además, la DMP_{cap} y la $DMP_{\text{rap_ag_cap}}$ presentaron coeficientes de correlación negativos con la P_{suelo} . Por último, la variable HS_{WDPT}

asociada a la estabilidad estructural presentó correlaciones significativas con la Ib y el Esc.1h con coeficiente de correlación de 0,76*** y -0,59**, respectivamente.

4. Discusión

Como quedó demostrado en este capítulo, existió una clara diferencia en el movimiento del agua y pérdida de suelo entre el AN y los tratamientos bajo manejos agrícolas en SD. Así Vermang (2012), reconoce a la agricultura como el agente causante de la erosión del suelo cuando se compara con situaciones naturales. Por otro lado, los dos tratamientos de manejo no presentaron grandes diferencias entre sí, encontrándose únicamente un retardo del inicio del escurrimiento (T.IN.Esc) en el Argiudol (Monte Buey) en BP. A través del estudio de diversas variables físicas, químicas, estructurales, etc., se puede entender la complejidad del comportamiento hidráulico del suelo y entender la falta de diferencias significativas, si bien todas las variables presentaron valores más favorables (mayor Ib, menor Esc.1h, menor P_{suelo} , etc.) en situaciones con BP respecto de la MP.

En primer lugar se debe destacar, que si bien algunos autores mencionan disminuciones en la erosión hídrica y en el escurrimiento bajo SD (De Ploey, 1988; Leys et al., 2007), diversos autores también reconocen lo inverso (Martin, 1999; Roger Estrade et al., 2011). Estos últimos, atribuyen esto a la cobertura insuficiente, densificación del suelo o asentamiento del suelo. En este sentido, se vio a lo largo de la tesis, que BP presentó procesos de compactación mayores a MP, y de acuerdo a las correlaciones encontrada aquí, un aumento de la DAP disminuyó la Ib y aumentó el Esc.1h (Tabla 2).

Por otro lado, el asentamiento natural del suelo bajo SD no presentó el mismo efecto, ya que a medida que los años bajo SD aumentaban (más años en BP), el volumen del escurrimiento disminuía (Esc.1h) y duraba más el período sin escurrimientos (Tabla 2). También a favor de BP, tanto el volumen de poros, reflejado especialmente la $P_{\text{Mac}>300}$ y el tamaño de poros más frecuente (D_{moda}), los cuales fueron mayores en BP, se correlacionaron favorablemente con las variables hidráulicas. Además, se pudo observar que las rotaciones con mayor presencia del maíz y menor presencia de soja, así como la permanencia de raíces vivas (ISI e ISI_{agr}), retrasaron el tiempo de inicio del escurrimiento. De forma indirecta, la mayor cantidad de raíces en este sistema puede modificar la cantidad, tamaño y conectividad de poros (Wahl et al., 2004), aumentando la infiltración, disminuyendo la pérdida de suelo y atrasando el inicio del escurrimiento.

Por otra parte, como se vio en el capítulo anterior, la rotación más diversa de BP, produjo un aumento de la EE y de la hidrofobicidad del suelo. Ambas variables presentaron elevados coeficientes de correlación en donde un aumento de ambas condujo a un aumento de la Ib y disminución del Esc.1h y P_{suelo} . En este sentido, Barthés y Rose (2002) demostraron una relación negativa entre la estabilidad de agregados y la erosión y escurrimiento superficial. En particular, la mayor relación de la Ib y del Esc.1h con la $DMP_{\text{rap}10s}$ puede estar dada porque dicha variable aísla el efecto del estallido de agregados, el cual se produce en los primeros momentos de la lluvia.

Principalmente en suelos limosos, este proceso puede provocar un sellamiento del suelo (Morrás et al., 2001), disminuyendo la I_b , aumentando la $Esc.1h$, pero no alterando necesariamente la P_{suelo} (Tabla VI.2). Como complemento, las altas correlaciones encontradas con DMP_{cap} con las mismas variables y la P_{suelo} y $T.IN.Esc$ puede estar reflejando este mismo proceso, aunque también las diferencias mineralógicas de los suelos.

Todo lo mencionado anteriormente se vio reflejado en la microestructura del suelo (capítulo IV, sección B), donde la orientación de los poros, la actividad biológica y los tipos de estructuras, son útiles para explicar los resultados del movimiento de agua en cada uno de los suelos.

En cuanto a los tipos de suelos se pudo observar que las condiciones hidrológicas más pobres fueron detectadas en el Argiudol (Pergamino). Esto puede ser explicado, por factores físicos (compactación, porosidad), químicos (bajo contenido de carbono), así como estructurales (estructuras laminares, baja estabilidad estructural). En estos factores, existieron diversas variables que se correlacionaron con las variables hidrológicas. Por otro lado, este suelo derivado del loess, con elevado contenido de limos y limos de baja densidad presentan una alta fragilidad a la erosión hídrica (Wischmeier et al., 1971) y a la degradación física (Cosentino y Pecorari, 2002). En contraposición, los valores más adecuados de I_b y $Esc. 1h$, entre otras variables, fueron encontrados en el Argiudol (Monte Buey) y en el Hapludert. En el primer suelo, aunque composicionalmente no difiere marcadamente del Argiudol (Pergamino), todo el resto de los rasgos físicos, estructurales y químicos son más favorables a la infiltración y mantenimiento de la estructura (capítulos III y IV). Además como se pudo observar en los análisis micromorfológicos, este suelo presentó una alta porosidad, orientada verticalmente, sin presencia importante de estructuras laminares.

Por otro lado, el Hapludert presenta altos valores de CO , el cual se correlaciona favorablemente con las variables hidráulicas (Tabla 2) y puede hipotetizarse que los altos valores de I_b y $T.IN.Esc$ podría deberse a la mayor PT , HE y los altos valores en las propiedades reológicas (límite líquido, plástico, índice de plasticidad, actividad de las arcillas) y de minerales expandibles que por un lado pueden aumentar la retención de agua y estructuración del suelo y por otro en seco, generar posibles rutas preferenciales del agua. En contraposición, este suelo fue el que más pérdida de suelo presentó (Tabla 1). Esto podría estar explicado por el carácter expandible de las arcillas, las cuales con el contacto con el agua generarían procesos de expansión del suelo, en donde podría generarse una pérdida de estabilidad estructural y una consecuente pérdida de suelo (Stern et al., 1991; Igwe et al., 1999). Sin embargo, como menciona Le Bissonnais (1996), la rotura de agregados por hinchamiento diferencial, típico de esos suelos, no tendría grandes consecuencias en la infiltración (lo cual fue verificado para este suelo) ya que los fragmentos generados por este mecanismo son relativamente grandes no obstruyendo o sellando los poros.

En cuanto a la K_{sat} , la alta variabilidad de los datos, producto de una alta variabilidad espacial y temporal propia de esta variable (D'Haene et al., 2008; Daraghmech et al., 2008) enmascaró los posibles efectos de los tratamientos de manejo. No obstante, se pudo apreciar que BP presentó menores valores de K_{sat} en los

tratamientos con mayor intensificación agrícola (BP) con excepción del Argiudol (Monte Buey).

Esta divergencia con los resultados obtenidos con el simulador de lluvias puede explicarse considerando el tipo de entrada de agua en el suelo. En la medición de la K_{sat} , el agua entra al suelo lentamente sin provocar ningún disturbio en el suelo, siendo, el movimiento de agua gobernado por la compactación del suelo y variables que reflejan la arquitectura poral. Así la mayor compactación ($>DAP$) y presencia de estructuras laminares derivó en bajas conductividades para el BP del Haplustol y el Argiudol (Pergamino). Por otro lado, si bien en el Argiudol (Monte Buey) también la DAP fue mayor, existió una mayor conectividad de poros con una orientación vertical (capítulo IV, sección b), y por ende mayor K_{sat} . En cuanto a la simulación de lluvias, la entrada de agua en el suelo es violenta, teniendo mayor incidencia los factores de estabilización estructural. Por ello, todos los tratamientos de BP, los cuales presentaron valores superiores de EE con respecto a MP, presentaron valores en los parámetros de movimiento de agua más adecuados.

5. Conclusión

En síntesis, el movimiento del agua en los tratamientos de manejo bajo estudio dependió de la importancia de distintos factores opuestos, por un lado la compactación del suelo, producto de una mayor intensificación de cultivo y las características de los poros vinculados al movimiento hidráulico y a la estabilidad de los mismos. En este capítulo, si bien no se encontraron diferencias notorias entre BP y MP, puede concluirse que bajo SD, el movimiento de agua pudo ser explicado principalmente por la estabilidad estructural, la cual presentó efectos positivos en relación a la infiltración y a la erosión del suelo en contraposición a la compactación resultante del tránsito y asentamiento natural de este sistema. De esta forma se acepta la **hipótesis 1**. Por otro lado, aunque de forma leve, se pudo detectar una influencia del factor composicional del suelo en la dinámica hidráulica para cada tipo de suelo. No obstante, como se verificó en el capítulo, las variables de manejo afectaron en mayor grado la respuesta hidráulica de los tratamientos. Así se corrobora la **hipótesis 2**. También, la comparación del movimiento de agua lenta y rápida (simulador vs. K_{sat}), logró explicar alguna de las divergencias de los trabajos sobre movimiento de agua bajo SD. Esta divergencia podría ser sintetizada en el balance de la compactación del suelo y la estabilidad estructural ante diferentes energías en la entrada de agua en el suelo. Debido a las diferencias encontradas en los resultados entre ambas metodologías se rechaza la **hipótesis 3**. Por último, puede mencionarse a la $P_{Mac>300}$, D_{moda} , $DMP_{rap\ 10s}$ y DMP_{cap} , como las variables más importantes en el movimiento del agua en los tratamientos evaluados.

Bibliografía

- Alvarez, C.R., M.A. Taboada, S. Perelman y H.J.M. Morrás. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Res.* <http://dx.doi.org/10.1071/SR13281>.
- Alvarez, R. y R.S. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*. 83: 127-141.
- Balbuena, R.H., G.F. Botta, Rivero, E.R.D. 2009. Herramientas de labranza para la descompactación del suelo agrícola, 1ed. Orientación Gráfica editora, Buenos Aires. ISSN 978-987-9260-66-1
- Ball, B.C. y E.A.G. Robertson. 1994. Soil structural and transport properties associated with poor growth of oil-seed rape in soil direct drilled when wet. *Soil Till. Res.* 31, 119-133
- Barthes, B. y E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47, 133-149.
- Bathke, G.R y G.R. Blake. 1984. Effects of soybean on soil properties related to soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1398-1401
- Bonel, B., H. Morrás y V. Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un suelo Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ci. Suelo (Argentina)*. 23: 1-12
- Botta, G., O. Pozzolo, M. Bomben, M. Tourn, E. Soza, H. Rosatto, A. Gili, J. Ressia, D. Rivero, J.Y. Vazquez y S. Stadler. 2007. Aplicación del tráfico controlado en la cosecha de maíz: Efectos sobre rendimientos del cultivo y las propiedades físicas del suelo. *Agro-Ciencia* 23.
- Castellini, M., M. Pirastru, M. Niedda y D. Ventrell. 2013. Comparing physical quality of tilled and no-tilled soils in an almond orchard in southern Italy. *Italian Journal of Agronomy* . 8:e20
- Castiglioni, M.G, M.G. Wilson, A. Paz Gonzalez, M. E. Mendive Alvarez, C. Irurtia, J. Oszust, M.C. Sasal. 2011. Estudios de la Zona no Saturada del Suelo Vol. X - ZNS'11. Actas de las X Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo, Salamanca (España), I.S.B.N.: 978-84-694-6642-1.
- Chagas, C, H. Marelli y O. Santanatoglia. 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol típico bajo tres sistemas de labranza. *Ci. Suelo (Argentina)*. 12: 11-16.
- Chagas, C., C. Irurtia, J. Thisted, O. Santanatoglia, M. Massobrio, M. Castiglioni y A. Buján. 2004. Movimiento horizontal y vertical del agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa. *Ci. Suelo (Argentina)*. 22: 117-122.
- Chagas, C.I. O.J. Santanatoglia, M.G. Castiglioni y H.J. Marelli. 1995. Tillage and cropping effects on selected properties of an Argiudoll in Argentina. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 643-655.
- Cosentino, D. y C. Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)*. 20: 9-16.
- D'Haene, K, J. Vermang, W.M. Cornelis B.M.L. Leroy, W. Schiettecatte, S. De Neve, D. Gabriels y G. Hofman. 2008. Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops. *Soil Till. Res.* 99: 279-90.
- Daraghmeh, O.A., J.R. Jensen y C.T. Petersen. 2008. Near-Saturated hydraulic properties in the surface layer of a sandy loam soil under conventional and reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1728-1737.

- De la Vega, G., M.G. Castiglioni, M.J. Massobrio, C.I Chagas, O.J. Santanatoglia y C. Iurtia. 2004. Infiltración en un Argiudol Vértico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura y humedad inicial". *Ci. Suelo (Argentina)*. 22: 52-55.
- De Ploey, J. 1988. No tillage experiments in the central Belgian loess belt. *Soil Technology*. 1: 181-184.
- Díaz-Zorita, M., J.H. Grove, L. Murdock, J. Herbeck y E. Perfect. 2004. Soil structural disturbance effects on crop yields and soil properties in a no-till production system. *Agron. J.* 96: 1651-1659.
- Filgueira, R., C.G. Soracco, G.O. Sarli, L. Fournier. 2006. Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. *Ci. Suelo (Argentina)*. 24: 39-48.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. New York. pp 770.
- Iurtia, C.B. y R. Mon. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Instituto de Suelos, CIRN INTA Castelar. Publicación Técnica.
- Kamphorst, A. 1987. A Small Rainfall Simulator for the Determination of Soil Erodibility. *Netherlands J. Agric. Sci.* 35: 407 – 415.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Leys, A., G. Govers, K. Gillijns, J. Poesen. 2007. Conservation tillage on loamy soils: explaining the variability in interill runoff and erosion reduction. *Eu. J. Soil Sci.* 58: 1425-1436.
- Mahboubi, A.A. y R. Lal, N.R. Faussey. 1993. Twenty-eight years of tillage effects on two soil in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am J.* 57: 506-512.
- Marelli, H.J., J.M. Arce, M.E. Zabala. 2006. Conservación sustentable del suelo y el agua. Información para extensión N°99. Ediciones INTA Marcos Juárez. Argentina, 12 pp.
- Martin, P. 1999. Reducing flood risk form sediment laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. *Soil Till. Res.* 52: 233-245.
- Morrás, H., B. Bonel, L. Moretti, E. Favret y E. Bressan. 2008. Porosidad y microestructura superficial de un Argiudol típico bajo siembra directa y labranza reducida. *Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis (Editado en CD)*.
- Morrás, H., B. Bonel, y R. Michelena. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, (Editado en CD)*.
- Morrás, H., C. Iurtia, C. Ibarlucea, M. Lantin y R. Michelena. 2001. Recuperación de suelos pampeanos degradados mediante siembra directa y subsolado. En: *Siembra Directa II (Panigatti, Buschiazzo y Marelli, Eds.)*. Ediciones del INTA, pp. 263-278.
- Nesmith, D.S., D.E. Radcliffe, W.L. Hargrove, R.L. Clark, E.W. Tollner. 1987. Soil compaction in double-cropped wheat and soybeans on an Ultisol. *Soil Sci. Soc. Am J.* 51: 183-186.
- Novelli, L.E, O.P. Caviglia y R.J.M. Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma*. 167-168: 254-260.
- Reynolds, W.D., C.F. Drury, C.S. Tan, C.A. Fox, y X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*. 152: 252-263.
- Roger-Estrade, J., J. Labreuche y G. Richard. 2011. Effects of no-ploughing methods on soil physical properties: Consequences on soil erosion in a temperate climate. *Cahiers Agricultures*. 20: 186-193.

- Sanford, J.O. 1982. Straw and tillage management practices in soybean wheat double cropping. *Agron. J.* 74: 1032-1035.
- Sasal, C. 2012. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Tesis Doctoral. Área Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados. FAUBA. Pp 144.
- Sasal, C., A. Andriulo y M. Taboada. 2006. Soil Porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in argentinian pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Schafer, R.L., C.E. Johnson, A.J. Koolen, S.C. Gupta y R. Horn. 1992. Future research needs in soil compaction. *Trans. ASAE.* 35: 1761-1770.
- Shahab, H., H. Emami, G.H. Hagnia y A. Karimi. 2013. Pore size distribution as a soil physical quality index for agricultural and pasture soils in northeastern Iran. *Pedosphere.* 23: 312-20.
- Stern, R., M. Ben-Hur y I. Shainberg. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Sci.* 152: 455-462.
- Topp, G.C., W.D. Reynolds, F.J. Cook, J.M Kirby, M.R. Carter. 1997. Physical attributes of soil quality. En: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. En: *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 21-58.
- Unger, P.W. y T.C Kaspar. 1994. Soil compaction and root growth: a review. *Agron. J.* 86: 759:766.
- Vermang, J. 2012. *Erosion Processes and Physical Quality of Loamy Soils as Affected by Reduced Tillage*. Ghent, Belgium: Ghent University. Faculty of Bioscience Engineering.
- Wahl, N.A., O. Bens, U. Buzcki, E. Hangen y R.F. Huttl. 2004. Effects of conventional and conservation tillage on soil hydraulic properties of a silty-loamy soil. *Physics and chemistry of the earth* 29: 821-829.
- Wischmeier, W.H., C.B. Johnson y B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26: 189-193.
- Zaccagnini, M. y N. Calamari. 2001. Labranzas conservacionistas, siembra directa y Biodiversidad. En: *Siembra Directa II* (Panigatti, Buschiazzo y Marelli, Eds.). Ediciones del INTA, pp. 29-68.

Anexo II

1. Microsimulador de lluvias. (Iruetia y Mon, 1994)

En la parte superior se apoya la caja porta goteo en cuya base están los 49 picos formadores de gotas. Los picos tiene un diámetro interno de 0.5 mm y poseen una alimentación de agua desde un reservorio de acrílico, colocado en una de las aristas de la estructura. Las gotas formadas tienen entre 4.7 a 5.1 mm de diámetro. La base del reservorio puede variar de altura con la cual se modifica la intensidad de lluvia de acuerdo a la escala graduada en el soporte (desde 0 a 300 mm h⁻¹). En la parte inferior existe un marco metálico que delimita la microparcela de medición de 50 cm de lado con uno de los costados en forma de vertedero por donde se recibe el escurrimiento.

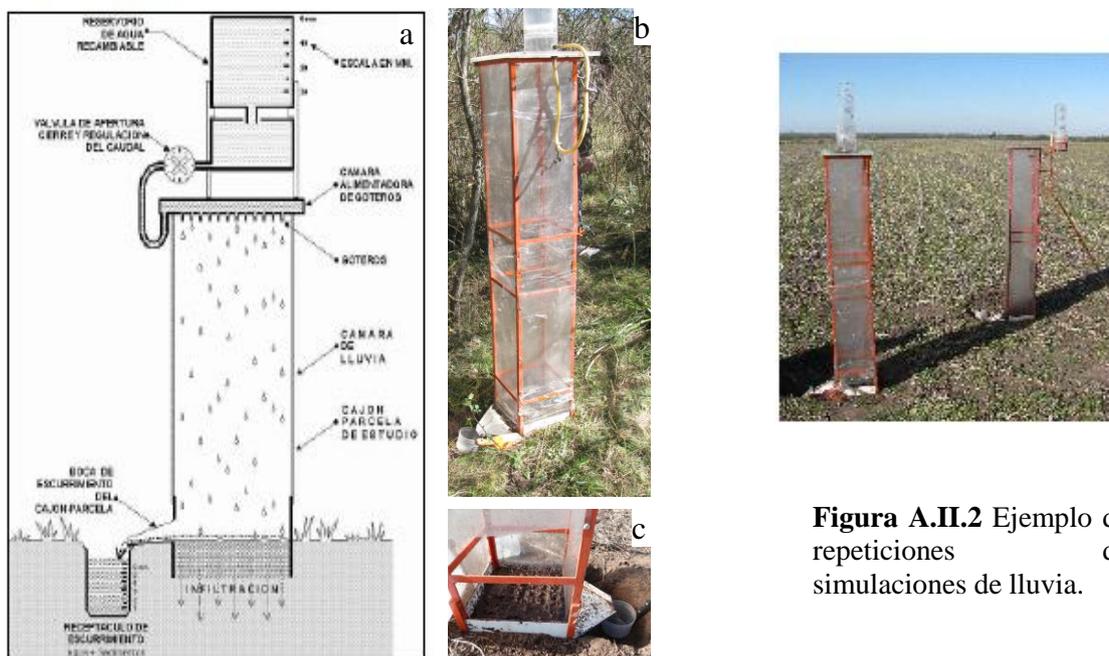


Figura A.II.2 Ejemplo de repeticiones de simulaciones de lluvia.

Figura A.II.1 a) Descripción del microsimulador de lluvias; b y c) Detalle del microsimulador en funcionamiento.



Figura A.II.3 a) Parcela del microsimulador con remoción de rastrojo; b) Parcela del microsimulador de AN y c) Ejemplo de grietas en parcela del Hapludert.