

"Fertilidad físico-química y productividad de soja (*Glycine max (L.) Merr.*) en suelos del norte santafesino enmendados con cama de pollos y sulfato de calcio en dos sistemas de labranza".

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

Luciano Nicolas Mieres

Ingeniero Agrónomo - Facultad de Ciencias Agrarias
Universidad Nacional del Litoral-2009

Área de Investigación en Producción Vegetal
Estación Experimental Agropecuaria Reconquista. INTA Centro Regional Santa Fe.



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

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Silvia Carmen Imhoff

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional del Litoral)
Doctor en Agronomía (Universidad de Sao Pablo, Brasil)

Consejero

Miguel Ángel Taboada

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Eco y Agro-sistemas (Instituto Nacional Superior de Toulouse, Francia)

Consejero

Sebastian Zuil

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional del Litoral)
Master Scientiae en Producción Vegetal (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO

Olga Susana Heredia

Ingeniera Agrónoma (Universidad Nacional de Buenos Aires)
Master Scientiae en Ciencias del Suelo (Universidad de Buenos Aires)
Doctora (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

José Manuel Cisneros

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Río Cuarto)
Master Scientiae en Ciencias del Suelo (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Tecnología Agroambiental (Universidad Politécnica de Madrid)

JURADO

Marcelo Germán Wilson

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos).
Magister Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Río Cuarto).
Doctor en Ciencias de la Tierra y el Ambiente (Universidad de La Coruña)

Dedicatoria

Dedico esta tesis, a mis padres Reynaldo y Elvira, a mis hermanas Marcela y Lorena, por brindarme apoyo incondicional para realizar mis proyectos. A Marianela y Camilo, mi familia, por el acompañamiento y apoyo, pero sobre todo porque fomentan con amor y entusiasmo mi espíritu de forma cotidiana.

Agradecimientos

A mi directora Silvia Imhoff, por el apoyo y confianza depositada en mí durante este proceso. A Miguel Taboada por sus valiosos aportes. A Sebastián Zuil por la disposición para acompañar los primeros pasos de mi formación de posgrado y colaborar en el trabajo cotidiano.

Al Área de Investigación en Producción Vegetal de la EEA Reconquista de INTA, por brindar el espacio y los recursos. A Daniela Vitti, Diego Szwarc, Ana Brach, Melina Almada, Gonzalo Scarpín, quienes durante distintas etapas del posgrado han sabido dar su colaboración, apoyo y amistad. A Ester Lorenzini, por aportar predisposición y experiencia en la generación de resultados analíticos de laboratorio.

A Marcelo Spontón, Hugo Lorenzini, Claudio Lorenzini, Tulio Longhi, Marcelo Petrolli, Daniel Maidana y Andres Feresin por las tareas realizadas en experimentos de campo.

A Marcelo Paytas, Mariano Cracogna y Gabriel Lacelli, quienes desde roles directivos del INTA EEA Reconquista han contribuido en mi proceso de formación.

A Elbio Bianchi, Carlos Bianchi y Jonatán Bianchi quienes aportaron materiales, instalaciones y apoyo para realizar experimentos.

Un especial agradecimiento a las instituciones que hicieron posible mi formación y desarrollo profesional: al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria por becarme y a la Escuela Para Graduados Alberto Soriano de la FAUBA, institución Universitaria Estatal Argentina que dio marco a mis estudios de posgrado.

Declaración

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.”

Ing. Agr. Luciano Nicolás Mieres.

Índice general

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Declaración.....	v
Índice general.....	vi
Índice de tablas.....	ix
Índice de figuras.....	xi
Abreviaturas.....	xiv
Resumen.....	xv
Abstract.....	xvi
Capítulo 1: Introducción General.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.1.1. Suelos chaco pampeanos de Argentina.....	1
1.1.2. Uso actual de los suelos y estado de conservación.....	2
1.1.3. Factores asociados a la agregación de suelos.....	4
1.1.3.1. Mineralogía y tamaños de partículas.....	4
1.1.3.2. Carbono orgánico del suelo.....	5
1.1.3.3. Cationes polivalentes y acidez del suelo.....	7
1.1.4. El uso de cama de pollos para mejorar los suelos.....	8
1.1.5. El sulfato de calcio como enmienda.....	10
1.1.6. El cultivo de soja y el uso de enmiendas.....	13
1.2. Objetivos.....	14
1.2.1. Objetivo general.....	16
1.2.2. Objetivos específicos.....	16
1.2.2.1. Objetivo específico 1.....	16
1.2.2.2. Objetivo específico 2.....	16
1.2.2.3. Objetivo específico 3.....	16
1.3. Hipótesis.....	17
1.3.1. Hipótesis asociadas al objetivo específico 1.....	17
1.3.2. Hipótesis asociadas al objetivo específico 2.....	17
1.3.3. Hipótesis asociadas al objetivo específico 3.....	17
1.4. Organización para la presentación de los resultados.....	17
Capítulo 2: Materiales y Métodos.....	18
2.1. Sitio experimental.....	19
2.1.1. Localización.....	19
2.1.2. Suelos y paisaje.....	19
2.1.3. Características climáticas y meteorológicas.....	21
2.2. Tratamientos y diseño experimental.....	23
2.3. Caracterización de enmiendas y materiales utilizados.....	24
2.3.1. Cama de Pollo.....	25
2.3.2. Sulfato de calcio.....	25
2.3.3. Labranzas.....	26
2.3.4. Manejo del cultivo de soja.....	26

Capítulo 3: <i>Estabilidad de agregados y su relación con fracciones de carbono, en un suelo enmendado con cama de pollo y sulfato de calcio</i>	28
3.1. Introducción.....	29
3.2. Materiales y Métodos.....	32
3.2.1. Muestreo de suelo.....	32
3.2.2. Variables medidas y cálculo.....	32
3.2.2.1. Carbono orgánico total de suelo en masa equivalente y carbono orgánico particulado de suelo.....	33
3.2.2.2. Carbohidratos solubles en agua.....	33
3.2.2.3. Glomalina fácilmente extraíble (GFE) y glomalina total (GT).....	34
3.2.2.4. Estabilidad de agregados.....	34
3.2.2.5. Densidad aparente.....	36
3.2.3. Análisis de la información.....	36
3.3. Resultados.....	37
3.3.1. Carbono orgánico total, particulado y carbohidratos solubles del suelo....	37
3.3.2. Proteína relacionada a la glomalina del suelo.....	41
3.3.3. Estabilidad de agregados del suelo (EAS).....	43
3.3.3. Relación entre estabilidad de agregados y compuestos asociados a su agregación.....	47
3.4. Discusión.....	50
3.5. Conclusiones.....	53
Capítulo 4: <i>Efecto de cationes y acidez en la agregación del suelo enmendado con cama de pollo y sulfato de calcio</i>	52
4.1. Introducción.....	55
4.2. Materiales y Métodos.....	60
4.2.1. Determinaciones de capacidad intercambio catiónico y bases del suelo....	60
4.2.2. Determinaciones de acidez del suelo.....	60
4.2.3. Estabilidad de agregados	60
4.2.4. Análisis de la información.....	60
4.3. Resultados.....	61
4.3.1. Cambios en los cationes del suelo.....	61
4.3.1.1. Cama de pollos y labranzas.....	61
4.3.1.2. Sulfato de calcio.....	65
4.3.2. Acidez del suelo.....	66
4.3.3. Relación entre acidez y cationes del suelo.....	68
4.3.4. Relación entre cationes, acidez y estabilidad de agregados.....	69
4.4. Discusión.....	71
4.5. Conclusiones.....	75
Capítulo 5: <i>Productividad de soja [Glycine max (L.) Merr.] en suelos de fertilidad físico-química mejorada con cama de pollo, yeso y labranzas</i>	76
5.1. Introducción.....	77
5.2. Materiales y Métodos.....	80
5.2.1. Tratamientos y diseño de experimentos.....	80
5.2.2. Determinaciones de Densidad Aparente, porosidad total y distribución del tamaño de poros del suelo	81

5.2.3. Determinaciones del tamaño de partículas del suelo.....	82
5.2.4. Determinaciones de Nitrógeno total, disponible y fósforo total y disponible.....	82
5.2.5. Variables de fracciones carbonadas, estabilidad de agregados, cationes y acidez.....	83
5.2.6. Muestras de Biomasa total y de órganos de soja.....	83
5.2.7. Análisis de la información.....	84
5.3. Resultados.....	86
5.3.1. Densidad aparente y tamaño de poros del suelo.....	86
5.3.2. Tamaño de partículas.....	87
5.3.3. Concentración de Nitrógeno total y disponible.....	88
5.3.4. Concentración de Fósforo total y disponible.....	91
5.3.5. Biomasa aérea total y de órganos del cultivo de soja.....	92
5.3.6. Análisis multivariado de propiedades de suelo y cultivo.....	94
5.3.7. Variables asociadas a la productividad de soja.....	96
5.4. Discusión.....	98
5.5. Conclusiones.....	101
Capítulo 6: Conclusiones generales.....	102
6.1. Líneas de investigación futuras.....	105
7.1 Bibliografía.....	106

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Estimaciones Agrícolas del Ministerio de Agroindustria, para los cultivos soja, maíz, girasol y algodón en provincias de la pampa chaqueña. Campaña 2013-2014.	3
Tabla 2.1: Secuencia agrícola de sitio e intensidad de secuencias (ISI) de cultivos de trigo (T), girasol (G) soja (S), maíz (M), algodón (A).	19
Tabla 2.2: Suelo Argiudol acuértico Serie Reconquista. (INTA, 2016)	20
Tabla 2.3: Tratamientos utilizados en experimento. Adiciones estimadas de elementos carbono (C), nitrógeno (N), fosforo (P), y azufre (S) en base a caracterizaciones de los materiales utilizados.	23
Tabla 2.4: Tratamientos utilizados en experimento. Adiciones estimadas de elementos metálicos calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K) en base a caracterizaciones de los materiales utilizados.	24
Tabla 2.5: Caracterización de parámetros químicos de cama de pollos. Datos obtenidos en el laboratorio de suelos, agua y material vegetal de la EEA Reconquista y en laboratorio de servicios analíticos de Facultad de Ingeniería Química, UNL. 2012.	25
Tabla 3.1: Contenidos de carbono orgánico total (COT), particulado (COT) y carbohidratos solubles (CHS), evaluados en dos profundidades de suelos tratados con dos dosis de cama de pollo (CP), dos tipos de labranza (LM y SD) y tres dosis de sulfato de calcio (SFC). Valores medios \pm desvío estándar de la media.	39
Tabla 3.2: Contenidos medios y error estándar de proteínas relacionadas a la glomalina del suelo (PRGS) y su contenido fácilmente extraíble (PRGS-FE), en tratamientos con dos dosis de cama de pollos (0 CP y 20 CP), dos sistemas de labranza (LM y SD) y tres dosis de sulfato de calcio (0SFC, 0,8SFC y 1,6SFC) en dos profundidades de suelo evaluados.	41
Tabla 3.3: Diámetros de agregados (DMP) de dos profundidades de suelo, tratados con cama de pollo (CP), sulfato de calcio (SFC) y labranzas, donde se evaluó la estabilidad de agregados (EAS) y los pretratamientos humectación lenta (h-lenta) y rápida (h-rápida) con agua, y con agitación mecánica (d-mecánica). Letras distintas indican diferencias significativas entre medias del factor según test L.S.D de Fisher (α : 0,05). * indica diferencias significativas $p < 0,05$; ** indica diferencias significativas $p < 0,01$; *** indica diferencias significativas $p < 0,001$, ns indica diferencias no significativas.	46
Tabla 3.4: Coeficientes de correlación de Pearson, entre variables de suelo estudiadas en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm). * indica diferencias altamente significativas ($p < 0,001$).	48

- Tabla 3.5:** Coeficiente de correlación canónica (R), proporción de la variancia total explicada por cada par de variables canónicas (R^2), estadístico (Lambda) y niveles de probabilidad (p-valor) asociados a dicha prueba (Infostat, 2015) 49
- Tabla 4.1:** Valores medios de la relación entre bases intercambiables Ca^{2+}/Mg^{2+} , K^+/Mg^{2+} y $Ca^{2+} + Mg^{2+}/K^+$ en suelos tratados con cama de pollo (CP), labranza (SD y LM) y yeso (SFC), en dos profundidades (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) de un suelo franco limoso. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para cada variable. Test LSD Fischer (α : 0,05). 65
- Tabla 4.2.:** Análisis de varianza y comparación de medias de tratamientos de cama de pollo, labranza y yeso sobre suelo franco limoso, del potencial hidrógeno del suelo (pH), el potencial hidrogeno potencial (pH potencial) en dos profundidades de suelo. Letras distintas indican diferencias significativas entre medias del factor según test LSD de Fisher (α : 0,05). * indica diferencias significativas $p < 0,05$; ** indica diferencias significativas $p < 0,01$; *** indica diferencias significativas $p < 0,001$, ns indica diferencias no significativas. 67
- Tabla 4.3:** Coeficientes de correlación de Pearson, entre el pH y las variables pH potencial, bases intercambiables calcio (Ca^{2+}) magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+), estudiadas en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) en tratamientos con 20 Mg ha^{-1} de cama de pollo (20 CP) y sin enmienda (0 CP). * indica diferencias significativas ($p < 0,001$). 69
- Tabla 4.4:** Relación canónica entre factores abióticos de la agregación de suelo, acidez y variables asociadas a estabilidad estructural de agregados, en dos profundidades de suelo estudiadas. Coeficiente de correlación canónica (R), proporción de la variancia total explicada por cada variable canónica (R^2), estadístico (Lambda) y niveles de probabilidad (p-valor) asociados a la prueba (Infostat, 2015) 70
- Tabla 5.1:** Variables de suelo consideradas para realizar análisis de componentes principales y de regresiones múltiple. 83
- Tabla 5.2** Variables de biomasa de cultivo de soja estudiadas, momento, siglas y unidad de medida. 84
- Tabla 5.3** Variables de suelo sobre las que se realizó análisis de la varianza. 85
- Tabla 5.4:** Fracciones Arena, Limo y Arcilla del suelo franco limoso, en dos profundidades del horizonte diagnóstico A, para los tratamientos de Labranza Mínima (LM) y Siembra Directa (SD). Letras distintas indican diferencias significativas entre medias del factor según test L.S.D de Fisher (α : 0,05). * indica diferencias significativas $p < 0,05$; ** indica diferencias significativas $p < 0,01$; ns indica diferencias no significativas. 80

Tabla 5.5: Análisis de varianza y comparación de medias de tratamientos de cama de pollos (CP), sulfato de calcio (SFC) y labranza (SD y LM) sobre suelo franco limoso, donde se consideró la producción de biomasa aérea total (B.A.Total en R3 y R8) y por órganos: tallos (B.Tallo), vaina (B.Vaina), y grano (B.Grano) y del número de granos (N.Grano) y vainas (N.Vaina). Letras distintas indican diferencias significativas entre medias de cada factor. ns: diferencias no significativas, * diferencias significativas $p < 0,05$; ** diferencias significativas $p < 0,01$; *** diferencias significativas $< 0,001$. Test LSD Fischer (α : 0,05). 93

Tabla 5.6: Análisis de regresión lineal de variables de suelo como predictores de la biomasa aérea total (B.A.Total), biomasa de granos (B.Grano), número de vainas (NVaina) y número de granos (N.Grano) del cultivo de soja en campaña 2012-13. 100

Índice de Figuras

Figura 2.1: Argiudol acuertico Serie Reconquista. Junio 2015.	21
Figura 2.2: Temperaturas medias diarias, máximas medias diarias y media mensual histórica para los meses de noviembre a mayo en la localidad de Reconquista. Santa Fe.	22
Figura 2.3: Precipitaciones diarias acumuladas y precipitaciones medias históricas acumuladas, los meses de noviembre a mayo en la localidad de Reconquista. Santa Fe	22
Figura 2.4: Imagen fotográfica del grupo en serie de herramientas (cincel, rastra de dientes y rolo desterrador) utilizados para incorporar las enmiendas mediante labranza mínima.	27
Figura 3.1: Contenido de carbono orgánico total (COT), particulado (COP) y carbohidratos solubles (CHS) determinados en dos profundidades (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) de suelo franco limoso tratado con dos dosis de cama de pollos (0 y 20 Mg ha ⁻¹). Valores medios ± error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variable y profundidad, test LSD Fisher (α : 0,05).	38
Figura 3.2: Carbohidratos solubles en agua (CHS) en tratamientos con roturación de suelo para incorporar materiales (LM) y labranza cero (SD), en dos profundidades de suelo evaluadas y para tratamientos con cama de pollos (20 CP barras grises) y sin cama de pollos (0 CP barras blancas). Valores medios ± error estándar de la media (n=3). Letras distintas indican diferencias significativas entre sistemas de labranzas según test LSD Fisher (α : 0,05)	40
Figura 3.3: Contenido de proteínas relacionada a la glomalina de suelo fácilmente extraíble (PRGS-FE) y proteína relacionada a la glomalina total del suelo (PRGS) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) tratados con tres dosis de sulfato de calcio (0, 0,8 y 1,6 Mg ha ⁻¹) y dos dosis de cama de pollo (CP). 0 CP, sin aplicación de cama de pollos; 20 CP, con aplicación de 20 Mg ha ⁻¹ de cama de pollos. Valores medios ± error estándar de la media (n=3). Test LSD Fisher (α : 0,05).	43

Figura 3.4: Distribución gráficas de variables canónicas significativas generadas para dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) al considerar dos conjuntos de variables del suelo (Agentes Orgánicos y la estabilidad de agregados). 50

Figura 4.1: Valores medios de contenidos intercambiables de calcio (Ca^{2+} ; barra gris claro), magnesio (Mg^{2+} ; barra gris medio) potasio (K^+ ; barra negra) y sodio (Na^+ ; barra gris oscuro) del suelo, junto a capacidad de intercambio de cationes (CIC; barra en blanco) en tratamientos de abonado de suelos con cama de pollo en suelo franco limoso, donde se consideró la profundidad 0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm de suelo. Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para cada variable. Test LSD Fischer (α : 0,05). Las barras indican el error estándar de la media. 62

Figura 4.2: Contenidos relativos de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+) y la instauración (IS) de la capacidad de intercambio catiónico, en suelos tratados con dos dosis de cama de pollos (0 CP y 20 CP) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) 64

Figura 4.3: Contenidos intercambiables de calcio (Ca^{2+}) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) ante tres dosis de sulfato de calcio (SFC). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Test de LSD de Fisher (α : 0,05). Las barras indican el error estándar de la media 66

Figura 4.4.: Potencial hidrógeno (pH) de suelo franco limoso cuando se utilizó dos dosis de cama de pollos (0 CP y 20 CP) en suelos con labranza mínima (LM, círculos) y en siembra directa (SD, cuadrados) en la profundidad 0 a 7,5 cm y 7,5 a 15 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre medias según test LSD (α : 0,05) para el factor CP. Las barras indican el error estándar de la media. 68

Figura 4.5: Distribución gráficas de variables canónicas significativas generadas para dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) al considerar dos conjuntos de variables del suelo (Factores Abióticos – Acidez estudiados y la Estabilidad de Agregados). 71

Figura 5.1: Distribución de partículas sólidas de suelo (blanco), espacio poroso total (corchete), macroporos (gris), mesoporos (gris claro) y microporos (negro) del suelo en dos profundidades del horizonte superficial (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) en gráficos superior e inferior respectivamente, para manejos en siembra directa (SD, izquierda) y labranza mínima (LM, derecha). Valores en negrita con letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos de labranza, según test LSD Fisher (α : 0,05). 87

Figura 5.2: Contenidos medios y error estándar del nitrógeno total (N total) 90
nitrógeno de nitratos (N-NO₃⁻) y nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) en dos
profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) ante tratamientos con dos dosis de
cama de pollos (0 CP y 20 CP). Círculos negros en labranza mínima (LM) cuadrados
negros en siembra directa (SD). Valores con letras distintas indican diferencias
significativas entre tratamientos de labranza, según test LSD Fisher (α : 0,05).

Figura 5.3: Contenidos medios y error estándar (barras verticales) del fósforo total 92
(Ptotal) y fósforo extractable (Pextractable) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5
y 7,5 a 15 cm) ante tratamientos con cama de pollos (0 CP y 20 CP). Círculos negros
en labranza mínima (LM) y cuadrados negros en siembra directa (SD). Valores con
letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos de labranza,
según test LSD Fisher (α : 0,05)

Figura 5.4: Análisis de Componentes Principales, para variables Físicas y Químicas 96
del suelo (círculo gris) en la profundidad 0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm (2), y variables de
productividad del cultivo de soja durante la campaña 2012-13. Variables
clasificadoras de tratamientos con cama de pollos (0 CP y 20 CP) y
dos sistemas de labranza utilizados (SD y LM).

Figura 5.5: Ajustes lineales de valores predichos y observados de modelos de la 98
biomasa aérea total de (B.A.Total), biomasa de granos (B.Grano), numero de vainas
(N.Vaina) y numero de granos (N.Grano) del cultivo de soja en ambiente subtropical
durante la campaña 2012-13. Agregar la línea 1:1 (tendría que ser de puntos.
Agregar la línea de ajuste de cada función.

Abreviaturas

COS	Carbono orgánico de suelo
COP	Carbono orgánico particulado de suelo
COT	Carbono orgánico total de suelo
DMP	Diámetro medio ponderado de agregados
DAP	Densidad aparente de suelo
EAS	Estabilidad de agregados de suelo
h-lenta	Humectación lenta
h-rápida	Humectación rápida
d-mecánica	Disgregación mecánica
LM	Labranza mínima
SD	Siembra directa
CP	Cama de pollo
SFC	Sulfato de calcio
CHS	Carbohidratos solubles
PRGS-FE	Proteína relacionada a glomalina de suelo fácilmente extraíble
PRGS	Proteína relacionada a glomalina total de suelo
HMA	Hongos micorrízicos arbusculares
H ⁺	Ion hidrónico
Ca ²⁺	Ion calcio
Mg ²⁺	Ion magnesio
K ⁺	Ion potasio
Na ⁺	Ion sodio
SO ₄ ²⁻	Sulfato
pH	Potencial hidrógeno
CIC	Capacidad de intercambio catiónico de suelo
AlOH ⁺	Ion Hidróxido de aluminio
pMacroporo	Macroporosidad >60 μm
pMesoporo	Mesoporosidad 60 a 15 μm
pMicroporo	Microporosidad <15 μm
PorosT	Porosidad total del suelo
N-NH ₄ ⁺	Nitrógeno de amonio en suelo
N-NO ₃ ⁻	Nitrógeno de nitratos en suelo
C.E.	Conductividad eléctrica
VC	Variables de cultivo de soja

Resumen

"Fertilidad físico-química y productividad de soja (*Glycine max (L.) Merr.*) en suelos del norte santafesino enmendados con cama de pollos y sulfato de calcio en dos sistemas de labranza.

El uso de enmiendas orgánicas, como la cama de pollo, es recomendado por su aptitud para mejorar las propiedades físico-químicas de los suelos. El sulfato de calcio también se recomienda para mejorar dichas propiedades. Existe escasa información sobre los efectos del uso de estas enmiendas sobre los suelos y productividad de los cultivos en ambientes subtropicales, los cuales se caracterizan por su régimen estacional contrastante de lluvias y sus temperaturas elevadas en verano. En la presente tesis se analizan algunos de estos efectos a corto plazo en suelos del norte santafesino que integra la gran región del Parque Chaqueño. El objetivo general fue determinar si la aplicación conjunta de cama de pollo y sulfato de calcio mejora a corto plazo la fertilidad físico-química y la productividad de soja en suelos franco limosos en ambientes subtropicales cultivados con dos sistemas de labranza. Los resultados mostraron que la aplicación de cama de pollo y el sulfato de calcio afectaron diferencialmente las variables estudiadas. Los contenidos de carbono orgánico de suelo aumentaron, especialmente en las fracciones dinámicas y transitorias, como los carbohidratos del suelo y también el contenido de carbono orgánico particulado. Todas estas fracciones, especialmente el carbono orgánico particulado, condicionaron los procesos de agregación, comprobándose su efecto positivo sobre la estabilidad de agregados del suelo (EAS), al reducir la desagregación producida por su estallido por humectación. Dicho efecto se verificó independientemente del sistema de labranza utilizado. La adición de sulfato de calcio no afectó las fracciones de carbono del suelo, pero ejerció un efecto positivo sobre la EAS. La cama de pollo incrementó el contenido de cationes intercambiables como calcio (Ca^{2+}), potasio (K^+) y disminuyó el magnesio (Mg^{2+}). El sulfato de calcio incrementó el Ca^{2+} pero no modificó el Mg^{2+} . El uso de cama de pollo generó acidificación por incremento de hidrogeno (H^+) en la solución del suelo. Los factores abióticos más influyentes sobre la EAS fueron K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} de forma positiva y pH de suelo en forma negativa. Las condiciones estructurales, como la porosidad y la estabilidad de los agregados, fueron alteradas por el uso de las enmiendas y la labranza. La adición de cama de pollo y sulfato de calcio aumentó la productividad de soja asociada a la mayor disponibilidad de nutrientes. La generación de biomasa, frutos y granos de soja fue positivamente afectada por los cationes Ca^{2+} y K^+ , el carbono orgánico particulado, la macroporosidad y la estabilidad estructural. En general se concluye que la adición de enmiendas condicionó en poco tiempo los factores bióticos de agregación, que fueron el mecanismo principal determinante de la EAS y esta propiedad fue la más importante para incrementar el rendimiento del cultivo de soja. El uso ambas enmiendas constituye una práctica tecnológica promisoría para mejorar la calidad físico-química del suelo y la productividad de los cultivos y para contribuir a la sustentabilidad de los agroecosistemas del norte santafesino.

Abstract

“Physicochemical fertility and soybean productivity (*Glycine max (L.) Merr.*) on northern Santa Fe soils amended with poultry litter and calcium sulfate in two tillage systems”.

The use of organic amendments such as poultry litter is recommended for its ability to improve the physical and chemical properties of soils. Calcium sulfate is also recommended to improve these properties. There is little information on the effects of the use of these amendments on soil and crop productivity in subtropical environments with contrasting seasonal rainfall and high temperatures in summer. Within this current research, some of these effects were analyzed on soils from northern Santa Fe. The overall objective was to assess whether a joint application of poultry litter and calcium sulfate improved the soil physical and chemical fertility and the productivity of soybean in slit loam soils for subtropical environments cultivated under two different tillage systems. The results showed that the application of poultry litter and calcium sulfate affected differentially the studied variables. Soil organic carbon content increased, especially for the dynamic and transient fractions such as soil carbohydrates and particulate organic carbon. All these fractions, especially particulate organic carbon, conditioned the aggregation processes, proving its positive effect on soil aggregate stability (SAS) by reducing the disaggregating effect of slaking process. This effect was observed regardless to the tillage system used. The addition of calcium sulfate did not affect the carbonaceous fraction of soil but exerted a positive effect on the soil aggregate stability. Poultry litter increased the content of exchangeable cations such as calcium (Ca^{2+}) and potassium (K^+), while magnesium (Mg^{2+}) decreased. Calcium sulfate increased the Ca^{2+} but did not modify the Mg^{2+} . Soil acidification generated by the use of poultry litter increased hydrogenous in the solution. The positive most influential abiotic factors on the soil aggregate stability were K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} , while pH was negative. The use of amendments and tillage altered structural conditions such as soil porosity and SAS. The addition of poultry litter and calcium sulfate increased soybean productivity associated with the increased availability of nutrients. Ca^{2+} and K^+ cations, particulate organic carbon, macroporosity and structural stability affected positively the soybean biomass and fruit generation. It was concluded that the addition of amendments mainly conditioned biotic aggregation factors, which were the main determinant mechanism of SAS and this property was the most important for increasing soybean yield. Use of both amendments is a promising technological practice to improve the physical and chemical soil quality and productivity of crops contributing to the sustainability of agro-ecosystems in Northern Santa Fe.

CAPÍTULO 1

Introducción General

1.1. Introducción

1.1.1. Suelos Chaco pampeanos de Argentina

La región Chaco-Pampeana se distribuye en Argentina en las provincias de Formosa, Chaco, este de Salta, gran parte de Santiago del Estero y norte de Santa Fe. El paisaje presenta un suave declive desde el noroeste hacia el sudeste, con relieve plano y sectores plano-cóncavos en las proximidades de cursos de agua (Cabrera, 1976; Iriondo, 1993; Cruzate, 2008). Los suelos se desarrollaron sobre materiales de origen eólico y también aluvionales que han evolucionado condicionados por temperaturas y lluvias que varían de N a S y de E a O (Ledesma, 1973; Iriondo, 1993; Álvarez y Lavado, 1998; Panigatti et al., 2007; Morrás y Moretti, 2009).

En el sector más oriental de Chaco y Santa Fe se presenta el chaco húmedo, que acompaña la margen oeste el Río Paraná (Ragonese y Castiglioni, 1970). Los suelos en la región fueron clasificados como Alfisoles y Molisoles de textura franco-limosa en su horizonte superficial y arcillosa a mayor profundidad, donde se observan rasgos hidromórficos marcados (Iriondo, 1993; Giorgi et al., 2009; Panigatti et al., 2007; Cruzate, 2008; Morrás y Moretti, 2009).

1.1.2. Uso actual de los suelos y estado de conservación

Gran parte de los suelos con agricultura en esta región se cultivan con soja (*Glycine max. Merr*), como puede verse en Tabla 1.1. Durante el período estival de la campaña 2013/14 se sembraron alrededor de 2.284.000 ha con este cultivo en suelos chaco pampeanos.

El cultivo de soja es el principal en Argentina y se ha insertado en gran parte de los esquemas agrícolas de Sudamérica por su plasticidad, desarrollo biotecnológico y los beneficios económicos directos e indirectos generados (Cuniberti et al., 2006). Su cultivo ha impulsado

la expansión agrícola mediante la utilización de áreas con marcada fragilidad ambiental donde ganadería y bosques nativos eran sistemas establecidos y fueron transformados a esquemas de cultivos extensivos (Aguerre y Denegri, 1996; Paruelo et al., 2005).

Tabla 1.1: Estimaciones Agrícolas del Ministerio de Agroindustria, para los cultivos de soja, maíz, girasol y algodón en provincias de la pampa chaqueña. Campaña 2013-2014.

Provincia / Cultivo	Soja	Maíz	Girasol	Algodón
Norte Santa Fe	231.500	65.950	114.700	112.100
Chaco	591.300	213.000	156.000	297.000
Santiago del Estero	969.950	728.000	8.000	115.625
Salta	492.000	188.000	0	9.000
Total	2.284.750	1.194.950	278.700	533.725

Esto sucedió partir de la década del 90', fuertes cambios en el uso del suelo se han sucedido en la región chaco-pampeana por su introducción, con disminución de la superficie destinada a otros cultivos extensivos de verano como algodón, maíz, sorgo y girasol.

Los suelos de esta región suelen presentar deterioro cuando son introducidos a agricultura continua. En este sentido, se ha constatado la disminución los contenidos de carbono de suelo y de la estabilidad de la estructura (Roldán et al., 2000; Paruelo et al., 2005; Volante et al., 2009; Lombardo y Pescio, 2011; Rojas et al., 2016). El ambiente subtropical determina tasas de descomposición de la materia orgánica superiores a las que se dan en condiciones templadas (Bayer et al., 2001), por lo que la reducción de la cobertura vegetal expone al suelo a la degradación acelerada de los horizontes superficiales (Heredia et al., 2006).

El deterioro de la calidad de la estructura ha sido ampliamente documentado en suelos franco limosos de sistemas agrícolas de la pampa húmeda (Micucci y Taboada, 2006; Sasal et al., 2006; Cosentino et. al., 2007; Taboada et al., 2008, Álvarez et al., 2014, Carrizo et al., 2015; Kraemer et al., 2021). Algunos trabajos han indicado que el incremento de la frecuencia del

cultivo de soja en sistema de siembra directa está relacionado con la pérdida de calidad de la estructura (Micucci y Taboada, 2006; Sasal et al., 2010; Novelli et al., 2011).

En suelos chaco-pampeanos, algunos estudios mencionan que la calidad físico-química de los horizontes superficiales se encuentra disminuida debido a los menores niveles de carbono del suelo (Vivas et al., 1992; De Orellana y Pilatti, 1994; Vivas y Sosa, 1998; Heredia et al., 2006; Vidal y Aparicio, 2008; Rojas et al., 2016, Osinaga et al., 2018; Baldassini y Paruelo, 2019). También se indica que la disminución de la estabilidad estructural (de 30 a 60%) es consecuencia de la intensificación agrícola que incrementa la oxidación del carbono de suelo (De Orellana y Pilatti, 1994; Venialgo et al., 2004). Además del uso del suelo (intensidad y tipo de manejo), el agua de lluvia (volumen, intensidad, frecuencia) repercute sobre procesos erosivos (Bonel et al., 2015, Baldassini y Paruelo, 2019) y la pérdida de fracciones coloidales en horizontes superficiales y en la movilización de nutrientes y cationes de intercambio, entre ellos calcio y magnesio (Millán et al., 2010). También se han reportado alteraciones de la porosidad y la densidad de los suelos, lo que indica procesos de compactación en el sistema de siembra directa (Moro et al., 2004).

1.1.3. Factores asociados a la agregación de suelos

1.1.3.1 Mineralogía y tamaños de partículas

La funcionalidad del suelo como parte de los ambientes depende de la composición, organización y comportamiento de las partículas minerales, del origen de los materiales y de la alteración que estos presentan en su evolución. Los suelos franco limosos de origen eólico que conforman la pampa húmeda y gran parte de la planicie chaqueña presentan similares materiales de origen (Álvarez y Lavado, 1997; Hepper et al., 2006). Los minerales finos menores a 2 μm (arcillas, sesquióxidos) son derivados de minerales ílíticos y esmectíticos

(Iriondo, 1993). Su concentración en el suelo se incrementa con las temperaturas y precipitaciones (Álvarez y Lavado, 1998). Las fracciones más gruesas del suelo, como el limo y la arena, poseen escasa actividad química (Cosentino y Pecorari, 2002), mientras que las más finas poseen reactividad y determinan propiedades como la capacidad de intercambio catiónico y aniónico (Martinez et al., 2008).

Las partículas minerales finas se organizan en el suelo junto a compuestos carbonados para generar estructuras que conforman los agregados (Tisdall y Oads, 1982). Estos poseen la capacidad de retener agua entre sus partículas, por lo que, ante cambios en el contenido hídrico del suelo se manifiestan fuerzas que pueden generar cambios en la estructura, como la fisuración y el resquebrajamiento (Le Bissonais, 1996). Los suelos con contenidos de arcilla elevada (mayor al 30%) presentan abundante fisuración y agrietamiento como mecanismo importante de agregación (Novelli et al., 2011; Kraemer et al., 2021). Cuando el contenido de limo es importante (más de 50%) la fisuración y agrietamiento suelen poseer menor actividad (Cosentino et al., 2006).

La circulación del agua determina efectos físicos como la compresión del aire ocluido en los poros y la dispersión de arcilla, esto sucede frecuentemente ante la humectación rápida de los agregados, con el consecuente estallido que desagrega la estructura (Le bissonais, 1996).

1.1.3.2. Carbono orgánico del suelo.

El carbono orgánico del suelo (COS) es el factor más importante que afecta la agregación del mismo. Es dinámico y posee vida media diversa, principalmente porque proviene de procesos biológicos y porque guarda dependencia con factores ambientales (Bronick y Lal, 2005). La cantidad y el tipo de fracciones orgánicas presentes en los suelos pueden ser consideradas para evaluar los procesos de agregación. Los compuestos orgánicos y la actividad biológica del suelo son quienes vinculan la parte orgánica con la mineral (Tisdall y Oades, 1982). El

COS se compone de fracciones orgánicas en distintas etapas de descomposición y la función de estas en el proceso de agregación se puede diferenciar de acuerdo al tiempo de acción. Las que poseen degradación lenta y son más persistentes, sustancias húmicas y complejos órgano-minerales, se han asociado a variaciones en la estabilidad de la estructura de los suelos limosos y arenosos, principalmente ante procesos de degradación de los suelos (Six et al., 2000). Esta fracción influye sobre la estabilidad de agregados del suelo (EAS) de forma conjunta con otras fracciones que actúan como agentes transitorios de agregación (carbohidratos y residuos microbianos). Estos últimos son una fracción de menor cantidad en relación al COS. Los agentes transitorios promueven la formación de unidades estructurales mediante la unión entre partículas minerales (Ghani et al., 2003; Liu et al., 2005). Son de estructura simple y dinámicos en el tiempo ya que son degradados por la actividad microbiana (Oades, 1992).

El COS también se compone de fracciones lábiles constituidas principalmente por fracciones groseras como los residuos orgánicos de vegetales, animales, restos microbiales y hongos en distintos estados de descomposición (Cambardella y Elliot, 1992; Bronick y Lal, 2005; Galantini, 2008, Cotrufo et al., 2015), que actúan como agentes temporarios de agregación (Tisdal y Oades, 1982). Se ha indicado que esta fracción determina la unión de microagregados con agregados de mayor tamaño (Six et al., 1999). Dentro de los agentes temporarios, las hifas de hongos generan efectos ligantes muy importantes. Conforman un entramado con el complejo coloidal que mantiene unidas a las partículas del suelo (Oades, 1992). Los hongos micorrízicos-arbusculares (HMA) poseen marcada actividad agregante en los suelos (Jastrow et al., 1998). Se ha señalado que la presencia de glomalina, una glicoproteína generada por los HMA, está fuertemente involucrada en la estabilización de los agregados (Wright y Upadhyaya, 1998). Los contenidos en el suelo suelen incrementarse a

largo plazo ante la disminución de la fertilidad (carbono y nitrógeno), en cambio, decrecen ante la mejora de nutrientes como calcio, potasio, magnesio y fósforo (Lovelock et al., 2004), por lo cual su actividad puede indicar la dinámica de los procesos de agregación en relación a la fertilidad.

1.1.3.3. Cationes polivalentes y acidez del suelo

Los compuestos minerales de arcilla y sesquióxidos en el suelo poseen propiedades coloidales y presentan gran cantidad de cargas eléctricas negativas que son compensadas mediante enlaces con metales de cargas positivas (polivalentes y monovalentes). Ante la menor concentración de cationes metálicos suelen presentarse otros elementos no metálicos como hidrógeno para mantener el balance electroquímico. El enlace entre coloides y cationes calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) presenta mayor fuerza en comparación al que se da con los iones monovalentes, por lo cual, ante el aumento de Ca^{2+} y Mg^{2+} se favorece la floculación del suelo (Jakobsen, 1993; Vázquez et al., 2009; Kloster y Avena, 2015). Sin embargo, los mecanismos de agregación presentan una dinámica combinada entre mecanismos abióticos y bióticos ya que conforman los complejos órgano-minerales (Kloster y Avena, 2015). El incremento de cationes bivalentes en suelos con presencia de sodio reduce la dispersión de arcillas y la ruptura de la estructura del suelo, lo que impacta positivamente en la estabilidad de agregados (Armstrong y Tanton, 1992).

La compensación de carga electronegativa con hidronio (H^+), que se presenta ante bajas concentraciones de cationes polivalentes, desencadena procesos de acidificación en los suelos (Irrutti et al., 2011). Las temperaturas y precipitaciones pueden disminuir la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} en los suelos por meteorización y migración en profundidad (Vázquez, 2005, Millán et al., 2010; Irrutti et al., 2011).

1.1.4. El uso de cama de pollo para mejorar los suelos.

Diversas prácticas de manejo fueron propuestas para revertir el proceso de disminución del COS, como la intensificación de las rotaciones de cultivos y la siembra de pasturas, la utilización de cultivos de cobertura y la aplicación de enmiendas orgánicas (Díaz Zorita et al., 2002; Amado et al., 2006; Varela et al., 2010; Novelli et al., 2011; Imhoff et al., 2014). Dentro de las prácticas de manejo que pueden generar un impacto positivo sobre la estructura se encuentra la adición de cama de pollo, ya que incrementa los contenidos de COS (Ferrerías et al., 2005; Gascho y Hubbard, 2006; Chang et al., 2008; Rotondo et al., 2009, Bowden, et al., 2010; Watts et al., 2010; De Battista y Arias, 2016; Gabioud et al., 2020). También incrementa la reactividad química del suelo, ya que los compuestos orgánicos aumentan la capacidad de intercambio catiónico (Bolton et al., 2004; Ferrerías et al., 2005). Además de aportar macronutrientes fácilmente disponibles, como nitrógeno, fósforo, azufre y potasio, la CP mejora la fertilidad potencial al aumentar los contenidos totales (Gascho et al., 2001). Esto determina que sea muy utilizada como sustitución de la fertilización tradicional (Bogaard et al., 2013; Gabioud et al., 2020). La CP también mejora las propiedades físicas de los suelos; por ejemplo, aumenta la estabilidad estructural, la conductividad hidráulica y disminuye la densidad aparente (Rotondo et al., 2009; Andreau et al., 2012; Bogaard et al., 2013; Gabioud et al., 2020). Rotondo et al. (2009) informaron que la incorporación de cama de pollo seca con labranza de discos, en dosis de 2 kg m^{-2} , durante 2 campañas productivas (2001 y 2003), produjo un incremento notable (4 veces) de la estabilidad estructural del suelo en sistemas de producción intensiva en la pampa húmeda. En esta experiencia el COS se incrementó de 1,49% a 1,83% luego de la primera aplicación y a 1,98% posterior a la segunda incorporación. La alta concentración de metales como calcio y potasio que presenta la CP es una de las cualidades que permite mejorar la fertilidad de los suelos (Gascho et al., 2001) y

también la productividad ya que el potasio es muy importante para los cultivos (Haynes y Naidu, 1998). Gabioud et al. (2020) demostraron la capacidad de CP aplicada en dosis de 7,5 Mg ha⁻¹ para incrementar el COS en superficie a corto plazo y mejorar las condiciones físicas como la porosidad y la calidad estructural de suelos manejados en SD con estructuras laminares. De Battista y Arias, (2016) también indicaron aumentos del COS al aplicar 13 Mg ha⁻¹.

La CP posee generalmente un pH > 8 y contenidos elevados de sales de sodio, lo que puede afectar el proceso de agregación de suelo, al favorecer los procesos de dispersión de las partículas de arcilla del suelo (Haynes y Naidu, 1998). Los cationes polivalentes que presentan los materiales orgánicos como la CP pueden determinar variaciones del pH del suelo por el desplazamiento de H⁺ en posiciones de intercambio y en la solución (Dikinya y Mufwanzala, 2010). Diversos autores han informado diferentes respuestas (aumentos, disminución y ausencia de efecto) al agregado de CP, relacionadas a variaciones en la composición del abono y granulometría del suelo (Natsher y Schwetnmann, 1991; López-Masquera et al., 2008; Del Pino et al., 2008; Dikinya y Mufwanzala, 2010, De Battista y Arias, 2016). También se verificó aumento en la concentración de amonio del suelo (N-NH₄⁺) y de las tasas de acidificación cuando se produce la nitrificación (Del Pino et al., 2008).

En Argentina se estimó que, en 2013, la generación de 5.300.000 Mg año⁻¹ de CP, siendo Buenos Aires y Entre Ríos las provincias que más contribuyeron y en tercer lugar Santa Fe (Maisonave et al., 2017). De Batista y Arias (2016) indicaron que la CP, en Entre Ríos, constituye un abundante e importante recurso para la producción agrícola en las zonas cercanas a las granjas y han indicado que el uso dosis de 13 Mg ha⁻¹ permite triplicar la productividad de cultivos de Trigo y Maíz. Ré y Ferrel (2016), utilizando en dicha provincia

dosis de 10 Mg ha^{-1} , indicaron que el uso de CP en verdes y pasturas repercute aumentos en cantidad y calidad muy superiores a los fertilizantes convencionales, con mayores retornos a la inversión. El sistema avícola del norte de la provincia de Santa Fe, aporta el 1,4 % anual a la producción de carne aviar nacional (Ybran et al., 2018), lo que permite suponer que se generan al menos $74.000 \text{ Mg año}^{-1}$ de CP, dado que la actividad creció desde entonces. El tratamiento ambiental adecuado mediante el compostaje de la CP en la granja es obligatorio previo a su salida al campo, pero luego necesario luego dar uso agronómico a los volúmenes generados (Maisonnave et al., 2017). En la actualidad, el uso de CP como abono en el norte de Santa Fe, permite el reciclado de los nutrientes, la disminución de costos en fertilizantes, como también generar ingresos en caso de comercializarlos (Ybran et al., 2018).

1.1.5. El sulfato de calcio como enmienda.

El sulfato de calcio (SFC), también llamado yeso agrícola, ha sido ampliamente utilizado como enmienda, es decir para mejorar propiedades fisicoquímicas de suelos, especialmente en alcalinos. Evaluaciones realizadas por diversos autores (Ponette et al., 1996; Lopes Scheid, 1996; Gambaudo et al., 2001; Zambrosi, 2007; Vieira Fontoura et al., 2019, Gabioud et al., 2020) indican que este material aumenta la disponibilidad del calcio intercambiable (Ca^{2+}) del suelo y de sulfatos (SO_4^{2-}). Blum et al. (2011) demostraron en suelos ácidos, que el SFC, en dosis mayores a 1 Mg ha^{-1} , favoreció la unión de las partículas y la formación de agregados. Esta práctica contribuye así a disminuir la pérdida de suelo y nutrientes durante lluvias intensas (Jian et al., 2003; Felton et al., 2004; Favaretto et al., 2008). Gabioud et al. (2020) resaltaron la capacidad del SFC en dosis de 3 Mg ha^{-1} para incrementar la EA y mejorar el ingreso de agua en suelos franco limosos.

A pesar de estos aspectos positivos, algunos estudios demostraron que el empleo de grandes cantidades de SFC puede favorecer la pérdida de nutrientes debido a su movimiento en profundidad, como es el caso de Mg^{2+} (Sumner, 1990; Zambrosi et al., 2007; Blum et al., 2011), y la ocurrencia de otros procesos que dependen de cada suelo, en particular del pH (Millán et al., 2010). También puede generar cambios en la porosidad del suelo por cementación de los espacios interpartículas cuando se utilizan dosis mayores a 2 Mg ha^{-1} (Vázquez et al., 2005).

La mayor proporción de Ca^{2+} y SO_4^{2-} en el complejo de intercambio y en la solución del suelo produce un ambiente edáfico más adecuado para el crecimiento de plantas ya que estos elementos son nutrientes esenciales (Vázquez et al., 2010). El SFC al regular el pH del suelo también contribuye a que otros nutrientes como el fósforo (PO_3^-), nutriente esencial para las plantas, se encuentren biodisponibles (Baquero et al., 2018).

En los suelos pueden existir otros iones cuando el pH es muy bajo, como Al^{+++} , Mn^{++} y Fe^{++} , que en altas concentraciones generan problemas de toxicidad a gran parte de las plantas cultivadas (Zambrosi et al., 2007; Millán et al., 2010; Blum et al., 2011). Para revertir problemas de acidificación se pueden utilizar enmiendas básicas como la caliza ($CaCO_3$) y la dolomita ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). Estas precisan ser incorporadas mecánicamente porque poseen escasa solubilidad contrariamente a lo que ocurre con el SFC ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), que posee elevada solubilidad, por lo que rápidamente incrementa la disponibilidad de Ca^{2+} y SO_4^{2-} en el suelo. El incremento, cuando se adicionan dosis mayores a 3 Mg ha^{-1} , llega a superar 0,8 metros de profundidad, lo que resulta muy útil para aumentar la concentración de estos nutrientes en profundidad sin necesidad de realizar labranzas (Zambrosi et al., 2007; Blum et al., 2011).

Los iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} están involucrados en mecanismos que pueden reducir la acidez y neutralizar parcialmente al Al^{+++} . El incremento en los niveles intercambiables de Ca^{2+} produce la formación y migración de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, con reducción de iones hidronios e incremento del pH (Blum et al., 2011). Sin embargo, el incremento de pH puede ser relativamente poco importante (Millán et al., 2010). Estas propiedades de SFC lo convierten en un producto muy utilizado en sistemas de producción sin remoción como pasturas perennes y siembra directa (Caires et al., 2008), y en cultivos perennes como frutales o en presencia de horizontes arcillosos en superficies difíciles de labrar (Blum et al., 2011).

Los riesgos asociados a uso de SFC se deben a que su solubilidad puede incrementar el movimiento de Mg^{2+} desde el estrato superficial hacia capas más profundas al formar un par iónico (MgSO_4) (Ponette et al., 1996; Zambrosi et al., 2007; Millán et al., 2010; Blum et al., 2011). En suelos Oxisoles, a 8 meses de la aplicación de SFC, se encontraron acumulaciones del par iónico en la zona subsuperficial (0,4-0,6 metros), que se acentuaron luego de los 20 meses, lo que generó la pérdida de la mitad del magnesio intercambiable en la profundidad 0 a 0,8 metros, debido a que excedió esa profundidad (Blum et al., 2011).

En suelos donde la erosión hídrica es frecuente, la aplicación de SFC en dosis de 1 a 5 Mg ha^{-1} disminuyó significativamente la presencia de fósforo soluble y total en la masa de suelo erosionada por el agua de escurrimiento (Favaretto et al., 2006; Watts y Torbert., 2009). Esta práctica, fue muy efectiva y recomendada para realizarse junto a aplicaciones superficiales de biosólidos, aunque se destaca para disminuir eutrofización de cursos de agua, aunque produce efectos de plazos menores a un año (Watts y Torbert, 2009).

Favaretto (2006) ha indicado que el SFC aplicado a la superficie del suelo incrementa la concentración de electrolitos en el agua de lluvia y mejora su infiltración, además de proporcionar Ca^{2+} para el complejo de intercambio. Como resultado se logró controlar la

erosión y reducir la escorrentía, evitar el sellado de la superficie y la formación de costras. Se destaca la necesidad de incorporar estrategias de manejo de los suelos en el área de estudio ya que presenta erosión hídrica que compromete más de 100 mil hectáreas, en los departamentos Vera, General Obligado y San Javier (Bonel et al, 2015).

1.1.6. El cultivo de soja y el uso de enmiendas

La productividad del cultivo de soja depende de interrelaciones entre el genotipo y el ambiente en el que se cultiva (Andrade y Sadras, 2002). La diferencia en la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno y fósforo durante el crecimiento genera modificaciones del rendimiento (Salvagiotti et al., 2016). En suelos Molisoles de áreas pampeanas y extra pampeanas el cultivo cubre más del 50% de sus necesidades de nitrógeno mediante el proceso de fijación biológica que realizan bacterias del género *Rizobium ssp*, las que toman nitrógeno ambiental y lo disponen a la planta (Salvagiotti et al., 2016). El porcentaje restante del nitrógeno requerido por el cultivo lo provee el suelo. Sin embargo, en algunas situaciones, la provisión de nitrógeno mineral que realiza el suelo puede ser insuficiente, sobre todo cuando existe potencial para alcanzar rendimientos mayores a 4200 kg ha¹ y la fijación biológica es inadecuada (Salvagiotti et al., 2009). En el norte de Argentina la producción del cultivo se presenta en un amplio contexto de condiciones ambientales que incluyen la deficiencia de ciertos nutrientes, entre ellos nitrógeno y fósforo (Parra y Sosa, 2002; Sainz Rozas et al, 2012; Madias et al., 2021).

La disponibilidad de nitrógeno y fósforo de los suelos puede ser incrementada mediante el uso de enmiendas orgánicas como CP (Watts et al., 2010; Rotondo et al., 2009). Esta enmienda incrementa la productividad de soja en suelos que presentan deficiencias de

nutrientes (Ghosh et al., 2004; Bowden et al 2010, Sena et al., 2014; Dos Passos et al., 2015). Maisonnave et al. (2017) recomendaron la aplicación de 1,9 toneladas de CP por cada tonelada de soja a obtener como producto, para suplir las necesidades nitrogenadas del cultivo y 0,6 toneladas de CP por tonelada de soja, para suplir el P que soja requiere. La CP también mejora aspectos físicos de suelo como la estabilidad estructural de suelos franco limosos, la conductividad hidráulica y la densidad aparente del suelo cuando fue utilizada en dosis mayores a 20 Mg ha⁻¹, en producciones intensivas (Rotondo et al., 2009; Andreau et al., 2012; Bogaard et al., 2013).

El cultivo de soja puede presentar distinto comportamiento ante las propiedades físicas que presentan los suelos. Se ha indicado que el aumento de la densidad aparente y la disminución en la porosidad en suelos compactados por el tránsito agrícola disminuye la productividad de soja (Botta et al., 2004). A pesar de estas características, el crecimiento radicular es poco afectado (Micucci y Taboada, 2006; Gerster, 2008). El uso de enmiendas inorgánicas fue recomendado en suelos que presentan acidez marcada, que afecta la productividad del cultivo de soja, siempre que estas aporten Ca²⁺ disponible para el cultivo y disminuyan la acidez del suelo, lo que aumenta la disponibilidad de otros nutrientes (Lopes Scheid, 1996; Vázquez et al., 2012). Las enmiendas como la dolomita son las que claramente presentan mejores respuestas en el cultivo, ya que también incluye Mg. En este sentido, el uso conjunto de sulfato de calcio y dolomita mejora la solubilidad de esta última en el suelo, esto genera efectos a mayor profundidad, que finalmente, repercuten en la productividad del cultivo de soja (Lopes Scheid, 1996; Vázquez et al., 2012). El porcentaje de arcilla fue recomendado como parámetro de suelo más simple para definir las dosis de yeso bajo condiciones acidas

subtropicales donde se busque aumentar Ca y cultivar soja (Lopes Scheid, 1996, Sousa et al., 2005).

El ambiente subtropical impone al cultivo de soja condicionantes como el estrés hídrico y térmico (Zuil e Izquierdo, 2012), más aún donde también se presenta variabilidad en la capacidad de almacenaje de los suelos, que resulta insuficiente para obtener rendimientos óptimos gran parte de los años (Giménez et al., 2011).

La producción de soja en la región chaco-pampeana incorpora escasa adopción de prácticas de manejo tendientes a contribuir con la mejora de las actuales condiciones fisicoquímicas del suelo, como la realización de rotaciones de cultivos y el empleo de fertilización complementaria (Rojas et al., 2016; Madias et al., 2021). La información revisada sugiere que ambas prácticas tecnológicas (adición de cama de pollo y de SFC) pueden desempeñar un rol activo en la mejora de las propiedades químicas y en la estabilidad estructural del suelo. Por lo tanto, podrían ser una herramienta importante para mejorar la calidad de los suelos en ambientes subtropicales.

Estos suelos, especialmente en la región en estudio, se encuentran degradados tanto física como químicamente. Han perdido MO, de 3,2 a 1,7 % (De Orellana y Pilatti, 1994; Heredia et al., 2006, Vidal y Aparicio, 2008). Como consecuencia de la disminución de la MO también han disminuido los valores de pH, P y S, nutrientes vinculados al ciclo de la MO. Asociado a dicha disminución, los suelos han perdido al menos un 50 % su estabilidad estructural en (De Orellana y Pilatti). La incorporación al suelo de enmiendas orgánicas (cama de pollo) e inorgánicas (sulfato de calcio) son alternativas disponibles, que permitirían reducir el impacto negativo de la mencionada problemática, y encontrar una alternativa para propender la sustentabilidad productiva de soja. Sin embargo, no existe información del

resultado de la aplicación conjunta de ambas enmiendas asociadas a distintas prácticas de manejo y sistema de labranza sobre las propiedades del suelo y producción del cultivo. Esto resalta la importancia de realizar investigaciones para elucidar los efectos de esta práctica y así poder efectuar recomendaciones de uso correctas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el efecto a corto plazo de la aplicación conjunta de cama de pollo y sulfato de calcio sobre la fertilidad físico-química y la productividad de soja en suelos franco limosos en ambientes subtropicales cultivados en siembra directa y labranza mínima.

1.2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Objetivo específico 1

Evaluar el efecto de la aplicación de cama de pollo y sulfato de calcio sobre la agregación del suelo y su relación con diversas fracciones del carbono (persistente, temporario y transitorio).

1.2.2.2. Objetivo específico 2

Caracterizar la dinámica de los cationes intercambiables y su relación con el pH, contenido de sales y con la agregación del suelo.

1.2.2.3. Objetivo específico 3

Evaluar propiedades físicas y químicas en suelos enmendados con cama de pollos y sulfato de calcio y establecer la relación con la productividad del cultivo de soja en dos sistemas de labranzas

1.3. Hipótesis

1.3.1. Hipótesis asociada al objetivo específico 1.

La aplicación de cama de pollo aumenta la agregación y la estabilidad estructural de los suelos franco-limosos en ambientes subtropicales, debido principalmente al aporte significativo de las fracciones transitorias de carbono orgánico.

1.3.2. Hipótesis asociada al objetivo específico 2.

La adición combinada de cama de pollo y sulfato de calcio contribuye positivamente a la calidad estructural y fertilidad química del suelo, sin que ocurra alteración del pH ni pérdida de nutrientes (Mg) por lixiviación, independientemente del sistema de labranza usado.

1.3.3. Hipótesis asociada al objetivo específico 3.

La mejora en la calidad físico-química del suelo lograda en distintos sistemas manejo de enmiendas y labranzas se refleja en el aumento de rendimiento del cultivo de soja.

1.4. Organización para la presentación de los resultados

En la tesis los resultados se presentarán en cuatro capítulos consecutivos. En el capítulo 2 se describen las metodologías generales utilizadas para relevar la información experimental. En el capítulo 3 se describen los efectos del uso de enmiendas sobre el carbono del suelo y la estabilidad de agregados. El capítulo 4 considera lo sucedido con las bases intercambiables y la acidez del suelo. El capítulo 5 muestra la contribución de las técnicas utilizadas sobre la productividad de soja. En el capítulo 6 se plantea una conclusión general de la tesis integrando todos los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Metodología General

2.1. Sitio experimental

2.1.1 Localización

El experimento fue realizado en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Reconquista (29°15'33" S; 59°43'47" O) provincia de Santa Fe, Argentina, durante las campañas agrícolas 2012-13. El manejo previo del sitio fue agricultura continua en siembra directa durante más de 10 años, con rotaciones de los cultivos trigo, soja, girasol, maíz y algodón. La rotación de cultivos hasta el inicio de esta tesis presentó intensidad de 1,4 cultivos por año (Tabla 1) y es representativa de los esquemas imperantes en la región noreste de las provincias de Santa Fe y Chaco.

Tabla 2.1: Secuencia agrícola de sitio e intensidad de secuencias (IS) de cultivos de trigo (T), girasol (G) soja (S), maíz (M), algodón (A).

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	IS
Cultivo	T-S	G-M	S	G	T-S	A	T-M	S	S	G	1,4

2.1.2. Suelo y paisaje

El suelo posee capacidad de uso agrícola-ganadera (IIIws PIP-54) y fue clasificado en escala de semidetalle (1:50.000) como suelo complejo, unidad cartográfica RTA4, donde la serie Reconquista (RTA) es la principal componente (Mapa de Suelos de la Provincia de Santa Fe, Giorgi et al., 2009). La serie RTA (Tabla 2.2) se clasifica como Argiudol acuértico, en la clasificación USDA (Soil Survey Staff, 2010).

Tabla 2.2: Suelo Argiudol acuértico Serie Reconquista. (INTA, 2016)

HORIZONTE		A	BA	Bt1	Bt2	Bt3	BC1	BC2
Profundidad	cm	0-23	23-34	34-53	53-80	80-109	109-155	más de 155
Mat. orgánica	%	2.1	1.9	1.1	0.7	0.4	0.3	0.3
C orgánico	%	1.2	1.1	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2
N total	%	0.103	0.094	0.069	0.056	0.069	0.028	0.040
Relación C/N	---	11	11	9	7	3	7	5
Arcilla < 2 μ	%	22.6	44	39.5	39.8	40.5	29.4	33.4
Limo 2-50 μ	%	57.9	42.6	43.4	43.8	44.6	55.6	47.8
Arena >50 μ	%	19.5	13.4	17.1	16.4	14.9	15	18.8
TOTAL	%	100	100	100	100	100	100	100
Limo 2-20 μ	%							
Arena:								
Muy fina 50-100 μ	%	8.8	6.4	8.3	9.0	7.2	7.2	8.9
Fina 100-250 μ	%	4.7	2.8	4.2	2.8	3.7	3.8	4.0
Media 250-500 μ	%	5.8	4.3	4.5	3.5	3.9	4.0	5.9
Gruesa 500-1000 μ	%	0.2	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0
Muy gruesa 1-2mm	%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calcáreo, CaCO ₃	%							
Equiv.humedad	%							
Resist.pasta	ohms							
Conductividad	mmhos/cm	1.0	0.7	0.6	1.1	1.2	0.7	0.7
pH pasta (1:1)	---							
pH agua (1:2,5)	---	6.9	6.5	6.2	6.9	7.3	7.3	7.3
pH 1N ClK (1:2,5)	---							
Ca ⁺⁺ intercambio	me/100g	14.5	15.0	15.5	--	--	16.0	17.0
Mg ⁺⁺ intercambio	me/100g	3.5	2.5	4.5	--	--	3.5	3.0
Na ⁺ intercambio	me/100g	0.7	0.9	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5
K ⁺ intercambio	me/100g	1.3	0.8	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9
H ⁺ intercambio	me/100g							
(Na ⁺ /T)	%	3.1	3.5	2.4	2.5	2.8	2.3	1.9
C.I.C., (T)	me/100g	22.4	25.3	25.1	28.4	25.0	25.5	25.9
Suma bases (S)	me/100g	20.0	19.4	21.3	--	--	21	21.4
Sat.bases, (S/T)	%	89	77	85	--	--	82	83

En las descripciones de perfil se indica que posee en su horizonte A (0 a 23 cm) textura franco limosa (familia fina-muy fina, íltica) y es moderadamente bien drenado. En el horizonte BA, de 23 a 35 cm, presenta textura franca arcillo limosa. Posteriormente (34 a 57 cm) se presenta un horizonte Bt, de textura arcillo limosa, imperfectamente drenado, con rasgos vérticos de superficies de deslizamiento.



Figura 2.1. Argiudol acuértico Serie Reconquista. Junio 2015

2.1.3. Características climáticas y meteorológicas

El clima del sitio de estudio es de transición entre templado y subtropical subhúmedo-subhúmedo seco. La temperatura media anual es 20 °C, con máxima media anual de 25,5°C. La precipitación media anual es 1272 mm para la localidad de Reconquista y presenta una distribución que concentra el 70 % desde octubre a marzo (Zuil, 2011; Zuil e Izquierdo, 2012).

Las condiciones meteorológicas de la campaña 2012-13, recabadas en observatorio meteorológico INTA Reconquista, fueron normales. La temperatura media fue de 25°C, mientras que la mínima media fue de 14,4°C y la máxima media de 29°C. (Figura 2.2).

Durante el periodo de barbecho en los meses de julio a octubre, se registraron 250 mm de precipitaciones, y durante los meses de noviembre a abril, 750 mm. (Figura 2.3).

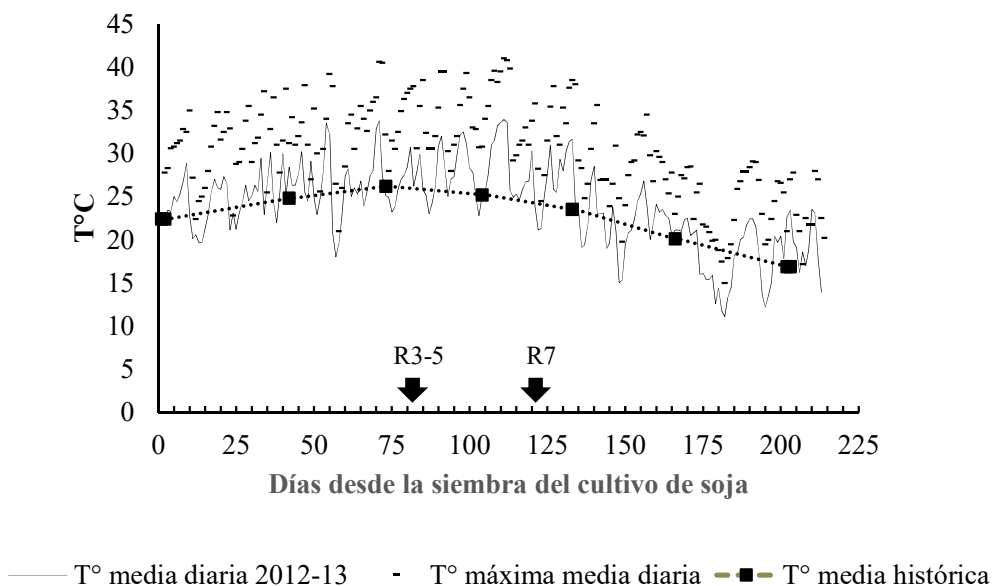


Figura 2.2. Temperaturas medias diarias, máximas medias diarias y media mensual histórica para los meses de noviembre a mayo en la localidad de Reconquista. Santa Fe.

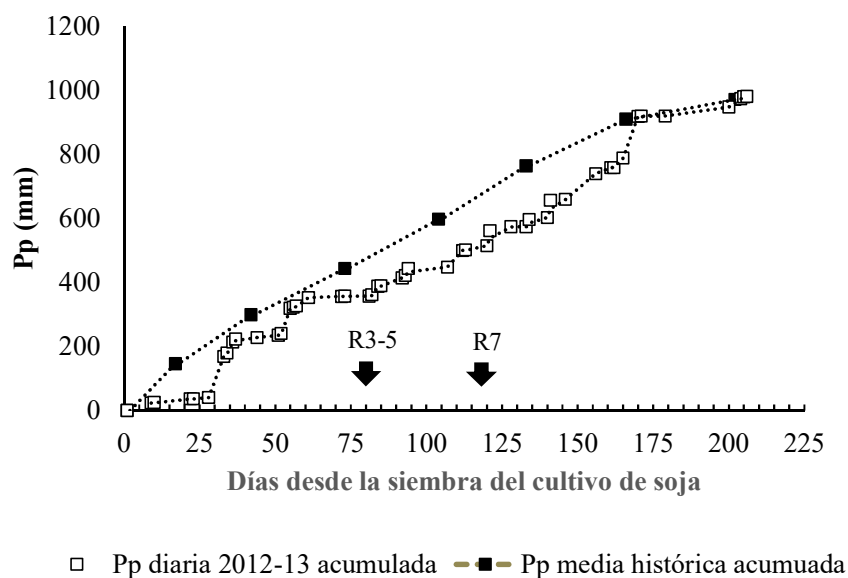


Figura 2.3. Precipitaciones diarias acumuladas y precipitaciones medias históricas acumuladas, los meses de noviembre a mayo en la localidad de Reconquista. Santa Fe.

2.2. Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue en bloques completos con tres repeticiones. Los tratamientos, generados en agosto de 2012, consistieron en la combinación de las siguientes situaciones: sin aplicación y con aplicación de cama de pollo (20 Mg ha^{-1}), adición de sulfato de calcio en tres dosis (0, 0,8 y $1,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) y dos sistemas de labranza: sin incorporación de enmiendas (siembra directa, SD) y con incorporación mediante remoción del horizonte superficial (labranza mínima, LM). La dosis de enmienda orgánica se realizó en consecuencia de lo informado por Rotondo et al. (2009) que utilizaron 20 Mg ha^{-1} en suelos franco limosos, mientras que las dosis de enmienda inorgánica (0,8 y $1,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) en base a Sousa et al. (2005) que recomendaron para suelos ácidos aplicación de dosis de yeso (kg ha^{-1}) = $50 \times \% \text{ arcilla}$. En la Tabla 2.3 se presenta un resumen del diseño experimental.

Tabla 2.3: Tratamientos utilizados en el experimento. Adiciones estimadas de los elementos carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) en base a las caracterizaciones de los materiales utilizados.

Tratamiento	Enmienda Orgánica	Enmienda Inorgánica	Sistema De Labranza	Elementos Adicionados			
	C. P.	SFC		C	N	P	S
	Mg ha^{-1}	Mg ha^{-1}		Mg ha^{-1}	Mg ha^{-1}	Mg ha^{-1}	kg ha^{-1}
1	0	0	SD	0	0	0	0
2	0	0,8	SD	0	0	0	144
3	0	1,6	SD	0	0	0	288
4	0	0	LM	0	0	0	0
5	0	0,8	LM	0	0	0	144
6	0	1,6	LM	0	0	0	288
7	20	0	SD	6,9	0,59	0,865	50
8	20	0,8	SD	6,9	0,59	0,865	194
9	20	1,6	SD	6,9	0,59	0,865	338
10	20	0	LM	6,9	0,59	0,865	50
11	20	0,8	LM	6,9	0,59	0,865	194
12	20	1,6	LM	6,9	0,59	0,865	338

Tabla 2.4: Tratamientos utilizados en experimento. Adiciones estimadas de elementos metálicos calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K) en base a caracterizaciones de los materiales utilizados.

Código	Enmienda	Enmienda	Sistema De Labranza	Elementos adicionados			
	Orgánica	Inorgánica		Ca	Mg	Na	K
	CP	SFC		kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹					
1	0	0	SD	0	0	0	0
2	0	0,8	SD	178	0	0	0
3	0	1,6	SD	356	0	0	0
4	0	0	LM	0	0	0	0
5	0	0,8	LM	178	0	0	0
6	0	1,6	LM	356	0	0	0
7	20	0	SD	457	95	96	528
8	20	0,8	SD	635	95	96	528
9	20	1,6	SD	813	95	96	528
10	20	0	LM	457	95	96	528
11	20	0,8	LM	635	95	96	528
12	20	1,6	LM	813	95	96	528

Las parcelas (unidades experimentales) fueron rectangulares, de cuatro metros de ancho y diez metros de largo. En la Tabla 2.4 se muestra la cantidad adicionada de cationes para cada tratamiento.

2.3. Caracterización de enmiendas y materiales utilizados

2.3.1. Cama de pollo

Uno de los componentes utilizados como enmienda para conformar los tratamientos fue la cama de pollos (CP), sustrato orgánico derivado de la cría de aves de corral para la producción de carne (*Gallus gallus domesticus* L.). Se compone en su mayor parte del residuo vegetal “cascarilla de arroz”, que son las glumas y glumelas derivadas del proceso industrial de arroz (*Oryza sativa* L.). La cascarilla usada como cama de crianza se mezcla con excrementos (materia fecal) y otros componentes (plumas, alimento para aves y suelo) que la hacen rica en nutrientes, motivo por el cual es ampliamente utilizada. En la Tabla 2.5

pueden observarse las características químicas de la CP empleada. El manejo previo del material en los galpones de crianza indica que 5 planteles de pollos han sido criados durante la campaña 2011/12 (aproximadamente 55 días por plantel). El proceso de cría considera reposos sanitarios sin aves, de tiempo variable, donde se realiza acondicionamiento y agregado de sustrato seco y limpio.

Tabla 2.5: Caracterización de parámetros químicos de la cama de pollos. Datos obtenidos en el laboratorio de suelos, agua y material vegetal de la EEA Reconquista y en laboratorio de servicios analíticos de Facultad de Ingeniería Química, UNL. 2012.

Parámetro	Sigla	Unidad	Valor	Metodología
Densidad	-	Gr cm ⁻³	0,48	Masa/Volumen
Cenizas	-	%bs	22,1	Calcinación
Residuo Orgánico	R.O.	%	60,1	Calcinación
Carbono Orgánico	C.O.	%	34,5	Digestión húmeda
Nitrógeno Total	N total	%	2,94	Kjeldahl
Relación Carbono Nitrógeno	C/N	rel.1:1	11,75	Relación
Sulfatos	SO ₄ ⁻	mg kg ⁻¹	135,20	Turbidimetría
Fósforo Total	P total	mg kg ⁻¹	43250	Colorimetría
Fósforo Disponible	P disp.	mg kg ⁻¹	1221	Colorimetría
Conductividad Electrica	C.E.	mS cm ⁻¹	10,9	Conductimetrico
Potencial de hidrogenión	pH	rel.1:2,5	8,3	Potenciometrico
Calcio	Ca	mg kg ⁻¹	22861	A. Atómica
Magnesio	Mg	mg kg ⁻¹	4714	A. Atómica
Sodio	Na	mg kg ⁻¹	4765	A. Atómica
Potasio	K	mg kg ⁻¹	26409	A. Atómica
Hierro	Fe	mg kg ⁻¹	769	A. Atómica
Manganeso	Mn	mg kg ⁻¹	485	A. Atómica
Zinc	Zn	mg kg ⁻¹	519	A. Atómica
Cobre	Cu	mg kg ⁻¹	38	A. Atómica

2.3.2. Sulfato de calcio

El sulfato de calcio (SFC), es un material mineral utilizado como insumo agropecuario para enmienda-fertilizante y se conoce comercialmente en argentina como yeso agrícola. El utilizado en esta experiencia contiene 25% de calcio y 18% de azufre, (expresión química simplificada $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4$) y presentó un grado de pureza de 89%, fue proveniente de canteras de la provincia de Catamarca (Argentina) y se presentó como polvo granulado.

2.3.3. Labranzas

Dos sistemas de labranza se utilizaron en el experimento: siembra directa, en la que la cobertura, queda en superficie, como así también las enmiendas aplicadas y donde el cambio solo lo realizan los componentes de la sembradora, y labranza mínima, con la que se propendió a la incorporación de las enmiendas luego de su aplicación y dejó el suelo preparado para la siembra de soja.

En el caso de labranza mínima (LM), en cada unidad experimental, se realizó una sola labor mediante un conjunto de aperos tirados en serie con tractor de 120 HP. El orden de tiro fue el siguiente: cincel de 9 arcos a 35 cm entre púas para abrir el suelo de forma vertical y permitir el ingreso de enmiendas, rastra de dientes, para movilizar las enmiendas y el suelo, y rolo desterronador, para acomodar el suelo y generar cama de siembra (Figura 2.4). La LM utilizada logró incorporar las enmiendas a una profundidad máxima de 20 cm y dejó el suelo preparado para un barbecho que duró 60 días. Para mantener el barbecho libre de malezas se realizó control químico convencional con aplicaciones de glifosato 48 % (3 lt ha⁻¹) y Fluroxipir 48 gr 100cm⁻³ (400 cm³ ha⁻¹).

2.3.4. Manejo del cultivo de soja

El cultivo fue implantado el 15 de noviembre de 2012, utilizándose la variedad de soja Munasqa (RR, grupo de madurez VIII), inoculada con cepa bacteriana *bradirizobium japonicum ssp.*(Nitrasoil). Se utilizó sembradora experimental a 52 cm entre líneas. a La presencia de malezas en postemergencia, en estado inicial de crecimiento, se controló con una aplicación de glifosato 48% (3 lt ha⁻¹). En estado vegetativo del cultivo de soja se realizó aplicación de insecticidas tiametoxam 14,1 gr.100cm⁻³ + lambdacialotrina 10,6 gr 100cm⁻³ (200 cm³ ha⁻¹). También aplicación de fungicidas Azoxistrobina 20 gr 100cm⁻³ +

Cyproconazole 8 gr100cm⁻³ (300 cm³ ha⁻¹). La cosecha se realizó a mediados de abril de 2021 con una cosechadora experimental (Wintersteiger - Classic Plus) obteniendo muestras de 8 metros de largo por 4 surcos por parcela. El rendimiento se midió utilizando la balanza de precisión, momento en el cual también se tomó una muestra para la determinación de la humedad de cosecha con humidímetro de mano (Dickey-john – Multigrain).



Figura 2.4: Grupo en serie de herramientas (cincel de púas, rastra de dientes y rolo desterronador) utilizados para incorporar las enmiendas en una sola pasada mediante labranza mínima

Capítulo 3

Estabilidad de agregados y su relación con fracciones de carbono, en un suelo enmendado con cama de pollo y sulfato de calcio

3.1 Introducción

El proceso de agregación de los suelos es el resultado de la unión de partículas minerales y compuestos orgánicos, que resulta en la formación de los complejos coloidales órgano-minerales (Tisdall y Oades, 1982; Cotrufo et al., 2015). La fracción mineral, especialmente el contenido y características de la arcilla que actúa como factor abiótico de agregación, condiciona los cambios de volumen que ocurren ante variaciones del contenido hídrico y el laboreo del suelo (Oades, 1992; Wagner et al., 2007).

Por otra parte, la biota edáfica también tiene la capacidad de generar conexiones entre las partículas, mediadas por compuestos mucilaginosos derivados de su actividad. Por estos motivos, la biota es considerada un agente importante en los procesos de formación y estabilización de los agregados (Oades, 1992). Variaciones en los contenidos totales del carbono orgánico del suelo (COS) repercuten en la estabilidad de la estructura de suelos, especialmente en suelos limosos y arenosos (Six, 2000; Novelli et al., 2013; Kraemer et al., 2021). Dentro del COS, diversas fracciones consideradas como transitorias en el suelo, por ejemplo, los carbohidratos solubles (CHS), han sido relacionados con la agregación (Ghani et al., 2003; Liu et al., 2005; Bongiovani y Lobartini, 2006; Carrizo et al., 2015).

El contenido de las diversas fracciones de COS es muy afectado por factores ambientales, especialmente en ambientes subtropicales (Álvarez y Lavado, 1998). En dichos ambientes, las tasas de degradación del carbono orgánico son elevadas y las prácticas agronómicas que incrementen el ingreso de residuos orgánicos al suelo son necesarias para mantener la agregación (Bayer et al., 2009). Distintos materiales orgánicos pueden cumplir esta función. El uso de sustratos orgánicos de actividades pecuarias, como la cama de cría de pollos (CP), incrementa los niveles de COS en el mediano y largo plazo (Bolton et al., 2004; Gascho y Hubbard, 2006; Ferreras et al., 2005; Chang et al., 2008; Bowden, et al., 2010; Watts et al.,

2010), lo que ha sido asociado a mejoras en la fertilidad química y estabilidad estructural de los suelos a corto y mediano plazo (Rotondo et al., 2009; Foster, 2011; Li et al., 2011).

Algunos trabajos indican que las características del sustrato orgánico (composición y volumen) que se utiliza como enmienda y la forma de incorporación al suelo repercuten en la biota que la transforma y, consecuentemente, en la generación de las diversas fracciones de COS (Cambardella y Elliot, 1992; Mariot y Wander, 2006; Abiven et al., 2009; Carrizo et al., 2015). Si bien algunos estudios evalúan la dinámica de generación de dichas fracciones (Abiven et al., 2009; Carrizo et al., 2015; Kraemer et al., 2021), son pocos los que analizan el efecto de las mismas sobre los procesos de agregación. Breyner et al. (2020) indicaron que las proteínas asociadas a hongos micorrízicos arbusculares se incrementan cuando se aplica CP y otros purines orgánicos, lo que repercute en la agregación del suelo.

El uso de sulfato de calcio (SFC) también ha sido indicado como una técnica que favorece los procesos de agregación del suelo (Lehrsch et al., 1993). Evaluaciones realizadas por diversos autores (Ponette et al., 1996; Gambaudo et al., 2001; Zambrosi, 2007; Vieira Fontoura et al., 2019) indican que el uso de SFC aumenta la disponibilidad del calcio intercambiable (Ca^{2+}) del suelo y con ello la agregación. Blum et al. (2011) indicaron que la unión de las partículas y la formación de agregados fue favorecida cuando se aplicó dosis mayores a 1 Mg ha^{-1} de SFC, lo que contribuyó a disminuir la pérdida de suelo y nutrientes durante eventos climáticos adversos (Jian Yu et al., 2003; Feltron et al., 2004; Favaretto et al., 2008).

La información respecto de la aplicación superficial de yeso en combinación con enmiendas orgánicas para la regeneración de la estructura del suelo en SD es escasa (Gabioud et al., 2019). Salgado et al. (2014) aportó información de aumentos de la agregación del suelo con uso de humus líquido (20 Mg ha^{-1} de ácidos fúlvicos) en combinación con SFC ($1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$

¹): Muneer y Oades (1989), quienes estudiaron el efecto de la aplicación de residuos de cosecha de trigo junto con SFC y carbonato de calcio, indicaron que luego de varios meses de descomposición hubo un incremento de la estabilidad estructural del suelo (EA) en el tratamiento con combinación de residuos y enmiendas inorgánicas, siendo más efectiva la combinación con SFC. Gabioud et al. (2019) concluyeron que el uso de cama de pollos y yeso en forma conjunta permitió remediar condiciones físicas desfavorables de suelos franco limosos. Por estos motivos, el uso combinado de enmiendas orgánicas, como la CP, e inorgánicas, como el SFC, puede ser promisorio para aumentar la calidad física del suelo y, a la vez, disminuir los riesgos derivados de la adición elevada de algunos nutrientes con la CP, que no siempre actúan como agentes de agregación (por ejemplo, el sodio) (Haynes y Naidu, 1998).

A pesar de estos antecedentes, los estudios que interpreten el efecto de ambas prácticas sobre la actividad biológica y el comportamiento de las fracciones de carbono, como el carbono orgánico particulado (COP) y carbohidratos solubles (CHS), son escasos. Estos aspectos cobran importancia al considerar que el patrón de localización de la CP sin dudas puede alterar la dinámica de la biota y, como consecuencia, el efecto sobre la agregación del suelo. Además, muy pocos trabajos han estudiado la relación entre dichas fracciones y la estabilidad estructural del suelo bajo diversos sistemas de manejo; menos aún son los trabajos que abordan estos temas e incluyen el efecto del agregado de CP y yeso en suelos franco limosos localizados en clima subtropical.

El objetivo de este trabajo fue determinar los efectos de la aplicación de CP y SFC sobre la agregación del suelo y su relación con diversas fracciones del carbono (persistente, temporario y transitorio). La hipótesis que se sostiene es que la aplicación de cama de pollo y sulfato de calcio aumenta la agregación y la estabilidad estructural de los suelos franco-

limosos en ambientes subtropicales, debido principalmente al aporte significativo de las fracciones transitorias de carbono orgánico.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1. Muestreo de suelo.

Los relevamientos de suelo se realizaron luego de la cosecha del cultivo de soja, en mayo de 2013, 300 días luego de la aplicación de los tratamientos al suelo. Las condiciones de humedad de suelo fueron cercanas a capacidad de campo ($0,22 \text{ g g}^{-1}$). Para analizar los procesos que ocurrieron en el horizonte Ap del suelo en estudio, se realizaron muestreos en dos profundidades: 0 a 7,5 cm (estrato superficial) y 7,5 a 15 cm (estrato subsuperficial). Muestras perturbadas de suelo se extrajeron con barreno media caña para realizar los análisis químicos. Para los análisis físicos se extrajeron muestras no perturbadas con palas y con cilindros (5x5 cm).

3.2.2. Variables medidas y cálculos

3.2.2.1. Carbono orgánico total de suelo en masa equivalente y carbono orgánico particulado de suelo.

Las muestras para análisis del carbono de suelo se colocaron en bolsas plásticas y dentro de conservadoras para su transporte al laboratorio, evitando la influencia de la temperatura exterior y la radiación solar. El suelo fue tamizado, con la humedad de campo, con malla de 2 mm de diámetro y dispuesto en bandejas para su secado a temperatura aproximada de 20°C (SAMLA, 2004).

Sobre las muestras acondicionadas se tomaron alícuotas de 1 g para determinar carbono orgánico total (COT) mediante combustión húmeda (SAMLA, 2004). Los valores obtenidos fueron corregidos a stock de carbono mediante la metodología de masas equivalentes (Lee et

al., 2009), para lo cual se consideró la información de la densidad aparente (DAP) del suelo medida previo a los muestreos (n=72). En estos relevamientos no se presentaron diferencias entre los tratamientos propuestos para la variable DAP, por lo cual la profundidad de muestreo fue igual en los tratamientos propuestos [% y stock Tn ha⁻¹].

Para determinar el carbono orgánico particulado (COP) se utilizó la técnica propuesta por Cambardella y Elliot (1992). Se tomaron alícuotas de 20 g de suelo seco tamizado a 2 mm y se colocaron en tubos de 50 ml junto con 30 ml de agua destilada y 5 ml de hexametáfosfato de sodio al 5 %. Posteriormente se realizó una dispersión mediante agitación vaivén a 180 golpes por minuto durante 3 horas. Luego, el material más grueso se separó, pasando las muestras a través de un tamiz de 50 µm, se llevó a estufa a 60°C durante 24 horas. Después de registrar el peso, las muestras se colocaron en mufla durante dos horas a 420 °C. Una vez que las muestras estuvieron a temperatura ambiente se registró el peso nuevamente. El COP se calculó como la diferencia de peso de la muestra, antes y luego de la combustión seca [en g y en %].

3.2.2.2. *Carbohidratos solubles en agua*

La determinación de carbohidratos solubles en agua (CHS) presentes en el suelo se realizó con la técnica propuesta por Ghani et al. (2003), con modificaciones. Se dispuso 3 gramos suelo seco en tubos con 30 ml de agua destilada y se los expuso a baño de agua a 80 °C por 16 h. Luego las muestras se centrifugaron y filtraron. A seguir, se extrajo 1 ml de la solución filtrada y colocó en un tubo de ensayo. Se adicionó 1 ml de fenol y 5 ml de ácido sulfúrico concentrado para luego medir la transmitancia (485 nm) con espectrofotómetro UV/VIS [$\mu\text{m grs}^{-1}$].

3.2.2.3. *Glomalina fácilmente extraíble (PRGS-FE) y glomalina total (PRGS)*

La extracción de la proteína relacionada a la glomalina de suelo fácilmente extraíble (PRGS-FE) se realizó con la técnica descrita por Wright y Upadhyaya (1996). Se pesó 1 gr de suelo (<2 mm) y se añadieron 8 mL de citrato de sodio 20 mM pH 7,0. Posteriormente la muestra se colocó en autoclave por 30 minutos a 121 °C. El extracto fue retirado inmediatamente y refrigerado a 4 °C. Posteriormente la muestra se centrifugó a 5000xG por 15 minutos. El sobrenadante fue depositado en matraces volumétricos que se mantuvieron a 4°C. Se realizaron entre 3 y 4 ciclos de agregado de extractante, autoclavado, refrigerado y centrifugado, hasta que el extracto colectado presentó un color característico pardo-rojizo. Los extractos de todos los ciclos se juntaron y se llevaron a igual volumen con citrato de sodio (Wright et al., 1996). La determinación de la PRGS-FE se realizó en una alícuota del sobrenadante extraído por el método Bradford con espectrofotómetro a 595 nm (Aguilera et al., 1987). Para la extracción de la proteína de suelo relacionada a la glomalina total (PRGS) se pesó 1 g de suelo y se añadió 8 mL de citrato de sodio 50 mM pH 8,0. Esa muestra se colocó en autoclave a 121°C durante 60 min, luego se refrigeró a 4°C y se centrifugó a 5000xG durante 15 minutos. A continuación, se realizó el mismo procedimiento mencionado anteriormente. Se determinó PRGS en una alícuota del sobrenadante extraído por el método Bradford con espectrofotómetro a 595 nm (Aguilera et al., 1987).

3.2.2.4. *Estabilidad de agregados.*

La determinación de la estabilidad de agregados de suelo (EAS) se realizó como lo propuso Le bissonnaiss (1996). El suelo se extrajo con pala, sin ejercer presiones que modificasen la estructura a campo. Se colectaron 15 submuestras de material por unidad experimental y profundidad de muestreo. Se depositaron en recipientes rígidos con tapa, luego fueron llevados al laboratorio para su acondicionamiento. Se desterronó las muestras a mano, a

humedad de campo, y pasaron por tamiz de 8 mm de diámetro. Las raíces y restos vegetales presentes en las muestras fueron separadas en ese momento. Los agregados menores a 8 mm se dejaron secar a temperatura ambiente. Una vez secos, se emplearon tamices para separar agregados de tamaño comprendido entre 5 y 3 mm. Estos agregados se secaron por 48 horas en estufa a 45°C. Luego se procedió al pesaje de alícuotas de 10 gramos de agregados, que fueron expuestos a tres pre-tratamientos según indica la metodología: humectación lenta (h-lenta), que somete a los agregados a humectación por capilaridad en agua destilada, humectación rápida (h-rápida), que implica la humectación por inmersión directa en agua destilada, y disgregación mecánica (d-mecánica), que expone a los agregados a la humectación en etanol 96 volúmenes y la posterior agitación manual en agua destilada. Estos pre-tratamientos determinan que los agregados reciban distintos efectos de disgregación, como la microfisuración, el estallido y la disgregación mecánica, respectivamente (Le Bissonais, 1996; Cosentino et al., 2006; Novelli et al., 2011).

Posterior al pre-tratamiento de las muestras, se expuso a las mismas a un tamizado húmedo en etanol con agitador Feodoroff con tamiz de 50 μm , donde se recuperó la fracción mayor retenida en la malla. Esa fracción compuesta por agregados húmedos fue secada durante 48 h y pesada. Posteriormente, el suelo recuperado se tamizó de forma manual mediante una columna de seis tamices (mallas de 2000, 1000, 500, 200, 100 y 50 μm). Cada fracción resultante en los distintos tamices fue recuperada y pesada. La masa de la fracción recuperada de cada tamiz fue multiplicada por la apertura media entre dos tamices para calcular el DMP de los agregados para el pre tratamiento h-lenta, h-rápida y d-mecánica. Posteriormente con el objeto de obtener un valor que sintetice los resultados de los tres pretratamientos se calculó la EAS como el DMP medio de los tres pre-tratamientos (Le Bissonais et al., 1996).

3.2.2.5. *Densidad aparente del suelo.*

La determinación de la densidad aparente (DAP) se realizó con el método de Blake y Hartge (1986), Se consideraron dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm). Las muestras (n=72) no disturbadas se extrajeron con cilindros metálicos (100cm³) que se dispusieron en contenedores que se rellenaron con suelo para evitar su alteración en el transporte al laboratorio. Las muestras se secaron a 105°C por 72 horas y se registraron los pesos secos para determinar el peso en relación al volumen del cilindro para determinar DAP.

3.2.3 *Análisis de la información.*

Los datos se sometieron a análisis de varianza el software Infostat (Di Rienzo et al., 2015). Las diferencias entre variables de suelo se analizaron mediante test de comparación de medias de Fischer (LSD, $\alpha=0,05$). Se estimó la contribución relativa de los efectos cama de pollos (CP), sulfato de calcio (SFC) y labranzas y su interacción mediante el análisis de varianzas, los resultados se expresaron en gráficos y tablas. Para considerar la relación entre variables se realizó análisis de correlación de Pearson (Pearson, 1965) entre variables de suelo para cada profundidad. Para explicar la manera en que se relacionan las variables estudiadas como grupos, se realizó análisis de correlaciones canónicas (Johnson y Wichern, 1998) entre conjuntos de variables que actúan como factores bióticos de agregación (COT, COP, CHS, PRGS y PRGS-FE) y variables que conforman el grupo EAS (h-lenta, h-rápida, d-mecánica) para lo que se analizó la contribución de los grupos en la explicación de la variabilidad que presentan los datos. Mediante el uso de gráficos de distribución de las variables canónicas significativas determinadas (Balzarini et al., 2015)., se analizó la relación con los tratamientos estudiados como categorías.

3.3 Resultados

3.3.1. Carbono orgánico total, particulado y carbohidratos solubles del suelo

Los contenidos de carbono orgánico total (COT) del suelo, de carbono orgánico particulado (COP) y de carbohidratos solubles (CHS) pudieron ser analizados como efectos simples individuales para cada factor utilizado como tratamiento del suelo, como ser el uso de cama de pollo (CP), labranza y sulfato de calcio (SFC), ya que no presentaron interacciones significativas entre los factores que determinarían la necesidad de un análisis conjunto de los efectos para cada variable (Di Rienzo et al., 2015).

El COT en la profundidad 0 a 7,5 cm presentó diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre tratamientos con cama de pollo (CP). El uso de 20 Mg ha⁻¹ de CP elevó el stock equivalente de COT del suelo de 10,3 a 11,8 Mg ha⁻¹, lo que representa un incremento de 15 % (Figura 3.1). La enmienda orgánica adicionada contuvo 6,9 Mg ha⁻¹ de carbono; consecuentemente, la eficiencia para introducir carbono en los primeros 7,5 cm de suelo fue 21 %.

En la profundidad 7,5 a 15 cm los contenidos de COT no presentaron diferencias entre tratamientos con CP, con SFC y entre sistemas de labranza. La media fue 10,1 Mg ha⁻¹ ($\pm 0,13$ error estándar).

El uso de CP produjo cambios significativos en los contenidos de carbono orgánico particulado (COP; $p < 0,0001$) en la profundidad 0 a 7,5 cm. El COP se incrementó 66 % con la aplicación de CP, y varió de 3,38 a 5,62 Mg ha⁻¹ (Figura 3.1).

Los carbohidratos solubles (CHS) presentaron diferencias significativas entre tratamientos con CP, tanto en la profundidad 0 a 7,5 cm ($p < 0,0001$) como de 7,5 a 15 cm ($p < 0,003$). A nivel superficial, los contenidos medios de CHS fueron superiores cuando se aplicó 20 Mg ha⁻¹ de CP (Figura 3.1), de forma similar a lo observado en la profundidad subsiguiente. Las

variaciones ocurridas fueron notablemente superiores de 0 a 7,5 cm (210%), respecto de las producidas de 7,5 a 15 cm (23%).

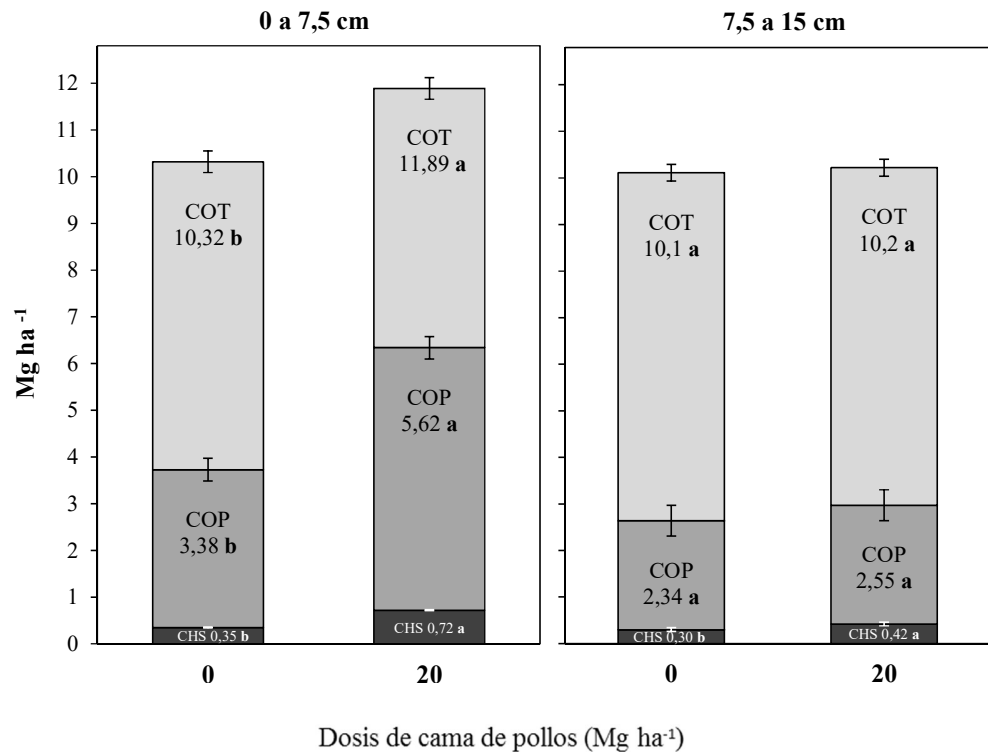


Figura 3.1: Contenido de carbono orgánico total (COT), particulado (COP) y carbohidratos solubles (CHS) determinados en dos profundidades (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) de suelo franco limoso tratado con dos dosis de cama de pollo (0 y 20 Mg ha⁻¹). Valores medios \pm error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variable y profundidad, test LSD Fisher (α : 0,05).

Los mayores contenidos de las fracciones COP y CHS estudiadas en la profundidad 0 a 7,5 cm para tratamientos con CP, determinaron que las relaciones porcentuales de dichas fracciones respecto al COT presenten cambios. Ante el uso de CP, la relación COP/COT (Tabla 3.1) presentó diferencias significativas ($p < 0,001$) y fue mayor en suelos con enmienda (47,6 %) respecto a sin enmienda (32,1 %). Como consecuencia del uso de CP, también la relación CHS/COT presentó diferencias ($p < 0,005$): 6,1% en los suelos con CP

versus 3,4% sin CP (Tabla 3.1). En cambio, la relación entre ambas fracciones (CHS/COP) no presentó diferencias y la media fue 12,4%.

Con respecto al factor labranza, se observó que no determinó cambios significativos en el COT y el COP del suelo, aunque la relación COP/COT fue menor ($p < 0,02$) en LM (36,7%) en la profundidad 0 a 7,5 cm de suelo, respecto de SD (46,6%). Esto también ocurrió, aunque de forma inversa ($p < 0,007$) en la profundidad 7,5 a 15 cm de suelo, donde el COP/COT fue 22,2% en SD y 31,7 % en LM.

Tabla 3.1: Contenido de carbono orgánico total (COT) y relaciones de COT con carbono orgánico particulado (COP/COT), con carbohidratos solubles (CHS/COT) y de CHS con COP (CHS/COP), evaluados en dos profundidades de suelos tratados con dos dosis de cama de pollos (CP), dos tipos de labranza (LM y SD) y tres dosis de sulfato de calcio (SFC). Valores medios \pm error estándar de la media.

Profundidad	Tratamientos		COT	COP/COT	CHS/COT	CHS/COP
			Mg ha ⁻¹	%	%	%
0 a 7,5 cm	0 CP LM	0 SFC	10,2 \pm 0,6	23,3 \pm 5,2	3,3 \pm 0,3	16,3 \pm 3,6
	0 CP LM	0,8 SFC	11,2 \pm 0,8	27,3 \pm 4,8	3,0 \pm 0,5	12,0 \pm 2,7
	0 CP LM	1,6 SFC	10,0 \pm 0,5	32,0 \pm 8,2	3,5 \pm 0,2	12,7 \pm 3,7
	0 CP SD	0 SFC	10,5 \pm 0,7	36,0 \pm 3,2	3,6 \pm 0,3	10,0 \pm 0,6
	0 CP SD	0,8 SFC	10,0 \pm 0,6	37,3 \pm 2,7	3,0 \pm 0,2	8,3 \pm 0,9
	0 CP SD	1,6 SFC	10,0 \pm 0,6	41,0 \pm 2,1	4,1 \pm 0,6	10,0 \pm 1,5
	20 CP LM	0 SFC	11,5 \pm 0,8	50,3 \pm 0,3	5,8 \pm 0,7	11,7 \pm 1,5
	20 CP LM	0,8 SFC	11,4 \pm 0,6	44,7 \pm 4,1	5,7 \pm 0,6	13,3 \pm 2,4
	20 CP LM	1,6 SFC	12,1 \pm 0,9	42,3 \pm 1,2	6,5 \pm 0,7	15,3 \pm 1,5
	20 CP SD	0 SFC	12,3 \pm 0,2	52,7 \pm 3,0	6,3 \pm 0,2	12,0 \pm 0,6
	20 CP SD	0,8 SFC	12,0 \pm 0,6	46,0 \pm 2,0	5,9 \pm 0,4	13,0 \pm 1,5
	20 CP SD	1,6 SFC	12,0 \pm 0,6	48,3 \pm 8,8	6,4 \pm 0,3	14,3 \pm 1,7
7,5 a 15 cm	0 CP LM	0 SFC	11,2 \pm 1,6	33,0 \pm 9,5	3,2 \pm 0,6	13,3 \pm 1,3
	0 CP LM	0,8 SFC	10,1 \pm 1,1	29,0 \pm 9,3	3,7 \pm 0,7	17,0 \pm 1,2
	0 CP LM	1,6 SFC	9,7 \pm 1,1	31,7 \pm 6,4	5,0 \pm 0,3	17,0 \pm 2,5
	0 CP SD	0 SFC	10,1 \pm 0,3	20,7 \pm 2,3	3,7 \pm 0,4	18,0 \pm 1,2
	0 CP SD	0,8 SFC	9,6 \pm 0,2	24,3 \pm 3,8	3,7 \pm 0,7	15,0 \pm 1,2
	0 CP SD	1,6 SFC	9,9 \pm 0,0	21,0 \pm 1,2	3,0 \pm 0,4	14,3 \pm 0,9
	20 CP LM	0 SFC	10,4 \pm 0,5	28,0 \pm 4,6	4,9 \pm 1,0	18,7 \pm 1,7
	20 CP LM	0,8 SFC	9,7 \pm 1,6	43,0 \pm 9,5	5,0 \pm 1,0	12,7 \pm 2,6
	20 CP LM	1,6 SFC	10,6 \pm 0,7	25,3 \pm 2,9	5,2 \pm 0,7	21,0 \pm 3,1
	20 CP SD	0 SFC	10,3 \pm 0,2	23,3 \pm 0,9	4,1 \pm 0,3	17,7 \pm 1,2
	20 CP SD	0,8 SFC	10,2 \pm 0,0	18,7 \pm 0,9	3,8 \pm 0,1	20,7 \pm 1,2
	20 CP SD	1,6 SFC	10,1 \pm 0,4	25,3 \pm 2,6	4,4 \pm 0,4	17,7 \pm 2,2

La labranza también determinó cambios significativos ($p < 0,009$) en los contenidos superficiales de CHS. El valor medio de CHS de 0 a 7,5 cm fue menor en LM que en SD (0,52 y 0,56 Mg ha^{-1} respectivamente), lo que representa un 8% menos de CHS como consecuencia del laboreo para incorporar las enmiendas. Al analizar este cambio junto al ocurrido para tratamientos con CP (Figura 3.2) se observa que las diferencias entre LM y SD fueron de menor grado que las generadas por el efecto de la CP y que la mayor variación entre SD y LM se presentó en tratamientos que recibieron 20 Mg ha^{-1} de CP.

En la profundidad 7,5 a 15 cm de suelo los CHS no presentaron cambios por efecto de los tratamientos de labranza realizados; sin embargo, la relación CHS/COT presentó diferencias significativas ($p < 0,02$) entre LM y SD en la profundidad 7,5 a 15 cm, que fue 4,60 y 3,79%, respectivamente. La relación CHS/COP no fue modificada por los sistemas de labranza. El agregado de SFC no produjo cambios en los contenidos de COT, COP y CHS del suelo en las profundidades evaluadas, ni alteró las relaciones entre los contenidos.

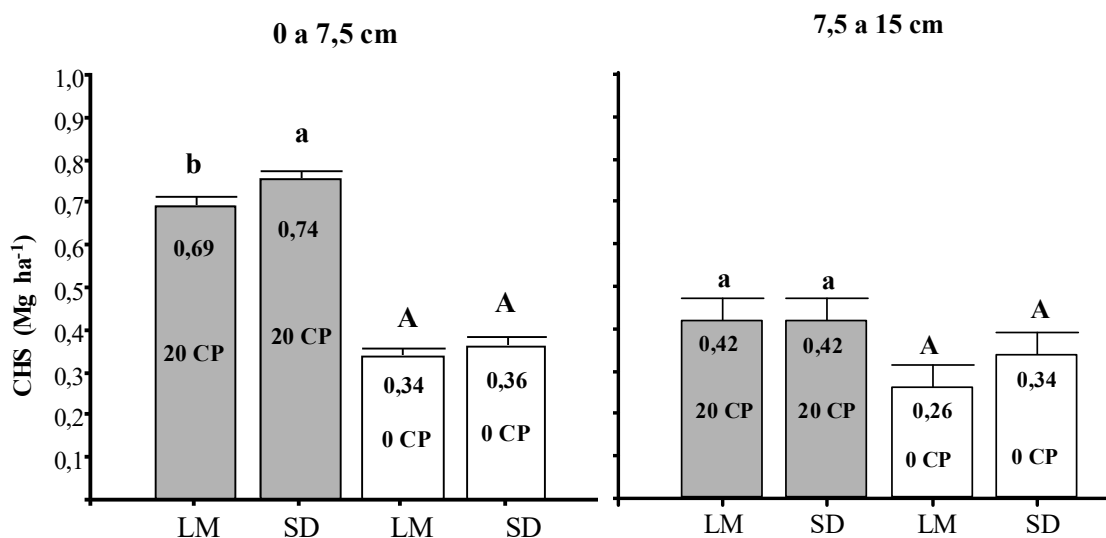


Figura 3.2: Carbohidratos solubles en agua (CHS) en tratamientos con roturación de suelo para incorporar materiales (LM) y labranza cero (SD), en dos profundidades de suelo evaluadas y para tratamientos con cama de pollos (20 CP barras grises) y sin cama de pollos (0 CP barras blancas). Valores medios \pm error estándar de la media ($n=3$). Letras distintas indican diferencias significativas entre sistemas de labranzas según test LSD Fisher ($\alpha: 0,05$).

3.3.2. Proteínas relacionadas a la glomalina de suelo

Los contenidos totales de proteínas relacionadas a la glomalina de suelo (PRGS) no presentaron diferencias significativas ante los factores estudiados (CP, SFC y Labranzas).

Los valores oscilaron entre 1,96 y 2,04 mg g⁻¹ de 0 a 7,5 cm y entre 1,91 y 1,99 mg g⁻¹ de 7,5 a 15 cm, respectivamente (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Contenidos medios y error estándar de proteínas relacionadas a la glomalina del suelo (PRGS) y su contenido fácilmente extraíble (PRGS-FE), en tratamientos con dos dosis de cama de pollos (0 CP y 20 CP), dos sistemas de labranza (LM y SD) y tres dosis de sulfato de calcio (0SFC, 0,8SFC y 1,6SFC) en dos profundidades de suelo evaluados.

Profundidad	Tratamientos			PRGS	PRGS-FE	
				Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	
0 a 7,5 cm	0 CP	LM	0 SFC	1,93 ± 0,07	0,73 ± 0,05	
	0 CP	LM	0,8 SFC	1,80 ± 0,00	0,71 ± 0,04	
	0 CP	LM	1,6 SFC	1,93 ± 0,07	0,81 ± 0,06	
	0 CP	SD	0 SFC	2,00 ± 0,06	0,67 ± 0,06	
	0 CP	SD	0,8 SFC	2,00 ± 0,10	0,74 ± 0,09	
	0 CP	SD	1,6 SFC	2,07 ± 0,12	0,75 ± 0,06	
	20 CP	LM	0 SFC	1,90 ± 0,06	0,92 ± 0,01	
	20 CP	LM	0,8 SFC	2,00 ± 0,06	0,89 ± 0,05	
	20 CP	LM	1,6 SFC	2,20 ± 0,06	0,88 ± 0,04	
	20 CP	SD	0 SFC	2,07 ± 0,03	0,93 ± 0,07	
	20 CP	SD	0,8 SFC	1,93 ± 0,07	0,94 ± 0,09	
	20 CP	SD	1,6 SFC	2,17 ± 0,13	0,74 ± 0,07	
	7,5 a 15 cm	0 CP	LM	0 SFC	2,10 ± 0,10	0,70 ± 0,06
		0 CP	LM	0,8 SFC	1,97 ± 0,12	0,78 ± 0,07
0 CP		LM	1,6 SFC	1,97 ± 0,12	0,82 ± 0,05	
0 CP		SD	0 SFC	1,90 ± 0,06	0,89 ± 0,03	
0 CP		SD	0,8 SFC	1,87 ± 0,07	0,92 ± 0,05	
0 CP		SD	1,6 SFC	2,07 ± 0,09	0,92 ± 0,07	
20 CP		LM	0 SFC	1,90 ± 0,10	0,69 ± 0,07	
20 CP		LM	0,8 SFC	2,13 ± 0,19	0,99 ± 0,10	
20 CP		LM	1,6 SFC	2,03 ± 0,09	0,83 ± 0,09	
20 CP		SD	0 SFC	2,10 ± 0,10	0,90 ± 0,06	
20 CP		SD	0,8 SFC	1,90 ± 0,06	0,82 ± 0,05	
20 CP		SD	1,6 SFC	1,93 ± 0,15	0,88 ± 0,05	

Los contenidos de glomalina fácilmente extraíbles (PRGS-FE), que se asocian a la glomalina de reciente formación, presentaron interacción significativa ($p < 0,04$) para dos de los factores estudiados en la profundidad 0 a 7,5 cm (CP y SFC) y no significativas en la profundidad 7,5 a 15 cm.

El análisis de la interacción (Figura 3.3) indicó que los tratamientos con 0 y 0,8 Mg ha⁻¹ de SFC y que recibieron CP presentaron contenidos similares de PRGS-FE. Los valores fueron los mayores registrados, 48 y 29 % superiores respecto de sus homólogos con SFC pero que no recibieron CP. El tratamiento con 1,6 Mg ha⁻¹ de SFC que recibió CP presentó un contenido de PRGS-FE similar al de su homólogo en SFC que no recibió CP y tampoco fue distinto al tratamiento de 0,8 Mg ha⁻¹ de SFC con CP.

Al analizar cada factor de la interacción, se evidenció que los mayores incrementos de la PRGS-FE se dieron con el uso de CP. En ausencia de CP, el uso de SFC generó incrementos en los contenidos de PRGS-FE, pero el uso conjunto de CP y SFC determinó disminuciones de la PRGS-FE ante el incremento de la dosis de SFC. En la profundidad subsuperficial, de 7,5 a 15 cm, los contenidos de PRGS-FE fueron similares entre tratamientos, y variaron entre 0,79 y 0,95 $\mu\text{g g}^{-1}$, valores inferiores a los determinados en la profundidad 0 a 7,5 cm.

En lo referido a la PRGS (Figura 3.3) y su relación porcentual PRGS-FE/PRGS, en la profundidad 0 a 7,5 cm se observaron diferencias significativas ($p < 0,006$) en el tratamiento con CP versus sin CP y los valores fueron 44,2 % y 37,3 %, respectivamente.

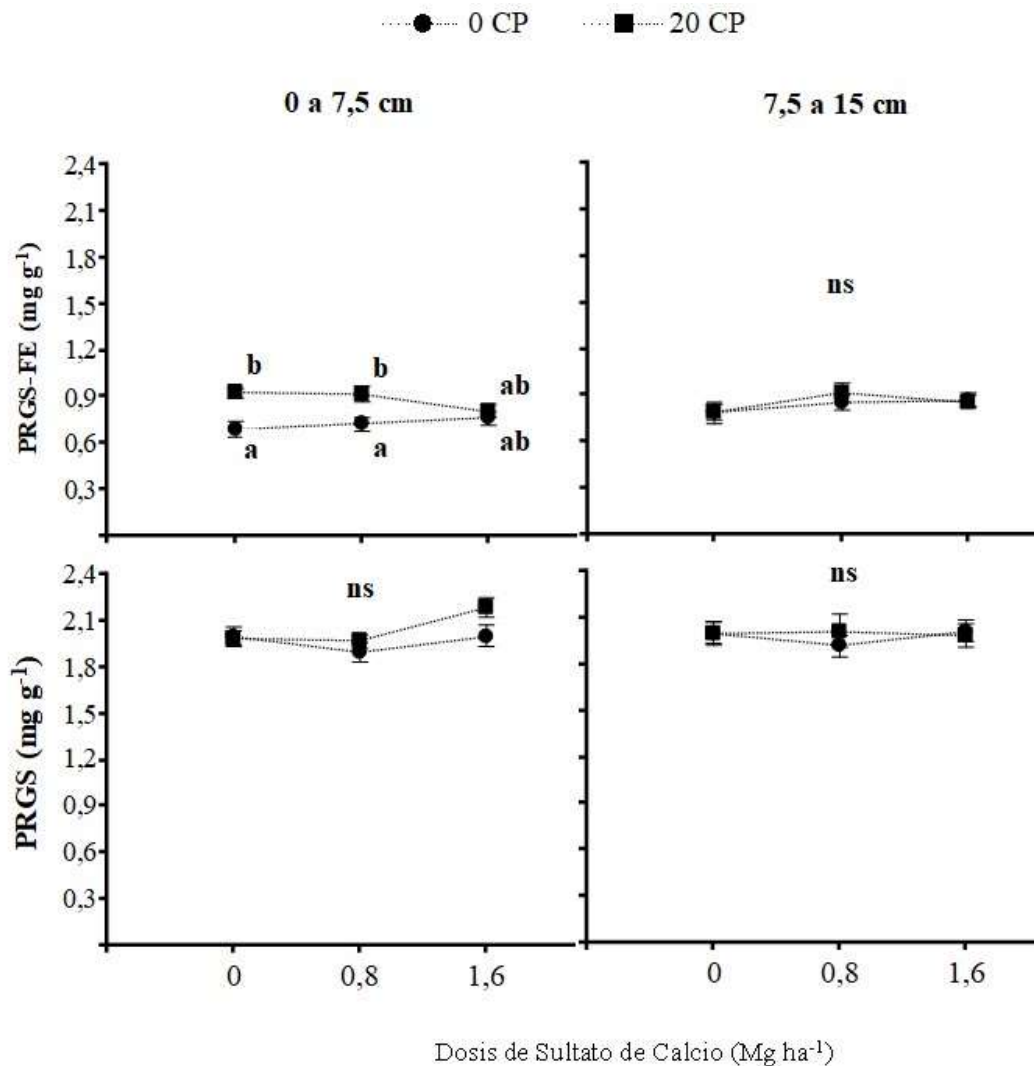


Figura 3.3: Contenido de proteínas relacionada a la glomalina de suelo fácilmente extraíble (PRGS-FE) y proteína relacionada a la glomalina total del suelo (PRGS) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) tratados con tres dosis de sulfato de calcio (0, 0,8 y 1,6 Mg ha⁻¹) y dos dosis de cama de pollo (CP). 0 CP, sin aplicación de cama de pollos; 20 CP, con aplicación de 20 Mg ha⁻¹ de cama de pollos. Valores medios ± error estándar de la media (n=3). Test LSD Fisher (α : 0,05).

3.3.3. Estabilidad de agregados de suelo (EAS)

Los factores analizados (CP, SFC y Labranzas) no presentaron interacciones significativas (Tabla 3.3) al considerar el diámetro medio de agregados del suelo (DMP) resultante de los

distintos pretratamientos y la estabilidad de agregados de suelo (EAS), por lo cual, se procedió al estudio de efectos simples de los tratamientos de cada factor para dichas variables de suelo.

Ante la adición de CP, los agregados de suelo de la profundidad 0 a 7,5 cm presentaron diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los DMP determinados luego de la disgregación mecánica (d-mecánica). La CP también generó diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los DMP de agregados sometidos a su ruptura por fisuración mediante la humectación lenta (h-lenta). Al exponer los agregados al estallido por inmersión en agua mediante el pre tratado con humectación rápida (h-rápida), la adición de la enmienda, también determinó desagregación diferencial ($p < 0,001$).

La resistencia mecánica de los agregados a la degradación en la profundidad 0 a 7,5 cm, fue 15 % mayor cuando se usó CP (20 Mg ha⁻¹). Estos agregados presentaron 1,30 mm DMP. En ausencia de CP el DMP fue 1,13 mm (Tabla 3.3). La resistencia solo mejoró de 0 a 7,5 cm de profundidad, ya que de 7,5 a 15 cm los DPM fueron similares; 1,12 y 1,07 mm respectivamente para 20 y 0 Mg ha⁻¹ de CP.

Los resultados de la prueba h-lenta determinaron que la desagregación por microfisuración fue 16% menor de 0 a 7,5 cm en el suelo tratado con CP. Cuando se aplicó la enmienda orgánica, los agregados tuvieron un DMP de 1,13 mm, mientras que cuando no se aplicó CP su DMP fue 0,91 mm. En la profundidad 7,5 a 15 cm los DMP fueron 0,74 y 0,69 mm, para 20 y 0 Mg ha⁻¹ de CP, respectivamente, y al igual que con los pretratamientos de d-mecánica, no presentaron diferencias significativas entre dosis de CP.

El tamaño de agregados luego de su exposición al estallido generado mediante la prueba h-rápida, presentó DMP mayor (15 %) en suelos tratados con CP, aumentando de 0,39 a 0,45 mm su DMP.

Al considerar el valor medio de DPM de las tres pruebas de pretratamientos, se obtuvo como resultado de la variación, la estabilidad de los agregados de suelo (EAS) de cada tratamiento. Se identificaron diferencias significativas ($p < 0,0001$) con el uso de CP en la profundidad 0 a 7,5 cm, donde el DMP de los agregados fue 17 % superior en tamaño: 0,74 mm en suelos no tratados y 0,87 mm cuando se aplicó 20 Mg ha⁻¹ de CP. Los tratamientos con CP no generaron cambios significativos en la EAS en la profundidad 7,5 a 15 cm (Tabla 3.3).

Por otro lado, el SFC determinó cambios en el DMP de los agregados en la profundidad 0 a 7,5 cm; éstos presentaron diferencias significativas ($p < 0,004$) cuando fueron expuestos a la prueba d-mecánica (Tabla 3.3), aumentando 9 % respecto del suelo sin aplicación, con ambas dosis de SFC evaluadas (0,8 y 1,6 Mg ha⁻¹). En la profundidad 7,5 a 15 cm, las diferencias ($p < 0,048$), en el pretratamiento d-mecánica, fueron entre el tratamiento de 0,8 Mg ha⁻¹ respecto de 0 SFC, donde el DMP se incrementó 7,5%.

Ante la prueba de h-rápida el DMP de tratamientos con SFC en la profundidad 0 a 7,5 cm, ambas dosis fueron ($p < 0,002$) que sin aplicación de SFC. Se entiende, por lo tanto, que en esta experiencia el SFC determinó mayor resistencia a la degradación por estallido a una profundidad de 0 a 7,5 cm (10,2%), mientras que de 7,5 a 15 cm no se modificó el DMP por su aplicación.

Los agregados superficiales de suelos que recibieron las distintas dosis de SFC, presentaron cambios significativos ($p < 0,02$) del DMP luego de exponer los mismos al pretratamiento h-lenta, que genera desagregación por microfisuración. El tamaño fue mayor (15 %) cuando se usó la dosis de 1,6 Mg ha⁻¹, respecto de suelo no tratados (0 Mg ha⁻¹), con medias de DMP de 1,09 y 0,95 mm respectivamente. El tratamiento intermedio de 0,8 Mg ha⁻¹, no presentó diferencias estadísticas respecto de los demás y obtuvo una media de 1,01 mm.

Tabla 3.3: Diámetros de agregados (DMP) en dos profundidades de suelo, tratados con cama de pollos (CP), sulfato de calcio (SFC) y labranzas, donde se evaluó la estabilidad de agregados (EAS) y los pretratamientos de humectación lenta (h-lenta) y rápida (h-rápida) con agua, y con agitación mecánica (d-mecánica). Letras distintas indican diferencias significativas entre medias del factor. * indica diferencias significativas $p < 0,05$; ** indica diferencias significativas $p < 0,01$; *** indica diferencias significativas $p < 0,001$, ns indica diferencias no significativas. Test LSD Fisher ($\alpha: 0,05$)

Tratamiento	EAS		d-mecánica		h-lenta		h-rápida	
	DMP (mm)		DMP (mm)		DMP (mm)		DMP (mm)	
	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm
CP 0	0,74 a	0,61 a	1,13 a	1,07 a	0,91 a	0,69 a	0,39 a	0,31 a
CP 20 Mg ha ⁻¹	0,87 b	0,64 a	1,30 b	1,12 a	1,13 b	0,74 a	0,45 b	0,32 a
SFC 0	0,75 a	0,63 a	1,14 a	1,06 a	0,95 a	0,77 a	0,39 a	0,31 a
SFC 0,8 Mg ha ⁻¹	0,81 b	0,63 a	1,25 b	1,14 b	1,01 ab	0,68 a	0,43 b	0,32 a
SFC 1,6 Mg ha ⁻¹	0,85 c	0,62 a	1,25 b	1,08 ab	1,09 b	0,71 a	0,45 b	0,32 a
LM	0,79 a	0,64 a	1,15 a	1,09 a	1,07 b	0,77 a	0,41 a	0,32 a
SD	0,81 a	0,61 a	1,28 b	1,1 a	0,97 a	0,66 a	0,44 b	0,32 a
<i>Fuente Variación</i>								
CP	***	ns	***	ns	***	ns	***	ns
SFC	***	ns	**	*	*	ns	**	ns
Labranza	ns	ns	***	ns	*	ns	*	ns
CP*SFC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP*SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Como consecuencia, la EAS presentó diferencias significativas ($p < 0,0001$) ante dosis de SFC y se incrementó 7 % cuando se aplicó 0,8 Mg ha⁻¹ y 13 % con 1,6 Mg ha⁻¹ de SFC respecto de la no aplicación. A pesar de las diferencias dadas para los pretratamientos mencionados, en la profundidad 7,5 a 15 cm la EAS no fue modificada por la aplicación de SFC, y presentó DMP de 0,75 mm en suelo sin SFC, 0,81 mm con 0,8 Mg ha⁻¹ de SFC y 0,85 mm de DMP en la dosis de 1,6 Mg ha⁻¹ de SFC.

La labranza por su parte, generó diferencias en el tamaño de agregados de suelo del estrato 0 a 7,5 cm expuestos a la d-mecánica ($p < 0,0001$) y h-rápida ($p < 0,04$). En todos ellos el DMP fue mayor (11 y 7 % respectivamente) en SD respecto de LM. Sin embargo, la h-lenta

(microfisuración) determinó que los agregados del tratamiento LM presenten DMP significativamente mayor (10%; $p < 0,02$;) respecto a SD. Como consecuencia la EAS no se modificó ante las labranzas, y presentó DMP similares entre SD y LM. (0,81 y 0,79 mm).

3.3.5. Relación ente estabilidad de agregados y compuestos asociados a su agregación

La estabilidad de agregados del suelo (EAS) de la profundidad 0 a 7,5 cm presentó coeficientes de correlación positivos y significativos con los DMP de los pretratamientos d-mecánica, h-lenta y h-rápida. La EAS se asoció de manera más estrecha con la h-rápida (0,8) lo que indica que es el pretratamiento que más influyó, h-lenta (0,77) y d-mecánica (0,74) lo hicieron con menos ajuste.

Respecto a los compuestos asociados a su agregación, fue significativa ($p < 0,0001$) la correlación con los contenidos de CHS (0,74) y COP (0,71) del suelo (Tabla 3.4). También la EAS se asoció con el contenido de PRGS (0,58).

Al analizar la relación entre las fracciones de carbono del suelo, solo los CHS presentaron asociación con los tres pretratamientos evaluados, mientras que el COP solo lo hizo con la d-mecánica y la h-rápida. También la PRGS se relacionó con la h-rápida. La relación entre COT con los CHS presentó asociación elevada, pero fue mayor con la fracción COP. También se presentó relación positiva y significativa entre los CHS y la PRGS-FE.

En la profundidad 7,5 a 15 cm, la EAS presentó ajuste significativo con h-lenta y h-rápida, y de las fracciones evaluadas, con el COP (0,65). Finalmente, el COP y los CHS presentaron asociación y fue la única establecida entre el conjunto de los evaluados.

Tabla 3.4: Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de suelo estudiadas en dos profundidades (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm). * indica diferencias altamente significativas ($p < 0,001$).

Profundidad	EAS	h-lenta	d-mecánica	h-rápida	COT	COP	CHS	PSRG	PSRG-FE
0 a 7,5 cm									
EAS	1								
h-lenta	0,77*	1							
d-mecánica	0,74*	0,3	1						
h-rápida	0,80*	0,3	0,63*	1					
COT	0,4	0,2	0,4	0,3	1				
COP	0,71*	0,4	0,62*	0,61*	0,69*	1			
CHS	0,74*	0,56*	0,65*	0,51*	0,59*	0,72*	1		
PSRG	0,58*	0,4	0,3	0,59*	0,3	0,5	0,3	1	
PSRG-FE	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,5	0,54*	0,0	1
7,5 a 15 cm									
EAS	1								
h-lenta	0,87*	1							
d-mecánica	0,4	0,1	1						
h-rápida	0,70*	0,4	0,1	1					
COT	0,3	0,3	-0,1	0,2	1				
COP	0,65*	0,51*	0,3	0,53*	0,2	1			
CHS	0,3	0,3	0,3	0,1	-0,1	0,52*	1		
PSRG	0,2	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	-0,2	1	
PSRG-FE	0,0	0,0	0,2	-0,1	-0,3	-0,1	0,2	0,2	1

El análisis de correlación canónica utilizado para evaluar la relación entre el grupo de variables asociadas al tamaño de agregados resultante de los pretratamientos (h-lenta, d-mecánica, h-rápida y EAS) y aquellas asociadas al grupo de los distintos compuestos y factores orgánicos asociados a la agregación (COT, COP, CHS, PRGS, PRGS-FE y ARM) determinó, para la profundidad 0 a 7,5 cm, la existencia una primera correlación canónica que determina una asociación significativa ($p < 0,0001$) entre los grupos de variables, para lo cual se generó una nueva variable canónica (1) (Tabla 3.5). Esta explicó el 73 % de variancia total (R^2) que se presentó entre los dos grupos estudiados. La concentración de CHS, de COP y de PRGS-FE fueron las variables más asociadas a la EAS de todas las estudiadas. Como se visualiza en la figura 3.4, la distribución de la variable canónica 1 generada, permite diferenciar claramente el efecto de los tratamientos con CP. La segunda variable canónica generada (2) no presentó diferencias significativas.

Tabla 3.5: Coeficiente de correlación canónica (R), proporción de la variancia total explicada por cada par de variables canónicas (R²), estadístico (Lambda) y niveles de probabilidad (p-valor) asociados a dicha prueba (Di Rienzo et al., 2015)

Variable canónica	Profundidad		7,5 a 15 cm		
	0 a 7,5 cm		1	2	
R	0,86	0,54	0,66	0,59	
R ²	0,73	0,30	0,43	0,35	
Lambda	53,2	13,1	32,3	15,9	
p-valor	<0,0001	0,1	0,01	0,6	
<i>Variables asociadas a la agregación</i>		Coeficientes de las combinaciones lineales			
COT	-0,30	0,1	0,25	-0,1	
COP	0,37	0,3	0,86	0,2	
CHS	0,62	0,8	0,07	-1,0	
PSRG	0,07	-0,9	0,12	-0,1	
PSRG-FE	0,41	-0,9	0,17	0,1	
<i>Variables asociadas a la estabilidad de agregados</i>					
h-lenta	0,52	0,1	0,82	-0,7	
d-mecanica	0,35	-1,2	0,11	-0,2	
h-rapida	0,42	1,1	0,33	1,0	

En la profundidad 7,5 a 15 cm de suelo, la variable canónica generada determina una asociación significativa ($p < 0,01$) entre grupos estudiados. Dicha variable explicó el 43 % de la variancia total. El COP fue la fracción más influyente y determinó diferencias significativas ($p < 0,01$) en la variable canónica generada, lo que explica la relación entre ambos grupos estudiados. De este análisis se desprende que el COP fue la variable asociada a la agregación más influyente en la estabilidad de agregados la y que controló la desagregación por microfisuración evaluada mediante la humectación lenta por capilaridad. La expresión gráfica de la variable canónica (Figura 3.4) permite interpretar visualmente que la variación se presenta en gran parte por el efecto de tratamientos de LM que se agrupan diferenciados de los de SD. La CP no presentó relación con la variabilidad explicada en la profundidad de 7,5 a 15 cm.

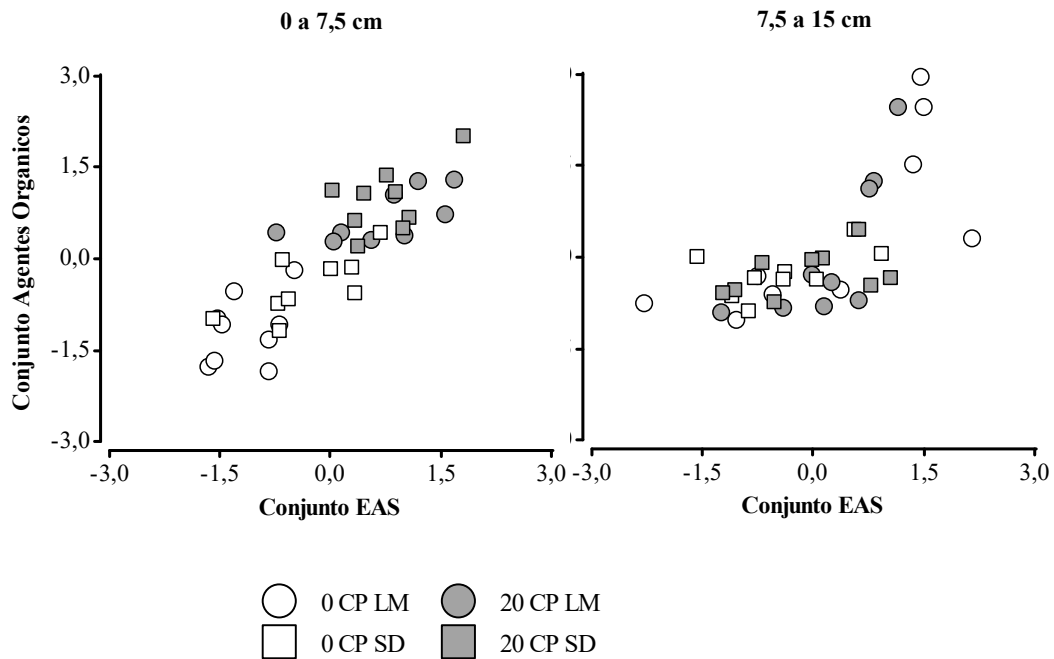


Figura 3.4: Distribución gráfica de variables canónicas significativas generadas para dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) al considerar dos conjuntos de variables del suelo (Agentes Orgánicos y la estabilidad de agregados)

3.4. Discusión

El análisis realizado en este capítulo permite reconocer que la CP incrementó la EAS (Tabla 3.3), el contenido de CHS, COP y COT (Figura 3.1). También se identificó que los dos primeros actuaron como agentes de agregación transitorios y temporales (Tabla 3.4). El incremento en COS por adición de enmiendas orgánicas fue reportado en varios trabajos en distintos tipos de suelo y ambientes (Kingery et al., 1994; Wood et al., 1996; Singh et al., 1996; Bolton et al., 2004; Gascho y Hubbard, 2006; Chang et al., 2008; F, Bowden et al., 2010; Watt et al., 2010) aunque la mayoría de ellos indican efectos a mediano y largo plazo, con dosis elevadas y aplicaciones sucesivas, por lo que se reportan cambios muy superiores a los dados en esta experiencia. Trabajos que analizan cantidades de CP equivalentes indican incrementos de 15 a 20 % del COT similares a los encontrados en este estudio (Figura 3.1)

(Rotondo et al, 2009; Adeli et al, 2016). Dos Passos (2015) reportaron que la adición de dosis menores a 9 Mg ha^{-1} no produjeron cambios en el COT en suelos de regiones tropicales. Sin embargo, otros trabajos que analizan los cambios en el COT y la EAS con el uso de CP indican que la enmienda mejora la EAS y demuestran relación lineal entre las dos variables del suelo (Foster, 2011; Li et al., 2011).

En esta experiencia, si bien COT y EAS presentan cambios positivos por el uso de CP (Tabla 3.4), no se encontró una relación significativa, cosa que si sucede con el COP y los CHS (Tabla 3.4). Cambardella y Elliot (1992) indican que COP se compone en su mayoría de restos vegetales, animales y hongos en diferentes grados de descomposición y que su dinámica depende fuertemente de la actividad biológica. Por otra parte, Oades (1992) expresa que esta fracción cumple un rol en los procesos bióticos de formación de agregados como agente temporal, es decir a mediano plazo. Los carbohidratos por su parte, también son fracciones de carbono que actúan de forma activa en la agregación (Liu et al., 2005), pero su degradación por parte de la actividad biótica es rápida, lo que determina que su función como agente de agregación sea corta. Además, su presencia es afectada por el tipo de residuo vegetal, enmienda y laboreo utilizado, lo que determina que su efecto sea muy dinámico (Mbah et al., 2005).

El uso de diferentes sistemas de labranzas no determinó cambios en la distribución del COT del suelo y de COP (Figura 3.1), ni en la EAS (Tabla 3.3). Sin embargo, Endale et al. (1999), en evaluaciones del uso de CP, encontraron que a largo plazo se presenta más COP cuando se realiza la práctica en siembra directa respecto a la labranza convencional. Otros trabajos que estudian el efecto de rastrojos en suelos franco limosos con y sin incorporación indican que el COP presenta incrementos importantes por dicho efecto y que eso favorece la agregación y la estabilidad estructural (Carrizo et al., 2015). También Novelli et al. (2013) y

Kraemer et al. (2021) demostraron que el COP es un componente importante que actúa como agente de agregación en suelos franco limosos, mientras que en suelos de textura arcillosa la EAS está más relacionada con factores de agregación abióticos. Bongiovani y Lobartini (2006) indicaron disminuciones de la proporción de macroagregados que presentan los suelos, en asociación a menores concentraciones de CHS que se generan en suelos bajo producción de maní con labranzas frecuentes. El sistema de la labranza, en esta experiencia, determina diferencias en CHS (Figura 3.1), con menor concentración en LM, y donde cambio relativo es de menor contundencia a los cambios ocurridos por efecto de la aplicación de CP. Varios autores indican que la actividad de los hongos micorrízicos arbusculares se encuentra significativamente asociada a la EAS (Wright y Upadhyaya, 1998; Carrizo et al., 2015, Breyner et al., 2020). Rakiya et al. (2015) reportaron que cuando la inoculación de la CP con hongo micorrízicos arbusculares y se aplicó al suelo a campo como enmienda en distintas dosis, se presentaron relaciones significativas entre incrementos de la presencia de PRGS-FE en suelo y los niveles de CP usados, pero no cuando se evaluó su comportamiento sin esta práctica. Los resultados de este trabajo corroboran los hallazgos de los autores, dado que la adición de CP se asoció a la actividad hongos micorrízicos arbusculares (PRGS-FE) y estos, de alguna forma, condicionaron la disgregación por estallido (Tabla 3.4) y la EAS (Tabla 3.5).

Estudios que analizaron el efecto de la adición de cascarilla de arroz como enmienda orgánica, uno de los componentes de la CP, en dosis de 10 Mg ha^{-1} , determinaron efectos aglutinantes del suelo mediante la actividad de CHS y demostraron incrementos importantes de la EAS luego de un período de 12 meses (Adesodun et al., 2001). Estos autores también determinaron que los CHS provenientes de dicho residuo presentaron 35% de disminución durante dicho período. Estos resultados sugieren que, en este trabajo, gran parte de la

actividad agregante de la CP, que determina mejoras en EAS, es atribuible a uno de sus componentes, como los residuos de molienda de arroz (*Oryza sativa*) presentes en la CP.

La EAS presentó modificaciones ante el uso de SFC en dosis crecientes, lo que concuerda con información reportada sobre el incremento en la EAS al usar SFC como enmienda (Lehrsch et al., 1993; Jian Yu et al., 2003; Blum et al., 2011). Algunos trabajos encontraron una relación aditiva entre materiales orgánicos e inorgánicos (Muneer y Oades, 1989; Salgado et al., 2014). Contrariamente, en esta experiencia no se determinaron efectos de ese tipo en la EAS. Es posible que el elevado contenido de Ca^{2+} de la CP (Tabla 2.2) haya determinado que no se presenten efectos aditivos, pero sí efectos lineales simples para cada enmienda.

3.5. Conclusión

La aplicación de cama de pollo afectó diferencialmente las variables estudiadas en el corto plazo. Los contenidos de carbono aumentaron, especialmente en las fracciones dinámicas y transitorias como los carbohidratos del suelo, aunque también mejoró el contenido de carbono orgánico particulado. Estas fracciones, especialmente el carbono orgánico particulado, si condicionaron los procesos de agregación, comprobándose su efecto positivo sobre EAS, disminuyendo los procesos de estallido, microfisuración y ruptura mecánica. Dichos efectos se verificaron independientemente del sistema de labranza utilizado. La adición de sulfato de calcio si ejerció un efecto positivo sobre la EAS debido al efecto agregante del Ca, aunque solo en la capa superficial del suelo. No se verificó interacción entre las enmiendas en las dosis y sistemas de labranzas estudiados respecto de las variables analizadas. Los resultados demuestran que la adición a ambas enmiendas son una alternativa válida para mejorar la agregación del suelo, por lo tanto, que la hipótesis 1 planteada concuerda con los datos empíricos relevados.

Capítulo 4

Efecto de cationes y acidez en la agregación del suelo
enmendado con cama de pollo y sulfato de calcio

4.1. Introducción

La fracción granulométrica del suelo con diámetro de partícula $< 2 \mu\text{m}$ (arcillas, sesquióxidos) y la composición de la fracción orgánica determinan la densidad de cargas eléctricas (tipo y número de posiciones de intercambio, CIC) en suelos de la llanura chaco-pampeana (Morras, 1995; Hepper et al., 2005; Martínez et al., 2008; Irrutti et al., 2011). En los suelos derivados de loess, la acción climática es un proceso formador de suelos muy importante, donde las temperaturas y el contenido de arcilla condicionan los contenidos de la materia orgánica aumenta y precipitaciones y la evapotranspiración afectan los contenidos de arcilla (Álvarez y Lavado, 1998). Ambas fracciones coloidales (arcillas y compuestos orgánicos) compensan sus cargas electronegativas mediante enlaces con cationes como calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), principalmente (Jakobsen 1993; Vázquez 2009; Crispin et al., 2011; Kloster y Avena, 2015). Estas bases bivalentes favorecen la floculación del suelo, la formación de complejos organo-minerales y de una estructura adecuada (Martínez et al., 2008; Kloster y Avena, 2015). Varios autores han indicado que la pérdida de bases por lixiviación sumado a la falta de restitución de las bases extraídas por los cultivos por medio de enmiendas calcáreas, debilitan la estructura del suelo (Vázquez et al., 2009; Irrutti et al., 2011).

La concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} es afectada por factores que causan meteorización, como las variaciones de temperatura y las precipitaciones (Vázquez et al., 2009; Millán et al., 2010; Irrutti et al., 2011). En zonas de clima tropical y subtropical los procesos más intensos de meteorización producen la solubilización y el lavado de las bases que son reemplazadas por H^+ y AlOH^+ (producto de hidrólisis del Al^{3+}), lo que incrementa los procesos de acidificación (descenso de pH) de los suelos (Millán et al., 2010).

La concentración de cationes intercambiables también puede ser alterada por factores de manejo como el uso de enmiendas como carbonatos, dolomitas y yeso, que se utilizan para reponer y balancear las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} . El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) posee la capacidad de solubilizarse de forma rápida en el suelo e incrementar la disponibilidad de Ca^{2+} y SO_4^{2-} . Aplicado a la superficie del suelo incrementa la concentración de electrolitos en el agua de lluvia, lo que mejora su infiltración en el suelo (Favaretto et al., 2006). Con dosis mayores a 3 Mg ha^{-1} se han reportado incrementos significativos y lineales del contenido de sulfatos (SO_4^{2-}), que superan los 0,8 metros de profundidad (Ponette et al., 1996; Zambrosi et al., 2007; Blum et al., 2011). Dicha propiedad lo convierte en un producto correctivo interesante para utilizar en sistemas sin remoción como pasturas perennes y siembra directa (Caires et al., 2008; Vieira Fontoura et al., 2019).

Por otro lado, el incremento en los niveles intercambiables de Ca^{2+} puede producir la formación y migración de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ con la reducción de los iones hidronios y el incremento del pH (Blum et al., 2011). El ascenso de pH también puede darse por neutralización del Al^{3+} (Blum et al., 2011), aunque este proceso parece ser poco importante en suelos franco limosos pampeanos (Millán et al., 2010).

Varios autores han demostrado que el sulfato de calcio, en dosis mayores a 1 Mg ha^{-1} , favoreció la unión de las partículas y la formación de agregados, lo que contribuyó a disminuir la pérdida de suelo y nutrientes durante eventos climáticos intensos (Jian Yu et al., 2003; Feltron et al., 2004; Favaretto et al., 2008). A pesar de estos aspectos positivos, algunos estudios demostraron que el empleo de grandes cantidades de sulfato de calcio puede favorecer la pérdida de nutrientes, debido a su movimiento en profundidad, por ej. de Mg^{2+} (Sumner, 1990; Zambrosi et al., 2007; Blum et al., 2011) y la ocurrencia de otros procesos que dependen de cada suelo, en particular del pH (Millán et al., 2010).

Otro tipo de recursos pueden ser utilizados para aportar nutrientes, como los abonos orgánicos. En este sentido, un abono que presenta alta concentración de bases es la cama de pollo (CP), por lo cual puede ser de gran utilidad en los sistemas agrícolas (Gascho et al., 2001; Pitta et al., 2012; Dos Passos et al., 2015). Sin embargo, su concentración elevada de iones calcio, potasio y sodio también puede generar desbalances catiónicos en los suelos. La utilización de CP puede determinar en el largo plazo, alteraciones positivas en pH del suelo, tanto en ácidos como en alcalinos (He et al., 1998; Naramabuye y Haynes, 2005; Dos Passos et al., 2015, Masud et al., 2020). La alteración positiva puede acentuarse en relación a aumentos en la composición de sodio de la CP (Haynes y Naidu, 1998).

Por otro lado, Del Pino et al. (2008) mencionan que, en el corto plazo, la adición de CP genera acidificación en suelos franco limosos, como consecuencia de la transformación del N-NH_4^+ durante el proceso de nitrificación, llevado a cabo por organismos biológicos específicos, donde se produce la liberación de H^+ . De este modo, existe gran controversia respecto a la influencia de la CP sobre el pH, la que posiblemente se debe a las diferencias de composición del abono, tiempo de evaluación y granulometría del suelo (López-Masquera et al., 2008; Dikinya y Mufwanzala, 2010, Masud et al., 2020).

Dikinya y Mufwanzala (2010) indicaron además que las tasas de cambio del pH varían en función de las cantidades de abono adicionadas. El aumento del pH fue asociado al intercambio de iones que ocurre cuando los OH^- de la fracción coloidal son sustituidos por aniones orgánicos, como citrato y malato, que son generados durante la descomposición del abono (Pocknee y Summer, 1997). Por otro lado, la capacidad de alterar el pH también fue atribuida a la presencia de cationes en la cama de pollo que son liberados durante el proceso de descarboxilación microbiana (Natsher y Schwetnmann, 1991).

A pesar de que la CP ha sido muy utilizada como enmienda orgánica para sustituir los fertilizantes en sistemas intensivos, y que es recomendada como una práctica viable para los cultivos extensivos (Maisonnave et al., 2017), que aumenta la productividad (De Battista y Arias, 2016) y genera retornos a la inversión importantes (Ré y Ferrel, 2016), como así también, que presenta un uso frecuente como abono en la zona de estudio y su disponibilidad va en aumento (Ybran et. al., 2018), su uso como agente mejorador de las condiciones físico-químicas del suelo en sistemas extensivos sin remoción del suelo (siembra directa, SD) aún no ha sido valorado, menos aún en áreas de ambiente subtropical. Se ha mencionado que, en estos ambientes, las prácticas de manejo que contribuyen a mantener y/o elevar los niveles del carbono orgánico del suelo (COS), por ejemplo, la SD, son precisamente las que confieren al suelo una mejor estructuración, de allí su relevancia (Pilatti y De Orellana, 1994; Bayer et al., 2009). Sin embargo, los resultados de prácticas de manejo en la zona norte de Santa Fe suelen diferir de los encontrados en otras zonas, probablemente debido a las diferencias existentes en la combinación cultivos-clima-suelo (Paytas et al., 2005; Mieres y Zuil, 2011; Zuil, 2011).

Específicamente para esta región el uso de CP como enmienda puede ser considerada una alternativa promisoriosa debido a sus características y disponibilidad (Ybran et. al., 2018). Sin embargo, dicho material posee generalmente un pH > 8 y contenidos elevados de sales de sodio. Por esta razón, la aplicación de grandes cantidades por unidad de superficie, en áreas con temperaturas y precipitaciones elevadas, podría generar variaciones importantes en el pH del suelo y pérdidas de nutrientes por lavado y/o volatilización. Su uso, por lo tanto, debería contemplar el empleo de técnicas que ayuden a mantener el pH en niveles adecuados y que favorezcan los procesos de agregación del suelo. El sulfato de calcio (SFC), que posee mayor solubilidad en el suelo en comparación con otras enmiendas inorgánicas ha sido

utilizado para estos fines con resultados satisfactorios (Blum et al., 2011, Gabioud et al., 2020, Barbieri et. al., 2023), aunque se el cambio positivo de pH podría ser de poca importancia (Millán et al., 2010)

La información mencionada sugiere que ambas prácticas tecnológicas (adición de CP y de yeso) podrían cumplir un rol activo en mejorar la fertilidad química y también la estructuración y estabilización del suelo y, por lo tanto, podrían ser una herramienta importante para mejorar la calidad físico-química de los suelos en ambientes subtropicales. Sin embargo, la mayoría de la información disponible versa sobre el efecto de dichos materiales sobre la agregación para suelos francos a franco-limosos utilizados con cultivos intensivos en la región pampeana templada, con régimen térmico y pluviométrico menor al verificado en el norte de Santa Fe (Rotondo et al., 2009). Tampoco se conoce la influencia de la aplicación de cantidades elevadas de sulfato de calcio sobre la dinámica de las otras bases intercambiables, sustancias orgánicas y pH del suelo en Argiudoles cultivados con y sin remoción en zonas de clima subtropical. Por lo tanto, aún es necesario determinar cómo es afectado el proceso de estructuración del suelo cuando cama de pollo y sulfato de calcio se aplican conjuntamente.

Con base en los antecedentes, el objetivo de este capítulo es caracterizar la dinámica de los cationes intercambiables y pH, cuando diversas cantidades de CP y yeso son adicionadas al suelo por medio de distintos sistemas de labranza y verificar la relación de esa dinámica con la agregación de suelo. La hipótesis que se sostiene es que la adición combinada de cama de pollo y sulfato de calcio contribuye positivamente a la calidad estructural y fertilidad química del suelo, sin que ocurra alteración del pH ni pérdida de nutrientes (Mg) por lixiviación, independientemente del sistema de labranza usado.

4.2. Materiales y Métodos

4.2.1. Determinaciones de capacidad de intercambio catiónico y bases del suelo

Se consideraron dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) para determinar la capacidad de intercambio catiónico (CIC), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+) intercambiable, mediante la extracción con acetato de amonio 1N pH 7. La valoración de CIC, se realizó mediante determinación del amonio por destilación Kjeldahl, Ca^{2+} y Mg^{2+} por complejometría con EDTA, Na^+ y K^+ por fotometría de llama (SAMPLA, 2004) [meq 100 g^{-1} suelo]. A partir de los datos se calculó la insaturación del suelo (IS), como la diferencia entre la CIC y la suma de bases intercambiables (Vázquez, 2005). También se calculó la relación entre calcio/magnesio intercambiable ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) y la relación potasio/magnesio intercambiable ($\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$).

4.2.2. Determinaciones de acidez del suelo

Sobre las muestras se determinó el pH en agua (relación 1:2,5) y el pH potencial en solución de suelo con KCl 1N, relación 1:2,5 (SAMPLA SAGPyA, 2004).

4.2.3. Estabilidad de agregados

La determinación de la estabilidad de agregados de suelo (EAS) se realizó como lo propuso Le bissonnaiss (1996), y tanto la metodología de su determinación como la información fue reportada en capítulo 3. Este capítulo utiliza la información ya presentada para establecer relaciones con capacidad de intercambio catiónico y bases del suelo.

4.2.4. Análisis de la información.

La información se analizó mediante la técnica de análisis de las varianzas con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2015). Se estimó la contribución relativa de los efectos de los factores cama de pollos (CP), sulfato de calcio (SFC) y labranzas y su interacción. Posteriormente se realizaron pruebas de comparación de medias LSD Fischer (α : 0,05). La

relación entre variables se estudió mediante correlación de Pearson (Conover, 1999) y se realizó análisis de correlaciones canónicas (Johnson y Wichern, 1998) entre conjuntos de variables que actúan como factores abióticos de agregación o desagregación (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) y la acidez (pH y pH potencial) y variables que conforman el grupo EAS (h-lenta, h-rápida, d-mecánica), con análisis de la contribución de los grupos para explicación de la variabilidad que presentan los datos. Para analizar la relación de los tratamientos con los resultados de las variables canónicas significativas, se generaron gráficos de distribución de las variables (Balzarini et al., 2015), y se segregó la dispersión de los datos según los tratamientos como categorías

4.3 Resultados

4.3.1. Cambios en los cationes del suelo

4.3.1.1 Cama de pollo y labranza

El análisis de la varianza realizado sobre las bases intercambiables del suelo, en los factores estudiados, CP (cama de pollo), SFC (sulfato de calcio) y labranzas (siembra directa: SD; labranza mínima: LM) indicó que no se presentaron interacciones significativas entre factores para la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los cationes calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+), por lo que se realizó análisis simples de tratamientos para cada factor (Di Rienzo et al., 2015).

La cama de pollo (CP) no alteró la CIC del suelo. Los valores entre tratamientos fueron similares, con medias de 12,3 meq 100 g⁻¹ de 0 a 7,5 cm de profundidad y 12,8 meq 100 g⁻¹ de 7,5 a 15 cm.

La concentración de Ca^{2+} aumentó significativamente en ambas profundidades ($p < 0,005$ y $p < 0,04$, respectivamente) por efecto de la aplicación de CP. De 0 a 7,5 cm de profundidad, el Ca^{2+} aumentó un 10 % (Figura 4.1), mientras que de 7,5 a 15 cm aumentó 7%, respecto de los tratamientos sin CP. El K^+ se incrementó un 66 % ($p < 0,0001$) en la capa superficial al aplicar CP, mientras que, de 7,5 a 15 cm, se incrementó 50 % ($p < 0,0001$) por adición de CP. El contenido de Na^+ no se modificó en la capa de suelo superficial, pero si aumentó significativamente ($p < 0,002$) de 7,5 a 15 cm (76 %) por efecto de la aplicación de CP. Similarmente, el contenido de Mg^{2+} tampoco se alteró en la capa superficial, pero aumentó significativamente ($p < 0,03$) de 7,5 a 15 cm (18 %) por la aplicación de CP.

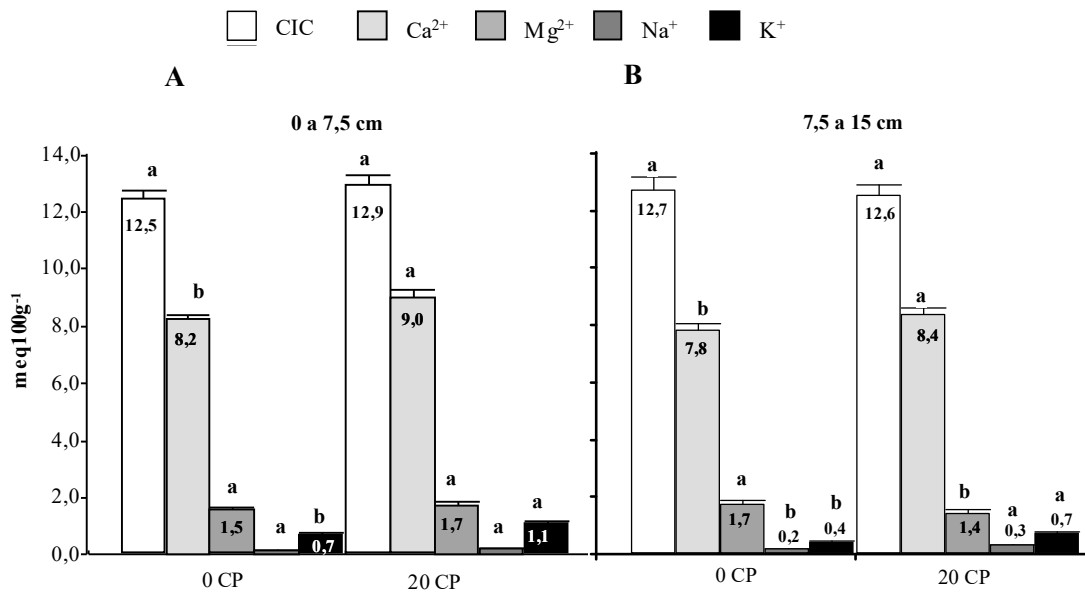


Figura 4.1: Valores medios de contenidos intercambiables de calcio (Ca^{2+} ; barra gris claro), magnesio (Mg^{2+} ; barra gris medio) potasio (K^+ ; barra negra) y sodio (Na^+ ; barra gris oscuro) del suelo, junto a capacidad de intercambio de cationes (CIC; barra en blanco) en tratamientos de abonado de suelos con cama de pollo en suelo franco limoso, donde se consideró la profundidad 0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm de suelo. Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para cada variable. Test LSD Fischer ($\alpha: 0,05$). Las barras indican el error estándar de la media.

La labranza determinó cambios significativos ($p < 0,0001$) en el contenido de K^+ a nivel superficial, pero no afectó las otras bases estudiadas. En SD el contenido de K^+ fue $0,2 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$, 25 % mayor que en LM.

Cuando se consideraron las concentraciones de cationes de forma relativa a la CIC en la profundidad 0 a 7,5 cm, el K^+ presentó variaciones significativas ($p < 0,002$) ante el uso de CP, donde se incrementó de 6 a 9 %. De 7,5 a 15 cm, también se presentaron incrementos significativos ($p < 0,008$) de 3 a 6 %. El Ca^{2+} presentó, tanto en la superficie como en la profundidad 7,5 a 15 cm, incrementos significativos ($p < 0,048$; $p < 0,02$) de 66% a 69% y de 62 a 67 %, respectivamente, por el uso de CP. Otra de las bases que cambió significativamente ($p < 0,04$) fue el Mg^{2+} , que disminuyó de 13 a 11 % en la profundidad 7,5 a 15 cm.

La insaturación (IS), que se determinó como la diferencia entre la CIC y la suma de las cuatro bases, presentó diferencias significativas tanto de 0 a 7,5 cm ($p < 0,004$) como de 7,5 a 15 cm ($p < 0,04$), disminuyendo en suelos tratados con CP de 15 a 8 % y de 20 a 14 % (Figura 4.2). Finalmente, ante las condiciones de labranza evaluadas, la IS no registró modificaciones significativas.

Los valores de la relación entre bases intercambiables calcio/magnesio (Ca^{2+}/Mg^{2+}) fueron similar para todos los factores en estudio. La media fue 5,7 de 0 a 7,5 de profundidad y 6,2 de 7,5 a 15 cm (Tabla 4.1). Los valores de la relación entre bases intercambiables calcio/magnesio (Ca^{2+}/Mg^{2+}) fueron similar para todos los factores en estudio. La media fue 5,7 de 0 a 7,5 de profundidad y 6,2 de 7,5 a 15 cm (Tabla 4.1).

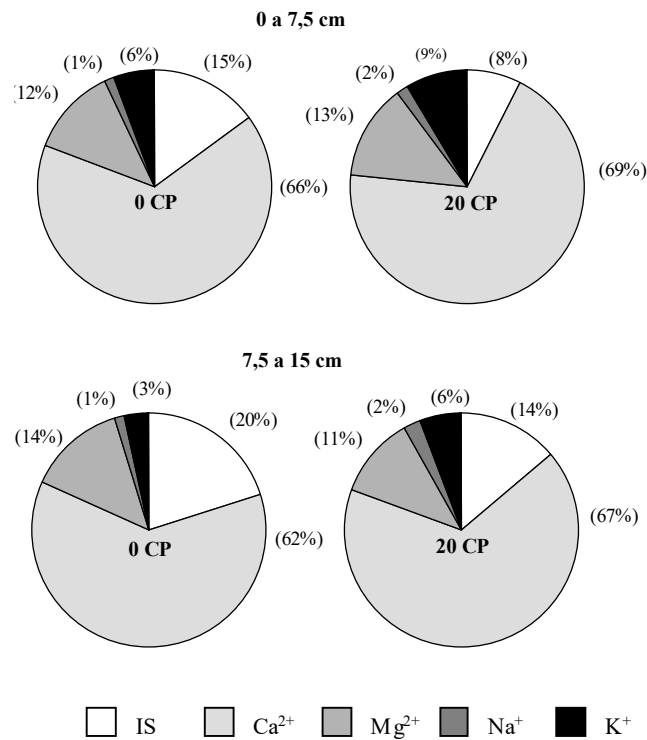


Figura 4.2: Contenidos relativos de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+) y la instauración (IS) de la capacidad de intercambio catiónico, en suelos tratados con dos dosis de cama de pollos (0 CP y 20 CP) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm)

La relación $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$, presentó diferencias significativas de 0 a 7,5 cm ($p < 0,006$) y 7,5 a 15 cm ($p < 0,001$) ante tratamientos con CP (Tabla 4.1). Las medias de $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ a nivel superficial fueron 0,68 para suelo con CP y 0,46 sin tratamiento. De 7,5 a 15 cm de profundidad, la relación $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ fue 0,59 ante el uso de CP y 0,33 sin CP. Por otra parte, el factor labranza también determinó diferencias ($p < 0,001$) en la relación $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ en la profundidad 0 a 7,5 cm. Fue mayor en SD (0,67) respecto a LM (0,47). También la relación $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{K}^+$ presentó cambios significativos ($p < 0,0001$) de 0 a 7,5 cm de profundidad y de 7,5 a 15 cm ($p < 0,004$) por el uso de CP. Disminuyó de 16 a 10,4 en superficie y de 22,6 a 14,7 en profundidad.

Tabla 4.1: Valores medios de la relación entre bases intercambiables $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ y $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ en suelos tratados con cama de pollo (CP), labranza (SD y LM) y yeso (SFC), en dos profundidades (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) de un suelo franco limoso. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para cada variable. Test LSD Fischer (α : 0,05).

Tratamiento	$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ rel 1:1		$\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ rel 1:1		$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ rel 1:1	
	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm
	CP 0	5,54 a	5,42 a	0,46 a	0,33 a	16,0 b
CP 20 Mg ha^{-1}	5,81 a	6,86 a	0,68 b	0,59 b	10,4 a	14,7 a
SFC 0	5,51 a	6,60 a	0,57 a	0,52 a	12,3 a	17,2 a
SFC 0,8 Mg ha^{-1}	5,53 a	6,30 a	0,58 a	0,41 a	12,6 a	18,4 a
SFC 1,6 Mg ha^{-1}	6,30 a	5,50 a	0,58 a	0,45 a	14,4 a	20,5 a
LM	5,51 a	5,81 a	0,47 a	0,41 a	14,9 b	18,5 a
SD	5,91 a	6,47 a	0,67 b	0,51 a	11,2 a	18,6 a
<i>Fuente Variación</i>						
CP	ns	ns	**	***	***	**
SFC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Labranza	ns	ns	**	ns	**	ns
CP*SFC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP*SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns

4.3.1.2 Sulfato de calcio

La utilización de sulfato de calcio (SFC) modificó significativamente ($p < 0,04$) el contenido de Ca^{2+} en la profundidad 0 a 7,5 cm de suelo (Figura 4.3). El suelo presentó un contenido mayor (8 %) cuando se utilizó SFC a razón de 1,6 Mg ha^{-1} , respecto de 0 y 0,8 Mg ha^{-1} (Figura 4.1). Su adición no generó modificación de contenido de Mg^{2+} , K^+ y Na^+ en las profundidades evaluadas, como tampoco alteró la IS. El SFC no determinó cambios en la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ y $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ (Tabla 4.1).

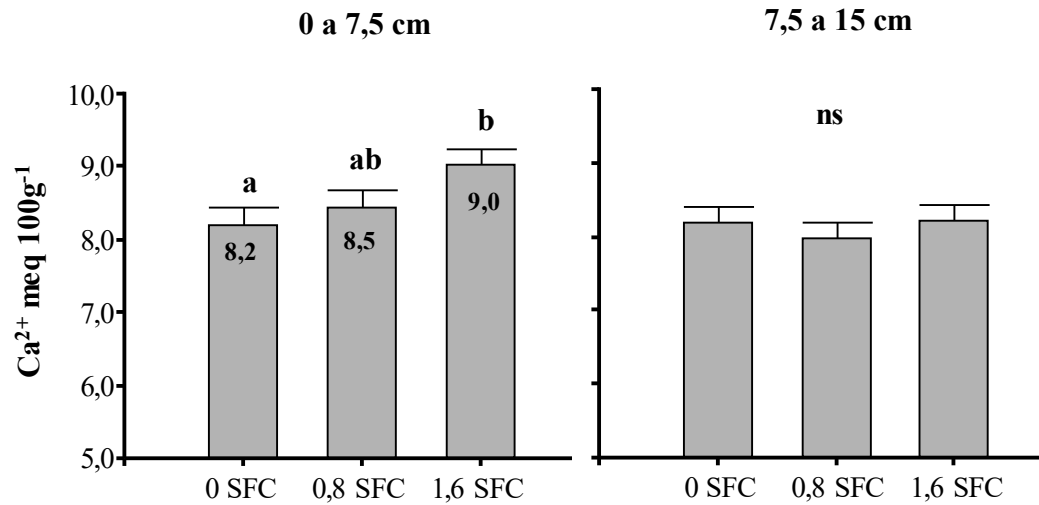


Figura 4.3: Contenidos intercambiables de calcio (Ca^{2+}) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) ante tres dosis de sulfato de calcio (SFC). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Test de LSD de Fisher (α : 0,05). Las barras indican el error estándar de la media.

4.3.2 Acidez del suelo

La concentración de iones hidrógeno del suelo (pH) bajo estudio en general presentó valores moderados a levemente ácidos. El análisis de la varianza indicó que las interacciones no fueron significativas entre los factores de los tratamientos estudiados (CP, SFC y Labranzas), por lo cual se realizó análisis de los factores de forma individual. Como se visualiza en la Tabla 4.2, la aplicación de CP generó cambios significativos ($p \leq 0,0001$) del pH en la profundidad 0 a 7,5 cm. Lo mismo sucedió en la profundidad 7,5 a 15 cm ($p \leq 0,0001$). El descenso medio de pH actual fue 0,22 y 0,19 en ambas profundidades cuando se aplicó CP a razón de 20 Mg ha^{-1} . Por otra parte, el no laboreo (SD) también determinó variaciones significativas ($p < 0,01$) del pH en la profundidad 0 a 7,5 cm; LM disminuyó el pH en 0,09 puntos respecto a mantener el suelo en SD. En la figura 4.4 puede observarse la variación de pH para dos dosis cama de pollos (0 y 20 Mg ha^{-1}) en función de distintos sistemas de labranza.

Tabla 4.2: Análisis de varianza y comparación de medias de tratamientos de cama de pollo, labranza y yeso sobre suelo franco limoso, del potencial hidrógeno del suelo (pH), el potencial hidrogeno potencial (pH potencial) en dos profundidades de suelo. Letras distintas indican diferencias significativas entre medias del factor según test LSD de Fisher (α : 0,05). * indica diferencias significativas $p < 0,05$; ** indica diferencias significativas $p < 0,01$; *** indica diferencias significativas $p < 0,001$, ns indica diferencias no significativas.

<i>Tratamiento</i>	pH		pH potencial	
	<i>rel 1:2,5</i>		<i>rel 1:2,5</i>	
	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm
CP 0	5,88 a	5,87 a	5,31 a	5,19 a
CP 20 Mg ha ⁻¹	5,66 b	5,68 b	5,29 a	5,18 a
SFC 0	5,80 a	5,85 a	5,30 a	5,21 a
SFC 0,8 Mg ha ⁻¹	5,76 a	5,74 b	5,30 a	5,16 a
SFC 1,6 Mg ha ⁻¹	5,76 a	5,73 b	5,30 a	5,19 a
SD	5,82 a	5,80 a	5,36 a	5,18 a
LM	5,73 b	5,75 a	5,24 b	5,19 a
<i>Fuente Variación</i>				
CP	***	***	ns	ns
SFC	ns	**	ns	ns
Labranza	**	ns	**	ns
CP*SFC	ns	ns	ns	ns
CP*Labranza	ns	ns	ns	ns
SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns
CP*SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns

En la profundidad 7,5 a 15 cm la labranza no ocasionó cambios significativos de pH. La utilización de distintas dosis de SFC no alteró el pH de suelo en ambas profundidades estudiadas.

La acidez intercambiable evaluada mediante el pH potencial, analizada en solución de cloruro de potasio, mostró que la concentración de iones hidrógeno adsorbidos en el complejo de intercambio fue similar entre tratamientos CP y SFC estudiados. En cambio, la

labranza modificó de manera significativa ($p < 0,01$) el pH potencial, con una ligera disminución (3 %) en LM respecto de SD.

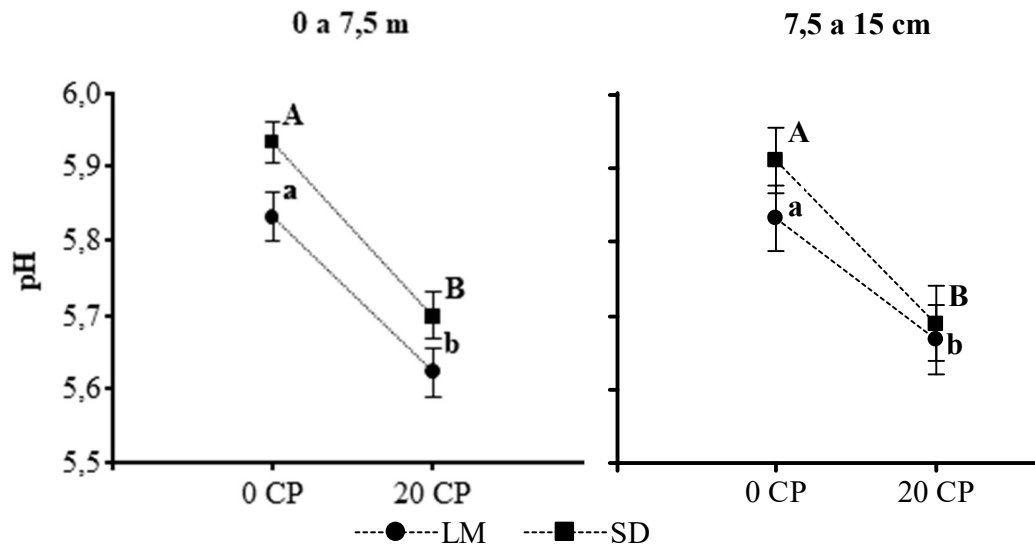


Figura 4.4: Potencial hidrógeno (pH) de suelo franco limoso cuando se utilizó dos dosis de cama de pollo (0 CP y 20 CP) en suelos con labranza mínima (LM, círculos) y en siembra directa (SD, cuadrados) en la profundidad 0 a 7,5 cm y 7,5 a 15 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre medias según test LSD ($\alpha: 0,05$) para el factor CP. Las barras indican el error estándar de la media.

4.3.3. Relación entre acidez y cationes del suelo

Los valores de pH del suelo (tabla 4.1) en la profundidad 0 a 7,5 cm presentaron correlación significativa ($p < 0,002$) y positiva con el pH potencial cuando no se efectuó aplicación de enmienda (0 CP), mientras que, con los cationes, no se pudieron establecer relaciones significativas (Tabla 4.3). En suelos tratados con la enmienda (20 CP), el pH no presentó relación con el pH potencial, como así tampoco hubo asociación con los cationes de suelo. En la profundidad 7,5 a 15 cm, el pH correlacionó de forma significativa y positiva con el pH potencial en tratamientos sin enmienda (0 CP; $p < 0,002$) como así también en tratamientos

con cama de pollos (20 CP; $p < 0,03$). El pH en esta profundidad se asoció de forma significativa ($p < 0,002$) y negativa con el Mg^{2+} en tratamientos con cama de pollo (20 CP).

Tabla 4.3: Coeficientes de correlación de Pearson, entre el pH y las variables pH potencial, bases intercambiables calcio (Ca^{2+}) magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+), estudiadas en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) en tratamientos con 20 Mg ha⁻¹ de cama de pollo (20 CP) y sin enmienda (0 CP). * indica diferencias significativas ($p < 0,001$).

Profundidad	Tratamiento	Variable	pH potencial	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
Coeficientes de Pearson							
0 a 7,5 cm	0 CP	pH	0,67*	0,05	0,18	0,05	-0,27
	20 CP	pH	0,22	-0,30	-0,24	0,33	-0,16
7,5 a 15 cm	0 CP	pH	0,68*	0,34	-0,39	0,21	-0,25
	20 CP	pH	0,52*	0,36	-0,68*	0,39	-0,13

4.3.4. Relación entre cationes, acidez y estabilidad de agregados.

Los resultados análisis de correlación canónica entre variables asociadas al tamaño de agregados (h-lenta, d-mecánica, h-rápida y EAS) expuestos en capítulo 3 (Tabla 3.3), de variables abióticas CIC, IS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , y variables de acidez, pH y pH potencial (Tabla 4.4), que pueden influenciar o asociarse a procesos de agregación del suelo, indicaron que, en la profundidad 0 a 7,5 cm, se estableció una primera variable canónica (1) con correlación significativa ($p < 0,01$) entre ambos grupos, que explicó el 62% de la variabilidad total (R^2). El K^+ fue la variable destacada por el análisis como más influyentes ($p < 0,01$) dentro del grupo de variables abióticas-acidez estudiado. La primera variable canónica (1) permitió verificar una separación de los datos provenientes de SD respecto de LM (Figura 4.5) en gráfico de dispersión. La segunda variable canónica (2) para la profundidad 0 a 7,5 cm no indicó diferencias significativas entre ambos grupos. Este análisis permitió considerar que K^+ fue muy influyente en la estabilidad de agregados y que incidió de forma positiva sobre la menor desagregación por microfisuración, estudiada mediante humectación lenta

por capilaridad. También el K^+ tuvo relación positiva sobre la menor desagregación por estallido que se evaluó mediante la humectación rápida.

Tabla 4.4: Relación canónica entre variables cationes y acidez de suelo y variables asociadas a estabilidad estructural de agregados, en dos profundidades de suelo estudiadas. Coeficiente de correlación canónica (R), proporción de la variancia total explicada por cada variable canónica (R^2), estadístico (Lambda) y niveles de probabilidad (p-valor) asociados a la prueba (Infostat, 2015)

Variable canónica	Profundidad 0 a 7,5 cm		Profundidad 7,5 a 15 cm		
	1	2	1	2	
R	0,78	0,54	0,83	0,45	
R^2	0,61	0,29	0,70	0,20	
Lambda	39,00	12,20	43,00	8,50	
p-valor	0,01	0,49	0,003	0,74	
<i>Variables Abióticas-Acidez</i>		<i>Coefficientes de las combinaciones lineales</i>			
Ca^{++}	0,05	0,60	0,47	-0,15	
Mg^{++}	0,22	-0,48	0,55	0,40	
Na^{++}	-0,14	-0,42	0,33	0,08	
K^+	0,61	0,76	-0,05	-0,78	
IS	-0,29	-0,15	-0,28	-0,30	
pH actual	-0,37	1,02	-0,80	0,37	
pH pot.	0,08	-0,54	-0,33	0,57	
<i>Variables EAS</i>					
h-rápida	0,53	-0,48	-0,67	0,60	
h-lenta	0,62	-0,64	-0,33	0,33	
d-mecánica	0,13	1,28	-0,98	0,50	

En la profundidad 7,5 a 15 cm de suelo el estudio de correlación canónica, también presentó una primera variable canónica (1) con asociación significativa ($p < 0,005$) entre los grupos estudiados (Tabla 4.4). Dicha variable canónica explicó el 70 % de la variancia total (R^2). En este caso, las variables pH, Mg^{2+} y Ca^{2+} fueron las más determinantes en la relación con la estabilidad de agregados. El pH se relacionó de forma negativa, mientras que Mg^{2+} y Ca^{2+} incidieron de forma positiva. El análisis permite interpretar que, estas tres variables condicionaron de manera importante a los agregados expuestos a desagregación mecánica y estallido. A diferencia de la profundidad superficial, la dispersión grafica la profundidad 7,5

Blum et al., 2011). Las dosis de SFC utilizadas no modificaron el Mg^{2+} en las profundidades evaluadas, contrariamente a lo alertado para ambientes tropicales en los que se asoció la migración en profundidad de este catión con la adición de SFC (Felton et al., 2004; Caines et al., 2006). Sin embargo, el Mg^{2+} disminuyó por el uso de CP, al igual que la instauración del suelo, mientras se incrementó el Ca^{2+} y K^+ . El hecho de que la CP contiene menor cantidad de magnesio en relación a calcio y potasio, probablemente influyó en el resultado descendente del Mg^{2+} (Tabla 4.2). El cambio ocasionado no afectó la relación Ca^{2+}/Mg^{2+} del suelo y los valores fueron inferiores a 10/1 indicados como límite crítico en la disponibilidad de magnesio para los cultivos (Havlin et al., 2005). Por otra parte, el ingreso de Mg^{2+} en el sistema radicular de los cultivos podría ser desfavorecido por efectos antagónicos productos del desbalance de este catión ante el aumento de K^+ (Jakobsen, 1993; Vázquez, 2006). Como consecuencia del uso de CP, que generó un incremento de K^+ , se presentaron cambios importantes en la relación K^+/Mg^{2+} a corto plazo (Tabla 4.2), pero los valores fueron inferiores a los reportados como críticos (Ohno y Grunes, 1985; Jakobsen, 1993). Respecto a la disponibilidad adecuada de K^+ , que depende no solo de su valor absoluto sino relativo a Ca^{2+} y Mg^{2+} (Vázquez, 2005), se presentaron valores superiores a los críticos (15) en la relación $Ca^{2+} + Mg^{2+} / K^+$ donde no se aplicó CP, indicando contenidos inadecuados en ambas profundidades para la nutrición potásica de cultivos (Sainz Rosas et al., 2013). Esta situación fue claramente revertida en suelos tratados con CP (Figura 4.1). Esto permite comprender que, a corto plazo, los efectos del uso de la enmienda orgánica determinan mejoras en el balance catiónico de suelos con bajos niveles de K.

Otro de los iones estudiados a nivel intercambiable del suelo fue el H^+ mediante pH potencial, que no presentó cambios. Sin embargo, en la solución del suelo en ambas profundidades se verificó acidificación del suelo por uso de CP. Este hallazgo no coincide

con lo reportado por Dikinya y Mufwanzala (2010) que indicaron ascensos de pH, pero debe destacarse que estos autores realizaron las evaluaciones en un plazo mayor. De igual manera, ante el tratamiento con SFC en la profundidad 7,5 a 15 cm el pH descendió; es decir, se observó mayor contenido de H^+ disponible, pero no intercambiable. Estos resultados concuerdan con los de Millán (2010). Este autor menciona que el SO_4^{2-} derivado de la aplicación de SFC puede generar Al^{3+} amorfo y liberar iones H^+ que, si no son neutralizados, podrían producir una disminución de pH menor o igual a 0,3 unidades. Cabe destacar que en la mencionada profundidad no se presentó interacción significativa para el pH ($p < 0,085$), entre los efectos de CP y SFC.

El pH en tratamientos con CP presentó asociación significativa negativa ($p < 0,002$; Coef. Corr. Pearson = -0,68) con la concentración Mg^{2+} en la profundidad 7,5 a 15 cm. Este metal no varió en contenidos totales por los tratamientos, pero si descendió en su concentración relativa a la CIC y a otros metales. Sin bien la concentración relativa a la CIC no permitió explicar el descenso del pH dado a corto plazo, es importante destacar que suelos franco limosos tratados con CP, que contienen concentraciones minoritarias de Mg^{2+} en relación a otras bases, podrían generar desbalances que repercutan en el proceso de acidificación. Otras variables evaluadas en el capítulo 3, como los carbohidratos solubles (CHS) presentaron una relación positiva con el pH superficial (Coef. Corr. Pearson = 0,74). Esta fracción de carbono presentó importante variación porcentual y los CHS están relacionados a la degradación biológica de compuestos, por lo que la acidificación superficial dada por la aplicación de CP podría estar explicada por cambios en los factores bióticos, tal como lo sugiere Natsher y Schwetmann (1991).

Respecto a los factores abióticos relacionados a la estructura del suelo, el aumento de Ca^{2+} en el tratamiento con SFC mejoró la estabilidad de la estructura del suelo, como fue indicado

por varios autores que utilizaron sulfato de calcio como enmienda (Lehrsch et al., 1993; Caynes y Ñaidu; 1998, Blum et al., 2011). Las similitudes dadas entre 0,8 y 1,6 Mg ha⁻¹ de SFC (Tabla 4.1) pueden estar asociadas a que otros elementos del suelo también determinan la EAS, como los demás cationes que conforman factores abióticos en su conjunto. Mediante correlaciones canónicas pudo analizarse que sobre la EAS influyeron K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺ de forma positiva y que la acidez pH de suelo se asocia en forma negativa.

De igual manera, las fracciones orgánicas del suelo permitieron explicar los cambios en la EAS, y en ese sentido, el K⁺ en la profundidad superficial presentó correlación significativa ($p < 0,0001$) con los contenidos de carbono orgánico particulado ($R^2 = 0,68$) y carbohidratos solubles ($R^2 = 0,71$). Es conocido que *Oryza sativa* presenta elevada concentración de K⁺ en los residuos de cosecha (Idalgo et al., 2014) y en la cascarilla (Valverde et al., 2004), constituyentes de la CP. Por lo tanto, la relación entre K⁺ y las fracciones orgánicas determinadas se explicaría por las características de los residuos que constituyen la CP.

Tisdal y Oades (1982) han indicado que la agregación de los suelos se debe a la formación de complejos órgano-minerales y, recientemente, Kloster y Avena (2015) corroboraron que el Ca²⁺ y los ácidos húmicos son importantes en la formación de dichos complejos. Sin embargo, en esta experiencia el incremento de Ca²⁺ en el suelo, vía orgánica e inorgánica, no explicó toda la variación de la EAS. Escasos trabajos han considerado la importancia del K⁺ en la formación de complejos órgano-minerales. En este trabajo se demuestra que tanto el K⁺ como el Ca²⁺ se encuentran asociados a los mecanismos de agregación, y que la presencia de ambos, guarda relación directa con la composición de las enmiendas utilizadas.

4.5. Conclusiones.

La utilización de cama de pollos y sulfato de calcio genera cambios en los parámetros de suelo relacionados a la fertilidad química, especialmente de Ca^{2+} y K^+ , elementos que fueron asociados a la estabilidad estructural del suelo. Contrariamente a lo esperado, el pH actual descendió levemente en el corto plazo. La adición de las enmiendas no indujo migración de Mg^{2+} en profundidad, aspecto muy positivo ya que mediante su utilización se podría reponer Ca^{2+} sin afectar el balance con el Mg^{2+} . Es necesario la realización de nuevos trabajos que corroboren el efecto del K^+ sobre la estructuración y el pH del suelo con el uso a largo plazo de las enmiendas utilizadas en este trabajo.

Capítulo 5

Productividad de soja [*Glycine max (L.) Merr.*] en suelos de fertilidad físico-química mejorada con cama de pollo, yeso y labranzas

5.1. Introducción

La productividad del cultivo de soja [*Glycine max (L.) Merr.*] depende de características del genotipo, del ambiente y su interacción. El fotoperiodo y las temperaturas modulan el desarrollo del cultivo, mientras que la radiación solar incidente, la temperatura y factores de suelo afectan principalmente el crecimiento. (Andrade y Sadras, 2002, Bacigaluppo et al, 2006). La disponibilidad de recursos durante el crecimiento genera modificaciones de los componentes del rendimiento. Durante la fase de fructificación el suministro de asimilados es clave ya que determina el número de vainas y granos logrados (Egli, 1998). En ambientes subtropicales de Argentina se presenta un amplio contexto de condiciones ambientales. Si bien las precipitaciones y temperaturas permiten explicar parcialmente la variabilidad en el rendimiento de soja mediante el uso de modelos de regresión múltiple (Zuil et al., 2011), también otros aspectos del manejo determinan la productividad, como el sistema de labranza utilizado (Mieres y Zuil, 2011) y la fertilidad de los suelos (Salvagiotti et al., 2016). En suelos pampeanos, se ha indicado que las variaciones en rendimiento de soja se explican, se explican por diferencias en la radiación acumulada en el llenado de granos, y por factores de suelo, como el contenido de materia orgánica (Bacigaluppo et al, 2006). En suelos chaco-pampeanos, los horizontes superficiales presentan niveles disminuidos de carbono que repercuten en su calidad fisicoquímica (Vivas et al., 1992; De Orellana y Pilatti, 1994; Vivas y Sosa, 1998; Heredia et al., 2006; Vidal y Aparicio, 2008; Rojas et al., 2016, Osinaga et al., 2018; Baldassini y Paruelo, 2019)., Las rotaciones de cultivos en suelos chaco pampeanos determinan calidad del suelo y el uso de análisis de componentes principales permitió destacar al carbono orgánico particulado (COP) y fósforo disponible (P) como variables asociadas, mientras que a el COT y COP se asocian al rendimiento del cultivo de algodón,

Rojas et al. (2015) confirmando que el uso de técnicas multivariadas es una metodología estadística útil en esos suelos.

El uso de cama de pollos (CP) incrementa la productividad de soja en suelos que presentan deficiencias de nutrientes, (Ghosh et al., 2004; Bowden et al 2010, Sena et al., 2014; Dos Passos et al., 2015), fundamentalmente, aumentan los contenidos totales y disponibles de nitrógeno y fósforo (Watts, 2010; Rotondo et al., 2009), que son claves en la productividad de soja (Salvagiotti et al, 2016). También incrementa la estabilidad estructural superficial de suelos franco limosos y la conductividad hidráulica (Rotondo et al., 2009). Bacigaluppo et al. (2006) mediante el ajuste de modelos de regresión múltiple, lograron demostrar que las variaciones en rendimiento de soja presentaron asociación a con la densificación y la conductividad hidráulica de los suelos.

El uso de CP en SD puede generar concentración superficial de fósforo, que es potencialmente contaminante por arrastre con agua de escorrentía (Edwards y Daniel, 1993), por lo cual se recomienda la realización de prácticas complementarias, como la aplicación de sulfato de calcio (SFC) que atenúa el riesgo de movimiento de fósforo soluble ya que forma complejos con el calcio (Felton, 2004). En suelos ácidos el SFC aumenta la concentración de calcio en el suelo y repercute positivamente en el corto y mediano plazo sobre el contenido de fósforo, potasio, calcio y azufre en los granos de soja (Caires et al., 2011). Esta enmienda, utilizada junto a carbonato de calcio en suelos de acidez moderada en la pampa húmeda, causó resultados variables sobre la productividad del cultivo de soja (Vázquez et al., 2012). Sin embargo, los autores indican que puede ser efectiva debido que es una fuente rápida de calcio soluble y sulfatos, importante para las leguminosas.

Los efectos del uso conjunto de CP y SFC sobre la productividad de cultivos se encuentran poco establecidos, si bien es esperable que se presenten efectos positivos sobre el cultivo de

soja ya que ambos determinarían mejoras en la fertilidad. Se ha reportado ausencia de efectos positivos a la aplicación conjunta en suelos con suficiencia de N y P (Adeli et al., 2019) como en su uso individual de CP (Singh et al., 2021) y SFC (Raut et al., 2019).

Por otro lado, el cultivo de soja presenta un comportamiento poco claro respecto a las propiedades físicas que presentan los suelos cultivados en siembra directa (Micucci y Taboada, 2006; Gerster, 2008). Se ha indicado que el aumento de la densidad aparente y la disminución en la porosidad en suelos compactados por el tránsito agrícola disminuyen la productividad de soja (Botta et al., 2004). También que la porosidad en suelos en siembra directa es menor, debido a una menor cantidad de macroporos (Sasal et al., 2006; Micucci y Taboada, 2006). El crecimiento radicular siempre es afectado (Micucci y Taboada, 2006; Gerster, 2008). Las propiedades de los horizontes subsuperficiales arcillosos también pueden condicionar la productividad (Micucci y Taboada, 2006). Existe una relación entre la abundancia radicular y el contenido de arcilla, que condiciona la porosidad del suelo, y finalmente la productividad del cultivo (Dexter, 2004). Esto ha sido evaluado por Gerster (2008), quien indicó que en suelos franco limosos en SD la presencia de estados masivos de la estructura en horizonte A, disminuye la exploración radicular del mismo, pero no el crecimiento del cultivo de soja debido a que las raíces del cultivo exploran más de 1,5 metros de profundidad del suelo, pudieron abastecer al cultivo de agua y no se restringió el consumo hídrico. Gerster (2008) asoció dichos estados masivos con la compactación por tránsito agrícola. Por otra parte, Miretti et al. (2010) al evaluar sectores naturales que generan limitantes al cultivo de alfalfa han indicado que la porosidad, la estabilidad de la estructura, la composición mineral y orgánica del suelo inciden sobre la disponibilidad hídrica óptima. La información relevada sugiere que el uso individual de cama de pollos, de yeso y de labranzas puede generar un incremento de recursos nutritivos para el cultivo, y por lo cual el

uso conjunto mejoraría la calidad del suelo y aumentaría el rendimiento de soja. En ese sentido, los resultados de prácticas de manejo de cultivos en zonas subtropicales suelen diferir de los encontrados en otros ambientes, probablemente debido a las diferencias existentes en la combinación cultivos-clima-suelo (Paytas et al., 2005; Mieres y Zuil, 2011; Zuil, 2011).

En función de los antecedentes se estableció el objetivo de evaluar propiedades físicas (tamaños de partículas, densidad aparente, distribución del tamaño de poros, estabilidad de agregados) y químicas (fracciones del carbono, nitrógeno y fósforo, cationes y acidez), en suelos enmendados con cama de pollos y sulfato de calcio y establecer la relación con la productividad del cultivo de soja (biomasa, componentes rendimiento) en dos sistemas de labranzas. La hipótesis que se sostiene es que, la mejora en la calidad físico-química del suelo lograda en distintos sistemas de manejo de enmiendas y labranzas, se refleja en el aumento de rendimiento del cultivo de soja.

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Sitio, suelo, tratamientos y diseño de experimento

El experimento fue realizado en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Reconquista (29°15'33" S; 59°43'47" O) provincia de Santa Fe, Argentina, durante las campañas agrícolas 2012-13. El suelo posee capacidad de uso agrícola-ganadera (IIIws PIP-54) y fue clasificado en escala de semidetalle (1:50.000) como suelo complejo, unidad cartográfica RTA4, donde la serie Reconquista (RTA) es la principal componente (Mapa de Suelos de la Provincia de Santa Fe, Giorgi et al., 2009). La serie RTA (Tabla 2.2; Capítulo 2) se clasifica como Argiudol acuértico, en la clasificación USDA (Soil Survey Staff, 2010).

Los tratamientos se componen de combinaciones de aplicación de cama de pollos: sin aplicación y con aplicación (Tabla 2.3). A esas situaciones se adicionó sulfato de calcio: tres dosis crecientes que incluyen la no aplicación. El suelo luego ha sido manejado en dos condiciones de labranza: sin incorporación de enmiendas (siembra directa, SD) y con incorporación de enmiendas mediante remoción del horizonte superficial (labranza mínima, LM). El cultivo de soja fue implantado sobre los tratamientos el 15 de noviembre de 2012. Se sembró soja variedad Munasqa (RR, grupo de madurez VIII), a 52 cm entre líneas, sin fertilización sobre antecesor girasol. Las parcelas se mantuvieron libre de malezas, plagas y enfermedades mediante el uso de agroquímicos específicos (Capítulo 2). El diseño fue en bloques completos al azar con tres repeticiones.

5.2.2. Determinaciones de densidad aparente de suelo, porosidad total y distribución del tamaño de poros del suelo.

La determinación de la densidad aparente (DAP) se realizó con el método de Blake y Hartge (1986), luego de la cosecha del cultivo de soja [g cm^{-3} suelo]. Se consideraron dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm). Las muestras ($n=72$) no disturbadas se extrajeron con cilindros metálicos, que se dispusieron en contenedores que se rellenaron con suelo para evitar su alteración en el transporte al laboratorio. Las muestras se secaron a 105°C por 72 horas y se registraron los pesos secos para determinar el peso en relación al volumen del cilindro para determinar DAP. De la misma forma se realizó el proceso de muestreo para determinar la porosidad total y la distribución del tamaño de poros. Una vez en el laboratorio, los cilindros ($n=72$) fueron colocados en una bandeja e inmersos lentamente en agua destilada, siendo el nivel elevado gradualmente durante 3 días hasta su saturación. De esta manera se permitió que la salida del aire de los poros por la cara superior de las muestras no generara ruptura de la estructura por estallidos. Luego cada muestra fue expuesta a diferentes

potenciales hídricos en mesa de tensión (0, 10, 100, 200 y 300 cm de columna de agua). Una vez que alcanzaron el equilibrio para cada tensión, se extrajeron de la mesa, se pesaron y registró el peso. Luego se secaron a 105 °C y se registró el peso final. Con la información de contenido hídrico volumétrico en cada tensión, se estimó la distribución del tamaño de poros con la técnica ISO/FDIS 11274 (1998) basada en (Buczko et al., 2006).

5.2.3. Determinaciones del tamaño de partículas del suelo

Se utilizó la metodología de pipeta, para lo cual se pesaron 20 gramos de suelo, que fueron agitados en solución de 25 ml de hexametáfosfato de sodio y 100 ml de agua destilada durante 16 hs. A la solución se le agregó 5 ml agua oxigenada 100 volumen y se dejó reaccionar durante 24 horas para favorecer la destrucción de materia orgánica y la dispersión de la muestra. Posteriormente, la suspensión se colocó en probetas de 1000 ml y llevó el volumen a 1 litro. Se colocaron dentro de un baño termostático a 25°C. Luego de una hora comenzó la prueba mediante el pipeteo de 20 ml de la solución en los tiempos establecidos según la temperatura de la solución. Los extractos de pipeta fueron depositados en crisoles y secados durante 24 horas a 105°C y pesados para calcular las cantidades de partículas de la fracción limo y arcilla (Klute, 1986).

5.2.4. Determinaciones en suelo de nitrógeno total, nitrógeno disponible, fósforo total y fósforo extractable.

Sobre muestras de suelo de las profundidades 0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm, tomadas previo de la siembra del cultivo de soja, se midió Nitrógeno total (N_{tot}) mediante determinación Kjeldahl (Jackson, 1958). [%]. También se determinó nitrógeno disponible en forma de nitratos (N-NO₃⁻) y de amonio (N-NH₄⁺) por microdestilación por arrastre de vapor (Bremner y Keeney, 1965). Se realizaron determinaciones de fósforo extractable (P_{ext}) por el método Bray y

Kurtz I (Bray y Kurtz, 1945). [mg kg^{-1}] y de fósforo total (P_{tot}) de digestión ácida, determinado por colorimetría (Murphy y Riley, 1962).

5.2.5. Variables de fracciones carbonadas, estabilidad de agregados, cationes y acidez.

Se utilizó información de suelos ya presentada en resultados de capítulo 3 (Tabla 3.1 y 3.3; Figuras 3.1 y 3.3), como del capítulo 4 (Tabla 4.1 y 4.2; Figuras 4.1, 4.4, 4.3 y 4.4). En dichos capítulos también se desarrolló la metodología empleada para su determinación. La información se resume en tabla 5.1, donde se hace referencia a la variable, con su sigla y unidad respectiva.

Tabla 5.1 Variables de fracciones carbonadas, estabilidad de agregados, cationes y acidez.

Variable	Sigla	Unidad
Carbono orgánico total	COT	Mg ha ⁻¹
Carbono orgánico particulado	COP	Mg ha ⁻¹
Carbohidratos solubles	CHS	Mg ha ⁻¹
Proteínas de suelo relacionadas a la glomalina	PRGS	mg g ⁻¹
Proteínas relacionadas a la glomalina fácilmente extraíbles	PRGS-FE	mg g ⁻¹
Estabilidad de agregado ante la humectación rápida	h-rápida	mm
Estabilidad de agregados ante la humectación lenta	h-lenta	mm
Estabilidad de agregados ante la disgregación mecánica	d-mecánica	mm
Estabilidad de agregados media de suelo	EAS	mm
Calcio intercambiable	Ca ²⁺	meq 100 g ⁻¹
Magnesio intercambiable	Mg ²⁺	meq 100 g ⁻¹
Sodio intercambiable	Na ⁺	meq 100 g ⁻¹
Potasio intercambiable	K ⁺	meq 100 g ⁻¹
Instauración	IS	meq 100 g ⁻¹
pH	pH	
pH potencial	pH _{pot}	
Diferencia entre pH y pH potencial	pH-pH _{pot}	

5.2.6 Muestras de Biomasa total y de órganos de soja

Se realizaron muestreos de plantas durante el periodo reproductivo de la soja (Fehr y Caviness, 1977), al comienzo de la fijación del número de vainas (R3) y en madurez completa

del cultivo (R8). En R3 se determinó el peso seco de la biomasa aérea total (B.A.Total), mientras que en R8 se determinó el peso seco particionado por órganos ((B.Tallos, B.Vainas y B.Granos) El cultivo fue cosechado al alcanzar 13% de humedad de grano y se determinó el número del número de granos (N.Grano) y vainas (N.Vaina). por unidad de superficie (m²).

Tabla 5.2 Variables de biomasa de cultivo de soja estudiadas, momento, siglas y unidad de medida

Variable	Período	Sigla	Unidad
Biomasa aérea total de soja	R3	B.A.Total	Mg ha ⁻¹
Biomasa aérea total de soja	R8	B.A.Total	Mg ha ⁻¹
Biomasa de tallos de soja	R8	B.Tallos	Mg ha ⁻¹
Biomasa de vainas de soja	R8	B.Vainas	Mg ha ⁻¹
Biomasa de granos de soja	R8	B.Granos	Mg ha ⁻¹
Número de granos de soja	R8	N.Grano	granos m ²
Número de vainas de soja.	R8	N.Vaina	vainas m ²

5.2.7. Análisis de la información.

Se utilizó análisis de varianzas con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2015), para estimar la contribución relativa de los efectos cama de pollos (CP), sulfato de calcio (SFC) y labranzas sobre las variables, y la interacción entre los factores. Mediante el análisis de varianzas, tanto en las variables de cultivo de soja presentadas en Tabla 5.2. se realizó comparación de medias de las variables para los tratamientos, mediante LSD Fischer ($\alpha:0,05$), como así también sobre variables de suelo presentadas en Tabla 5.3., en dos profundidades de suelo, 0 a 7,5 cm (1) y 7,5 a 15 cm (2).

Para evaluar la relación existente entre parámetros de suelo y cultivos medidos, entre parámetros y tratamientos y entre tratamientos, se realizó una matriz de datos de variables de suelo y cultivo (Tabla 5.1, 5.2 y 5.3), y se utilizó análisis de componente principales explicar la manera en que se relacionan los componentes de conjuntos de datos multidimensionales

(CP1 + CP2) con variables cuantitativas, siendo que es posible interpretar el efecto que estas tienen, positivo o negativo, en relación con el ángulo de separación entre las mismas (Di Rienzo et al., 2015), para visualizar la información se usaron gráficos biplots (Gabriel, 1971)

Tabla 5.3 Variables de suelo sobre las que se realizó análisis de la varianza

Variable	Sigla	Unidad
Densidad aparente	DAP	g cm ⁻³
Porosidad total	Porot	%
Macroporosidad >60 µm	MacroPoro	%
Mesoporosidad 60 a 15 µm	MesoPoro	%
Microporosidad <15 µm	MicroPoro	%
Arena	Arena	%
Arcilla	Limo	%
Limo	Arcilla	%
Nitrógeno total	Ntot	mg kg ⁻¹
Fósforo total	Ptot	mg kg ⁻¹
Nitrógeno de nitratos	N-NO3	mg kg ⁻¹
Nitrógeno de amonio	N-NH4	mg kg ⁻¹
Fósforo extractable	Pext	mg kg ⁻¹
Conductividad eléctrica rel 1:2,5 agua	C.E.	dS.m

para dar representación gráfica de las correlaciones entre variables de suelo y de cultivo con los tratamientos como variables categóricas. Con ello realizó una integración de toda la variabilidad presente respecto a los tratamientos, y se identificó variables de suelo de mayor contribución en la explicación de las variaciones encontradas en las variables de cultivo (VC). Posteriormente, se generaron modelos de regresión lineal múltiple (Draper y Smith, 1998) con las variables de suelo como regresoras y de cultivo como resultantes utilizando el procedimiento *Stepwise* de selección de variables de suelo.

5.3. Resultados

5.3.1 Densidad aparente y tamaño de poros del suelo

La utilización de enmiendas no modificó de forma sustancial la densidad aparente (DAP) luego de un periodo de 10 meses de su aplicación tanto para la profundidad 0 a 7,5 cm ($p \geq 0,5$) como 7,5 a 15 cm. ($p \geq 0,4$). Tampoco hubo diferencias, para dichas profundidades, entre tratamientos de labranza ($p \geq 0,14$ y $p \geq 0,2$) y dosis de SFC ($p \geq 0,4$ y $p \geq 0,2$). La media en la profundidad 0 a 7,5 cm fue $1,39 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,5$) mientras que de 7,5 a 15 cm la DAP fue $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,4$).

El espacio poroso total (PoroTotal) del suelo en ambas profundidades cambió de forma significativa entre los sistemas de labranza, tanto para 0 a 7,5 cm ($p < 0,02$) como para 7,5 a 15 cm ($p < 0,04$). En la primera profundidad, los valores fueron 46,3 % en SD y 48,9% en LM. De 7,5 a 15 cm, los valores fueron 43,1 y 45,2 %, respectivamente (Figura 5.1).

Los sistemas de labranza también modificaron significativamente ($p < 0,02$) la distribución del tamaño de poros. En la profundidad de 0 a 7,5 cm, los macroporos del suelo (MacroPoro) ocuparon un volumen de 8,4 % y 10,9 % en SD en LM, respectivamente (Figura 5.1) De manera similar, de 7,5 a 15 cm se registraron diferencias significativas ($p < 0,04$) en la macroporosidad que fue de 6,4 y 9,1% en SD y LM, respectivamente.

Los mesoporos del suelo (MesoPoro) presentaron una media de 5 % y no se registraron diferencias entre tratamientos de labranza ($p \geq 0,07$) a nivel superficial y subsuperficial ($p \geq 0,5$). Tampoco hubo cambios ante la incorporación de CP y SFC. El volumen de microporos de suelo (MicroPoro) representó la mayor parte del espacio poroso y no registró diferencias entre tratamientos de labranza, CP y SFC ($p \geq 0,2$). La media de los microporos fue 31,5% (± 1).

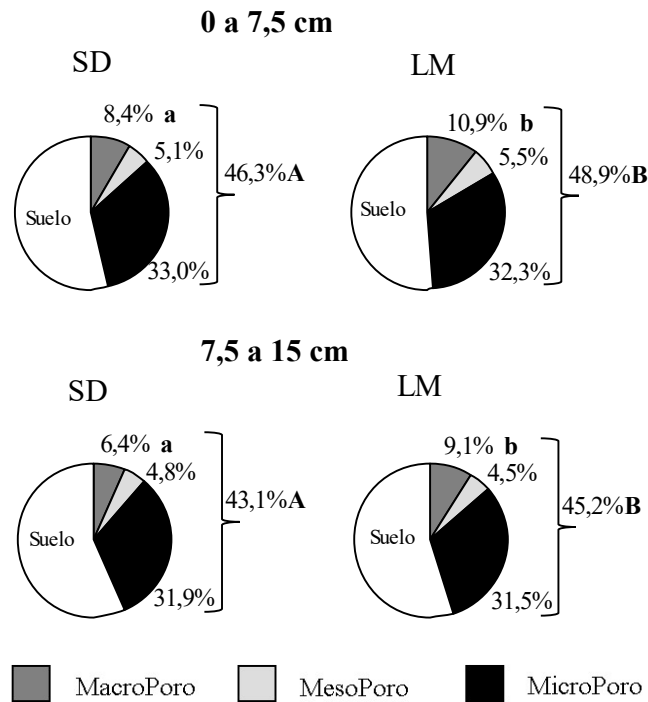


Figura 5.1: Distribución de partículas sólidas de suelo (blanco), espacio poroso total (corchete), macroporos (gris), mesoporos (gris claro) y microporos (negro) del suelo en dos profundidades del horizonte superficial (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) en gráficos superior e inferior respectivamente, para manejos en siembra directa (SD, izquierda) y labranza mínima (LM, derecha). Valores en negrita con letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos de labranza, según test LSD Fisher (α : 0,05).

5.3.2 Tamaño de partículas del suelo

En general, el suelo presentó tamaños de partícula finos en su mayor parte, que se condicen con su clasificación de suelo como franco limoso, en ambas profundidades evaluadas (Tabla 5.3), pero con concentraciones de arena levemente mayores (2,4%) que las descripciones de la serie de suelo Reconquista (Tabla 2.2; Giorgi et al., 2009) y menores de arcilla (7,4%) respecto al suelo representativo. Al analizar los niveles medios del lugar de estudio (Tabla 5.4), la arena decreció entre profundidades, mientras que la arcilla se incrementó con la profundidad. Al considerar los efectos de los tratamientos sobre el tamaño de partículas, la labranza modificó significativamente ($p < 0,007$) el patrón de distribución de las partículas; el contenido de arena del suelo fue menor en LM respecto a SD en la profundidad 0 a 7,5 cm y

el de arcilla mayor ($p < 0,02$). El limo no presentó cambios significativos a nivel superficial. El sistema de LM ocasionó mayor homogeneidad entre profundidades respecto de la estratificación observada en SD.

Tabla 5.4: Fracciones Arena, Limo y Arcilla de un suelo franco limoso, en dos profundidades del horizonte A, para los tratamientos Labranza Mínima (LM) y Siembra Directa (SD). Letras distintas indican diferencias significativas entre medias del factor según test LSD de Fischer ($\alpha: 0,05$). * indica diferencias significativas $p < 0,05$; ** indica diferencias significativas $p < 0,01$; ns indica diferencias no significativas.

	Arena		Limo		Arcilla	
	%		%		%	
	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm	0 a 7,5 cm	7,5 a 15 cm
<i>Tratamiento</i>						
CP 0	23,4 a	20,1 a	72,4 a	63,3 a	14,0 a	15,9 a
CP 20 Mg ha ⁻¹	23,9 a	20,3 a	62,8 a	63,8 a	14,2 a	16,7 a
SFC 0	23,7 a	20,3 a	62,1 a	62,8 a	13,9 a	16,2 a
SFC 0,8 Mg ha ⁻¹	23,4 a	20,0 a	62,7 a	64,0 a	14,5 a	16,9 a
SFC 1,6 Mg ha ⁻¹	23,3 a	20,3 a	63,0 a	63,7 a	13,9 a	16,2 a
LM	22,6 a	20,5 a	62,3 a	62,4 a	13,2 a	15,4 a
SD	23,9 b	19,8 a	63,0 a	64,7 a	15,2 b	17,1 a
<i>Fuente Variación</i>						
CP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SFC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Labranza	**	ns	ns	ns	*	ns
CP*SFC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP*SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns

5.3.3. Concentración de Nitrógeno total y disponible en el suelo

El contenido de nitrógeno en el suelo, evaluados en su concentración total (N Total), amoniacal (N-NH₄⁺) y en nitratos (N-NO₃⁻), presentó en la profundidad 0 a 7,5 cm interacción significativa ($p < 0,02$) entre tratamientos CP y labranza. En la profundidad 7,5 a 15 cm, N-NH₄⁺ presentó interacción ($p < 0,04$) entre dosis de CP y labranzas, mientras que N Total y N-

NO_3^- no presentaron interacción y ambos se modificaron de forma significativa ($p < 0,03$) por el uso de CP.

El análisis combinado de tratamientos con CP y labranzas indicó que el N total de suelo de 0 a 7,5 cm se incrementó ante la aplicación de 20 Mg ha⁻¹ de CP, en ambos sistemas de labranza respecto a 0 Mg ha⁻¹ de CP (Figura 4.4), aunque con pendientes distintas entre sistemas de labranza, siendo mayor la tasa de cambio ante la aplicación de CP en LM (40,2 %) que en SD (15,5%). En la profundidad 7,5 a 15 cm la variación del N total fue de menor importancia que en superficie, y fue la aplicación de CP lo que determinó las variaciones, con mayores contenidos en LM con CP (0,088%) que en SD sin CP (0,077%), mientras que entre los tratamientos con SD con CP y en LM sin CP los contenidos fueron similares.

El contenido de N- NO_3^- presento mayores valores en LM con CP en ambas profundidades. En SD y con CP, los contenidos también fueron elevados pero menores, aunque superiores a los registrados en tratamientos sin CP para ambos sistemas de labranza. Los cambios porcentuales por aplicar CP fueron de 716% y 243% para LM y SD, respectivamente. Las respuestas al uso de CP en la profundidad 7,5 a 15 fueron levemente mayores en SD (316%) respecto de LM (278%), pero los contenidos totales fueron superiores en LM con CP, al igual que en superficie.

El contenido de N- NO_4^+ en la profundidad 0 a 7,5 cm fue similar entre tratamientos con y sin CP en SD y sin CP en LM, pero fue 172% superior en LM con CP respecto a los anteriores. De 7,5 a 15 cm los contenidos de N- NO_4^+ en tratamientos sin CP en SD fueron menores que los tratamientos con y sin CP en LM y con CP en SD.

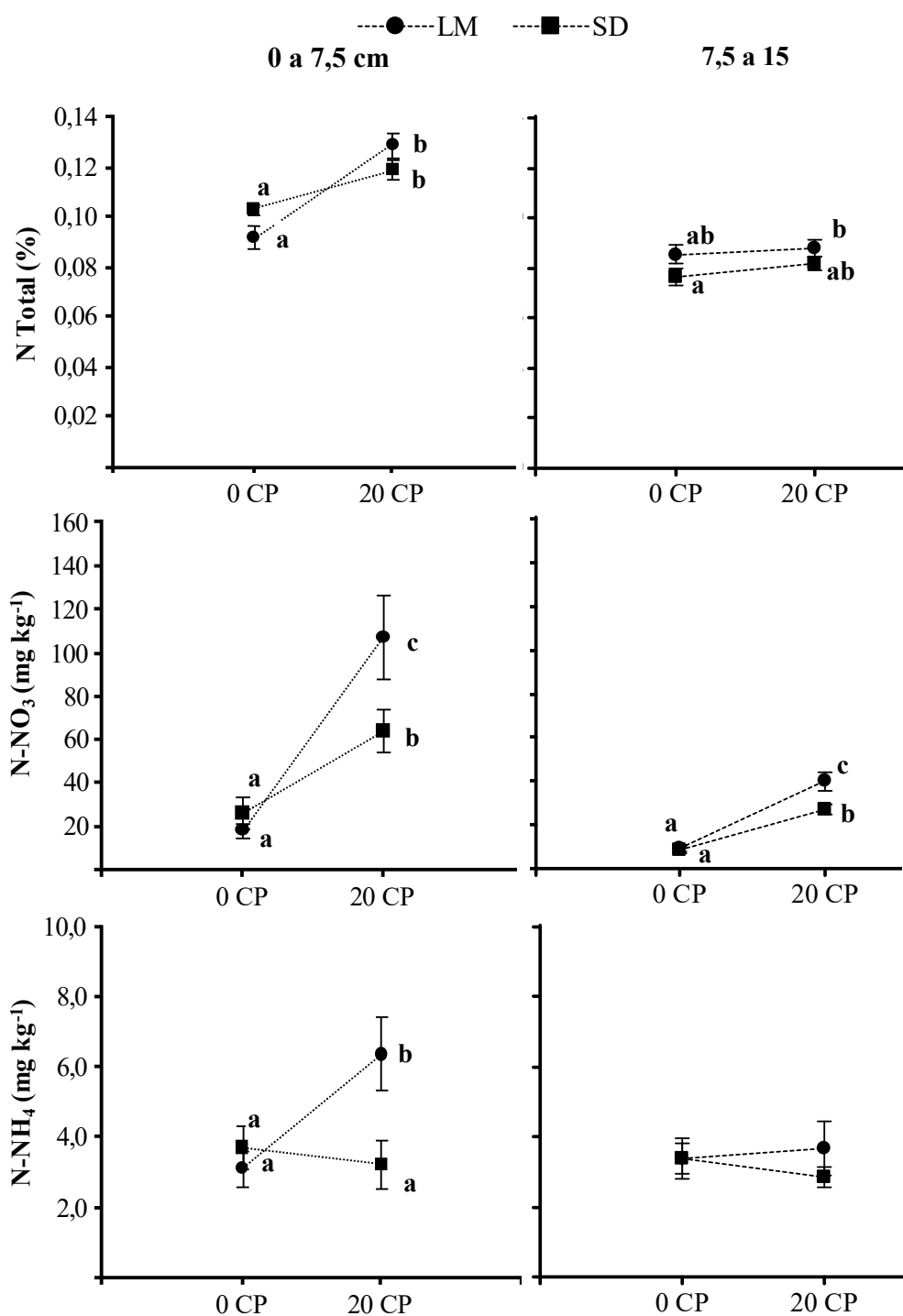


Figura 5.2: Contenidos medios y error estándar (barras verticales) del nitrógeno total (N total) nitrógeno de nitratos (N-NO₃⁻) y nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) en tratamientos con cama de pollos (0 CP y 20 CP). Circulo negro labranza minimia (LM) cuadrado negro siembra directa (SD). Valores con letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos de labranza, según test LSD Fisher (α : 0,05).

5.3.4. Concentración de Fósforo total y extractable del suelo

Los contenidos totales de fósforo del suelo presentaron un cambio significativo al usar cama de pollo y no presentaron diferencia entre sistemas de labranza. En ese sentido, las tasas de cambio fueron importantes, de 187 y 181% en SD y LM, respectivamente (Figura 5.3). En la profundidad 7,5 a 15 cm se presentaron contenidos similares entre tratamientos con CP en SD y LM, y tratamiento sin CP y LM, mientras que en SD sin CP fueron 24,5% menores a los tratamientos mencionados.

El fósforo extractable (Pext) presentó un comportamiento distinto que el P total de 0 a 7,5 cm. Se incrementó de forma muy importante con el uso de CP, pero presentó diferencias entre sistemas de labranza. Con CP fue mayor en LM respecto a SD, con tasas de cambio de 475% y 305% respectivamente, en comparación con los tratamientos sin CP para cada sistema de labranza. En la profundidad 7,5 a 15 cm, los valores Pext fueron mayores con CP y de forma similar entre SD y LM. Pero en ausencia de CP los contenidos de Pext en SD fueron menores a los de LM, lo que indica estratificación del Pext en SD y que fue alterado hacia la homogeneidad con LM.

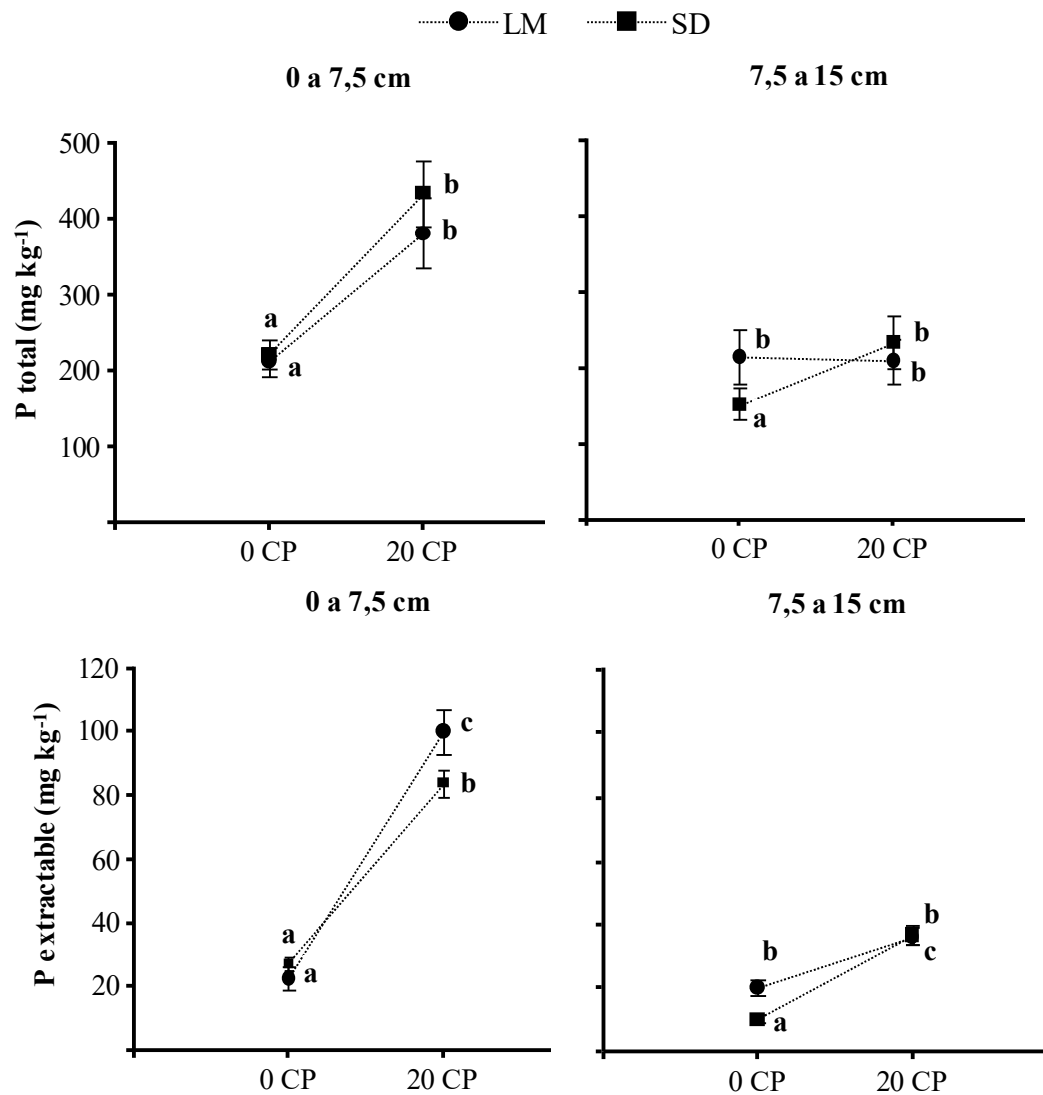


Figura 5.3: Contenidos medios y error estándar (barras verticales) del fósforo total (Ptotal) y fósforo extractable (Pextractable) en dos profundidades de suelo (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm) ante tratamientos con cama de pollos (0 CP y 20 CP). Circulos negros en labranza minima (LM) y cuadrados negros en siembra directa (SD). Valores con letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos de labranza, según test LSD Fisher (α : 0,05)

5.3.5. Biomasa aérea total y de órganos del cultivo de soja

Las variables de cultivo (VC) no presentaron interacciones significativas entre los tratamientos, por lo que, se analizó los efectos simples de cada factor. La biomasa aérea total (B.A.Total) presentó diferencias significativas tanto en la floración del cultivo (R3; $p < 0,02$)

como en madurez, (R8; $p < 0,002$) con el uso de cama de pollos (CP). Con dosis de 20 Mg ha^{-1} , la biomasa total se incrementó 107 y 116 g m^{-2} en R3 y R8, un 15 % mayor respecto a tratamientos sin CP (Tabla 5.5). El uso de sulfato de calcio SFC también determinó diferencias significativas en B.A.Total en R3 ($p < 0,001$) y en R8 ($p < 0,02$). Los tratamientos sin SFC registraron en promedio 18 y 11 % menos materia seca en ambos momentos respecto a tratamientos con SFC.

Tabla 5.5 Análisis de varianza y comparación de medias de tratamientos de cama de pollos (CP), sulfato de calcio (SFC) y labranza (SD y LM) sobre suelo franco limoso, donde se consideró la producción de biomasa aérea total (B.A.Total en R3 y R8) y por órganos: tallos (B.Tallo), vaina (B.Vaina), y grano (B.Grano) y del número de granos (N.Grano) y vainas (N.Vaina). Letras distintas indican diferencias significativas entre medias de cada factor. ns: diferencias no significativas, * diferencias significativas $p < 0,05$; ** diferencias significativas $p < 0,01$; *** diferencias significativas $p < 0,001$. Test LSD Fischer ($\alpha: 0,05$).

<i>Variables Cultivo</i>	B.A.Total	B.A.Total	B.Tallo	B.Vaina	B.Grano	N. Grano	N.Vaina
	R3	-----	Madurez completa (R8) -----				
<i>Tratamientos</i>	gr m^{-2}	gr m^{-2}	gr m^{-2}	gr m^{-2}	gr m^{-2}		
CP 0 Mg ha^{-1}	696 a	747 a	221 a	128 a	404 a	2767 a	1539 a
CP 20 Mg ha^{-1}	803 b	863 b	270 b	151 b	448 b	2923 a	1684 a
SFC 0 Mg ha^{-1}	641 a	745 a	226 a	134 a	380 a	2543 a	1455 a
SFC 0,8 Mg ha^{-1}	760 b	839 b	255 b	140 a	451 b	3017 b	1682 b
SFC 1,6 Mg ha^{-1}	847 b	831 b	255 b	145 a	447 b	2974 b	1697 b
SD	724 a	786 a	230 a	138 a	419 a	2813 a	1583 a
LM	776 a	824 a	261 b	142 a	432 a	2877 a	1640 a
<i>Fuente de Variación</i>	----- <i>nivel de significancia</i> -----						
CP	*	***	***	*	***	ns	ns
SFC	**	*	*	**	ns	*	*
Labranza	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
CP*SFC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP*SFC*Labranza	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

La B.A.Total fue similar entre dosis de 0,8 y 1,6 Mg ha⁻¹ de SFC en R3 ($p<0,02$) y R8 ($p<0,03$). Las labranzas no afectaron la B.A.Total ($p<0,58$ y $p<0,19$ para R3 y R8 respectivamente).

La biomasa de tallos (B.Tallo) y de vainas (B.Vaina) en R8 también registró diferencias significativas en los tratamientos con CP, con incrementos de 22 y 17% de la B.Tallo ($p<0,0001$) y B.Vaina ($p<0,01$) respectivamente, cuando se aplicó CP. Los tratamientos de labranza no modificaron significativamente la biomasa de órganos en los periodos considerados ($p>0,17$) a excepción de B.Tallo que fue 13 % mayor en LM respecto a SD ($p<0,001$).

La biomasa de granos (BG) en R8 presentó diferencias tanto por efecto de la CP como de SFC. Los tratamientos con CP provocaron un incremento de 11 % en la BG, mientras que el SFC incrementó 17 % la BG. El número de granos logrados (NG) y vainas (NV) presentaron diferencias significativas ($p<0,001$ y $p<0,005$, respectivamente) en los tratamientos con SFC, mientras que no registraron incrementos significativos con CP ($p\geq 0,1$; Tabla 5.5). En general, se presentó ausencia de aditividad entre tratamientos para todas las variables de cultivo evaluadas, dado que las interacciones fueron no significativas en todos los casos.

5.3.6. Análisis multivariado de propiedades de suelo y cultivo de soja

El análisis de componentes principales (ACP) entre las variables de suelo (Tabla 5.1) y de cultivo de soja (Tabla 5.2) representó el 81,9 % de la variabilidad total de los datos. La CP1 explicó el 52,2 % de la variabilidad (Figura 5.4). Cada propiedad de suelo y cultivo está representada por un auto-vector que queda definido por la correlación que existe entre la propiedad del suelo y la componente principal, el ángulo existente entre los vectores representa el grado de correlación entre las variables medidas. Las variables que más

explicaron la variabilidad de la CP1 fueron las concentraciones de P_{ext} y Mg^{2+} de 0 a 7,5 cm y los contenidos de $N-NO_3^-$ y la C.E. en ambas profundidades. En forma negativa a estas se asociaron el pH del suelo y la IS en ambas profundidades.

La CP1 separó en cuadrantes distintos a tratamientos con y sin CP introducidos como criterio de clasificación, el ángulo de los vectores indica que hay correlaciones negativas entre dosis de CP. Las variables de cultivo B.A.Total, B.Grano, N.Grano y N.Vaina se posicionaron en el mismo cuadrante donde se encuentran los tratamientos con CP, lo que indica una correlación entre este grupo de variables. Por otra parte, las variables de cultivo (VC) establecieron relaciones positivas más fuertes con propiedades químicas como P_{total} , Ca^{2+} y Na^+ en la profundidad 7,5 a 15 cm y con Mg^{2+} de 0 a 7,5. De manera negativa, las VC se asociaron con propiedades de suelo como COP, IS y pH de 0 a 7,5. Por último, las VC se asociaron positivamente con la estabilidad de agregados (h-lenta) y de forma negativa con MicroPoros y limo de ambas profundidades.

La CP2 explicó el 29,2% de la variabilidad. Las variables de suelo DAP, CHS y MesoPoros de 7, a 15 cm, fueron las que explicaron en mayor medida esta componente, de forma negativa, se asociaron las variables $N-NH_4^+$ y MesoPoros de 0 a 7,5 cm, la Porosidad Total y MacroPoros de ambas profundidades, como así también la estabilidad ante h-rápida y los contenidos de Arena de 7,5 a 15 cm. La CP2 separó en el primer cuadrante la variable clasificatoria con tratamientos en SD y a LC en el segundo cuadrante. En este último es donde se presentaron la totalidad de las VC.

Tabla 5.6: Análisis de regresión lineal de variables de suelo como predictoras de la biomasa aérea total (B.A.Total), biomasa de granos (B.Grano), número de vainas (N.Vaina) y número de granos (N.Grano) del cultivo de soja en campaña 2012-13.

Modelos	R ²
B.A.Total = 1266,7* h-rápida +23,8* MacroP(2) +39,9* Ca⁺⁺(2) -234	0,86
B.Grano = 996,9* h-rápida -+11,3* MacroP(2) +28,5* Arena(2) +30,3* Mg⁺⁺(2) -748	0,96
N.Vaina = 4523,6* h-rápida +73,37* COP(2) -2695,91* DAP(2) +22,2* MacroP -370,32* K⁺(2) +3270	0,93
N.Grano = 7834,9* h-rápida +199,1* COP(2) -907,6* K⁺ +70,8* MacroP +164,2* Ca⁺⁺(2) -2057	0,92

Selección stepwise α : 0,05 (1) 0 a 7,5 cm (2) 7,5 a 15 cm

A nivel general, se destaca que independientemente del modelo, todos consideraron más de dos variables de suelo para presentaron ajuste y R² adecuado (Figura 5.5) y explicar relaciones con las VC de forma significativa (Figura 5.5), siendo modelos de menores variables descartados por falta de significancia. En los resultados se destaca la estabilidad de agregados ante la humectación rápida superficial como variable que fue considerada en todos los casos, para explicar lo ocurrido con los cultivos, como también la macroporosidad, ambas con influencia positiva.

En cuanto a la B.Grano, el modelo también incorporó como variable explicativa Mg²⁺. El N.Vainas por su parte incorporó COP, la DAP y el K⁺ subsuperficial en forma negativa. Por último, el N.Grano consideró como variables que explican su comportamiento, las mismas variable que el N.Vaina, pero en distinto orden de importancia (CpMalows) e incorporó al calcio.

Para el análisis de predichos y observados ((Figura 5.6), el modelo de B.A.Total presentó un ajuste importante ($R^2=0,85$) pero menor que el de los demás modelos. El ajuste para B.Grano fue $R^2=0,92$, para N.Vainas $R^2=0,94$ y para N.Grano $R^2=0,92$.

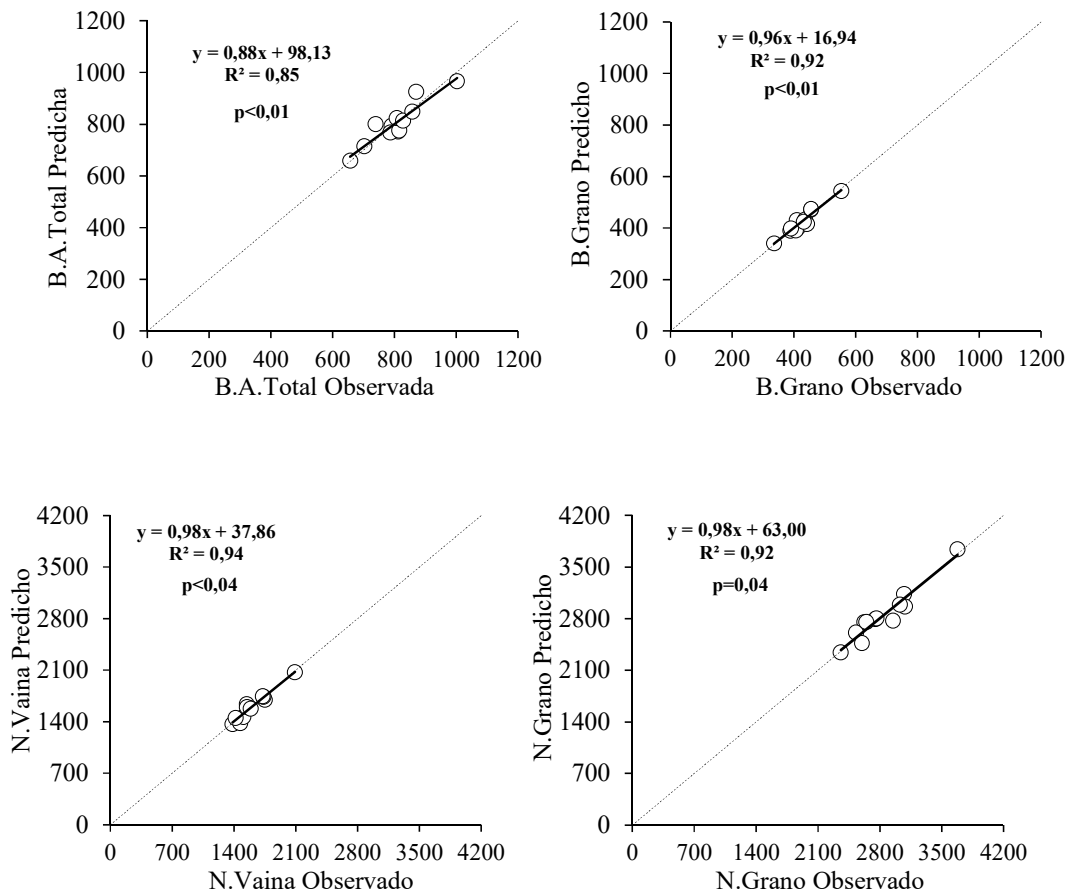


Figura 5.5: Ajustes lineales de valores predichos y observados de modelos de la biomasa aérea total de (B.A.Total), biomasa de granos (B.Grano), numero de vainas (N.Vaina) y numero de granos (N.Grano) del cultivo de soja en ambiente subtropical durante la campaña 2012-13.

5.4. Discusión

En este capítulo se estableció que de forma conjunta aspectos de la fertilidad física como estabilidad de agregados al agua y macroporosidad, por un lado; y aspectos de la fertilidad

química, como K^+ y Mg^{++} , por otro, cambiantes por el tratamiento del suelo con labranza mínima, cama de pollos y sulfato de calcio, determinaron de forma conjunta la productividad de soja (Tabla 5.5). Por otra parte, se verificó que, tanto el uso de CP como de SFC generó incrementos en la biomasa de grano, (Tabla 5.5), de manera similar a lo reportado en otros ambientes y suelos de fertilidad reducida (Ghosh et al., 2004; Bowden et al., 2010; Sena et al., 2014; Dos Passos et al., 2015). En esta experiencia ello representa magnitudes de 22 kg de grano de soja por $Mg\ ha^{-1}$ de CP aplicada, y de 890 kg de grano de soja por $Mg\ ha^{-1}$ de SFC aplicado, presentando esta un límite de aumento de la productividad en la primera dosis de SFC evaluada.

Las variables productivas asociadas al crecimiento del cultivo como la biomasa aérea total, de tallos y estructuras florales también aumentaron con la aplicación de CP en el suelo, esto indica que el cultivo se desarrolló en un ambiente con adecuados más recursos disponibles. El cultivo posee demandas elevadas de nitrógeno y fósforo. En este estudio los contenidos totales y disponibles de fósforo y nitrógeno se incrementaron de forma importante con el uso de CP (Figura 5.2 y 5.3), en coincidencia con lo reportado en numerosos trabajos (Watts et al., 2010; Dikinya y Mufwanzala, 2010; Foster, 2011; Dos Passos et al., 2015). Sin embargo, la productividad no se asoció a dichos incrementos. Las necesidades de nitrógeno generalmente son cubiertas en gran parte por la fijación biológica de nitrógeno (Salvagiotti et al., 2016) y la disponibilidad del suelo. Sin embargo, estas condiciones determinan mayor riesgo de pérdida de N en profundidad. Los altos contenidos de P al final del ciclo del cultivo, superiores a 18 ppm, indicados como umbral de respuesta del cultivo (Sainz Rosas et al., 2013), permiten considerar que la necesidad de fósforo fue cubierta por los niveles iniciales presentes, aún en el suelo sin CP.

En este estudio, se encontró que otros elementos fueron determinantes en la productividad de soja. Calcio y magnesio la afectaron de forma positiva, lo que coincide con lo reportado ampliamente en estudios de pampa húmeda (Zambrozi et al., 2007; Caires et al., 2011; Vazquez et al., 2012; Senna et al., 2014). El potasio afectó de forma negativa la productividad. Escasos trabajos han considerado el efecto negativo del potasio incorporado con la CP sobre la productividad del cultivo de soja, lo que determina que estos resultados presenten gran relevancia respecto a lo reportado sobre los efectos del uso de CP.

En esta experiencia, el Mg^{2+} explicó los incrementos en biomasa de granos. Algunos trabajos han indicado que el SFC genera disminuciones de los contenidos de Mg^{2+} y aumento de Ca^{2+} y que esto se acentúa con el tiempo (Caires et al., 2011). Sin embargo, en este trabajo los cambios en los contenidos de Mg^{2+} se asociaron al uso de CP, por lo que se acentúa la importancia de evaluar en instancias futuras, la dinámica de Mg^{2+} ante el uso de dosis acumulativas de CP como enmienda. Por otro lado, el calcio tuvo un efecto positivo, debido a su influencia sobre la agregación del suelo. Hay que destacar que la biomasa de granos se incrementó ante la mayor estabilidad de agregados superficiales, y en presencia de mayor porcentaje de macroporos (Tabla 5.5), por lo cual, los aspectos físicos y agentes abióticos de agregación también fueron determinantes en los resultados productivos.

La productividad de grano alcanzada por soja sin tratamientos con CP y SFC, indica, como sugiere Zuil (2011), que variables ambientales como radiación y temperaturas, además de la genotípica, son las que definen en mayor medida el rendimiento de soja, y que la ganancia posible para prácticas de manejo como las estudiadas, que repercuten en mejoras fisicoquímicas, quedan sujetas a la disponibilidad hídrica.

La CP incrementó los recursos disponibles para el crecimiento de soja y los mismos fueron exacerbados con la labranza mínima. Todas las fracciones de la biomasa aérea fueron

superiores en LM en comparación con la SD. Sin embargo, se debe destacar que los resultados se obtuvieron en condiciones de secano y que es esperable que en condiciones de riego las respuestas productivas a la adición de enmienda se magnifiquen, lo que constituye una línea futura de investigación.

5.5. Conclusiones

El análisis realizado permite reconocer que el uso de cama de pollos y sulfato de calcio en suelos franco limosos si determina aumentos de la productividad de soja, en parte por mayor disponibilidad de nutrientes. Por otra parte, las condiciones estructurales como la porosidad y la estabilidad de los agregados modificadas por el uso de enmiendas y la labranza fueron las variables más importantes en la generación de biomasa, frutos y granos.

Capítulo 6

Conclusiones Generales

Los suelos de la llanura chaco-pampeana presentan gran diversidad, aunque en las áreas más productivas del norte de Santa Fe y este de Chaco predominan los de textura franco-limosa. Estos suelos presentan una disminuida estabilidad estructural (EAS) del horizonte superficial debido a la pérdida de carbono orgánico (COS) y de cationes de intercambio (calcio, magnesio y potasio). Estas pérdidas, que se asocian a la intensificación agrícola y a las características del ambiente subtropical, aceleran la degradación físico-química de los suelos, lo que conduce a una disminución de los rendimientos de los cultivos de la zona. En este marco es necesario encontrar prácticas tecnológicas que permitan revertir los procesos de degradación mencionados para mantener y aumentar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas. Dentro de la gran variedad de prácticas posibles, en la región es notable la disponibilidad de enmiendas orgánicas e inorgánicas, como la cama de pollos y el yeso agrícola. Sin embargo, la información respecto de sus efectos, ya sea cuando se usan solos o combinados, en suelos de ambiente subtropical, cultivados con diferentes sistemas de labranza es escasa. En este contexto se planteó esta tesis para valorar el uso de la cama de pollo y del yeso, por separado y en combinación, sobre la calidad físico-química del suelo y la productividad del cultivo de soja en dos sistemas de labranza: mínima y directa.

La aplicación de cama de pollo afectó diferencialmente las variables bióticas de suelo estudiadas. Los contenidos de carbono aumentaron, especialmente en las fracciones dinámicas y transitorias como los carbohidratos del suelo, y también en la forma de carbono orgánico particulado. Todas estas fracciones, especialmente el carbono orgánico particulado, tuvieron un efecto positivo sobre estabilidad de agregados del suelo, lo que corrobora la Hipótesis asociada al objetivo 1.

Dicho efecto se verificó independientemente del sistema de labranza utilizado. La adición de sulfato de calcio no afectó las fracciones de carbono del suelo, pero ejerció efecto positivo

sobre la estabilidad de agregados del suelo en la capa superficial del mismo. En las condiciones de estudio no se verificaron interacciones entre tipos y dosis de enmienda y sistema de labranza para las variables bióticas evaluadas.

La adición de ambas enmiendas mejoró la fertilidad química del suelo al aumentar el contenido de nutrientes (N, P) y de las bases de intercambio (Ca^{2+} , K^+ , Na^+) sin que ocurriera pérdida de Mg en profundidad ni aumento de la acidez de intercambio, lo que corrobora en parte la Hipótesis asociada al objetivo 2.

Entre los factores abióticos de suelo, los cationes K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (en ese orden) fueron los determinantes de la mayor estabilidad de agregados del suelo enmendado. La mayor importancia del K^+ en la estabilidad de agregados, hallazgo inesperado, se explicó porque la cama de pollo presentó un contenido elevado de K^+ , probablemente bajo la forma de compuestos orgánicos con K^+ . Sin dudas este aspecto merece el desarrollo de investigaciones específicas que ayuden a dilucidar en qué condiciones el K^+ supera a los cationes bivalentes como agente agregante del suelo y si ocurre con otras enmiendas.

El análisis realizado en el Capítulo 5 demostró que la mejora en la calidad físico-química del suelo se traduce en aumento de la productividad de la soja. Esto corrobora la Hipótesis asociada al objetivo 3.

El uso de cama de pollo y sulfato de calcio incrementó los contenidos de nutrientes (N, P), las fracciones de carbono y los cationes de intercambio. Como consecuencia de esto y de las labranzas, la estabilidad de agregados, la densidad aparente y la macroporosidad mejoraron notablemente, lo que ejerció gran influencia sobre los componentes del rendimiento.

Esta tesis confirma que la utilización conjunta de enmiendas orgánicas (cama de pollo) e inorgánicas (yeso) constituye una práctica tecnológica muy promisoría para mejorar las propiedades químicas y físicas de suelos de ambientes subtropicales, mejoras que se

traducen desde el inicio en aumento de la productividad del cultivo de soja en el corto plazo. Es esperable que un efecto similar se verifique con otros cultivos, lo que merece investigaciones adicionales.

6.1. Líneas de investigación futuras

En esta tesis se estudió la evolución en el corto plazo (10 meses) de parámetros químicos y físicos del suelo en respuesta a la adición de enmiendas. Por lo tanto, una futura línea de estudios debería incluir el estudio de la evolución de dichos parámetros a largo plazo, también la influencia del uso de otras enmiendas de disponibilidad regional, el estudio de las eficiencias de enmiendas sobre los cambios buscados y la realización de modelos que balance de carbono que permitan tener una proyección de los supuestos en el tiempo.

El efecto sobre otros cultivos, como maíz, trigo y girasol, de importancia regional, también es importante ya que comparten la rotación de cultivos con soja. A su vez dada la creciente deficiencias de micronutrientes que presentan los cultivos, es importante conocer el efecto de las enmiendas en su biodisponibilidad y el impacto económico de la inclusión de las prácticas

7.1. Bibliografía

Abiven S., Menasseri S. and Chenu C. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1-12.

Adeli, A., Brooks, J.P., Read, J.J., Feng, G., Miles, D., Shankle, M.W., Jenkins, J.N. 2019. Corn and soybean grain yield responses to soil amendments and cover crop in upland soils. *Journal of Plant Nutrition*, 42 (19): 2484-2497.

Adeli, A.S., Dabney, M., Tewolde, H., Jenkins, J.N. 2016. Effect of tillage and broiler litter on crop productions in an eroded soil. *Soil & tillage Research* 165: 198-209.

Adesodun, J.K., Mbagwua, J.S.C., Otib N. 2001. Structural stability and carbohydrate contents of an ultisol under different management systems. *Soil & Tillage Reserch* 60: 135-142.

Aguerre M., Denegri G. 1996. Deforestation in the chaqueña region in Argentina. En: PALO, M., Mery G. (eds.), *Sustainable forestry challenges for developing countries*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 275-288.

Aguilera, M.S., Borie, G.B., Milla P., Peirano P.V. 1987. Bioquímica de suelos derivados de cenizas volcánicas IV. Determinación de hidratos de carbono. *Agricultura técnica (Chile)* 47(3): 240-247.

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

Álvarez, R., Lavado R.S. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83: 127-141.

Amado, T.J.C., Bayer, C., Conceicao, P.C., Spagnollo, E., Costa de Campos, B.H., da Veiga M. 2006. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *J. Environ. Qual*, 35; 1599-1607.

Andrade, F.H., Sadras, V. 2000. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. EEA INTA Balcarce - Facultad de Ciencias Agrarias UNMP.

Andrade, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.* 41: 1-12.

Andrade, F.H., Sadras V.O. 2002. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, EEA INTA Balcarce – Facultad de Ciencias Agrarias UNMP, 2da edición.

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

Aoyama, M., Angers, D.A., N'Dayegamiye, A. 1999. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(2): 295-302.

Armstrong, A.S.B., Tanton, T.W. 1992. Gypsum applications to aggregated saline sodic clay topsoils. *J. Soil Sci.* 43: 249-260.

Bacigaluppo, S., Dardanelli, J., Gerster, G., Quijano, A., Balzarini, M., Bodrero, M., Andriani, J., Enrico, J., Martignone, R. 2006. Variaciones del rendimiento de soja en el sur de Santa Fe. Factores limitantes de clima y suelo. *Mercosoja 2006*. Rosario, pp. 27-30.

Baquero, J.E., Yacomelo, M., y Orduz-Rodriguez, J.O. 2018. Efecto del yeso sobre las características químicas de un Oxisol de la Orinoquia colombiana cultivado con lima ácida Tahití. *Temas Agrarios.* 23(2): 154-163.

Baldassini P., Paruelo, J.M. 2019. Deforestation and current management practices reduce soil organic carbon in the semi-arid Chaco, Argentina. *Agricultural Systems*. 178-102749.

Balzarini M., Bruno C., Córdoba M. y Teich I. 2015. *Herramientas en el Análisis Estadístico Multivariado*. Escuela Virtual Internacional CAVILA. FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. 201 p.

Barbieri, R.S., Gabioud, E.A., Wilson, M.G., Sasal, M.C., Seehaus, M., García-Tomillo, A., Silva, T.C., Montanari, R. 2023. Addition of amendments to restore a compacted soil under no-tillage system. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 45: 57540.

Bayer, C., Vieira, F.C.B., Zanatta, J.A., Mielniczuk, J., Six J. 2009. Building Up Organic Matter in a Subtropical Paleudult under Legume Cover-Crop-Based Rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1699-1706.

Bayer, C., Martin-Neto, L., Mielniczuk, J., Pillon, C.N., Sangoi, L. 2001. Changes in Soil Organic Matter Fractions under Subtropical No-Till Cropping Systems *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1473-1478.

Blake, G.R., Hartge, K.H. 1986. Bulk density, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods*, 2. ed. America Society of Agronomy, Madison, pp. 363-375.

Blum, J., Caires, E.F., Ayub, R.A., Ferreira Da Fonseca, A., Sozim M., Fauate, M. 2011. Soil Chemical Attributes and Grape Yield as Affected by Gypsum Application in Southern Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42: 1434-1446.

Bogaard, A., Fraser, R., Heaton, T., Wallace, M., Vaiglova, P., Charles, M., Jones, G., Evershed, R., Styring, A., Andersen N., Arbogast, R., Bartosiewicz, L., Gardeisen, A., Kanstrup, M., Maier, U., Marinova, E., Ninov L., Schäfer, M., Stephan, E. 2013.

Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers. Proceedings of the National Academy of Sciences 110 (31): 12589-12594.

Bolton, A., Studdert, G.A., Echeverría, H.E. 2004. Utilización de estiércol de animales en confinamiento como fuente de recursos para la agricultura. *Revista Argentina de Producción Animal*, 24: 53-73.

Bonel B., Denoia, J., Di Leo, N., Montico, S. 2015. Provincia de Santa Fe. 2:275-285. *En Casas R., Albarracín, G. (eds.). El deterioro del Suelo y del Ambiente en la Argentina. Tomo 21a ed. FECIC. Editorial Dunken. Buenos Aires. 550 pp.*

Bongiovanni M., Lobartini J. 2006. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma* 136: 660-665.

Botta, G.; Jorajuría, D.; Balbuena, R. y Rosatto H. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycinemax L.*) yields. *Soil and Tillage Research* 78: 53-58.

Bonel B., J. Denoia, N. Di Leo y S. Montico. 2015. Provincia de Santa Fe. 2:275-285. *En Casas R. y G. Albarracín (eds.). El deterioro del Suelo y del Ambiente en la Argentina. Tomo 2. 1a ed. FECIC. Editorial Dunken. Buenos Aires. 550 pp.*

Bowden, C.L., Evanylo, G.K, Zhang, X., Ervin, E.H., Seiler, J.R. 2010. Soil Carbon and Physiological Responses of Corn and Soybean to Organic Amendments. *Compost Science & Utilization*. 18(3): 162-173.

Bray, R.H., Kurtz L.T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59: 39-45.

Bremner, J., Keeney, D. 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Annal. Chem. Acta*. 32: 485-495.

Breyner G.P. Bertagnoli, José F. Oliveira, Graziela M.C. Barbosa, Arnaldo Colozzi Filho. 2020. Poultry litter and liquid swine slurry applications stimulate glomalin, extraradicular mycelium production, and aggregation in soils. *Soil and Tillage Research*. 202; 104657.

Bronick, C.J., Lal R. 2005. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil and Tillage Research*. 81(2): 239-25.

Buczko, U., Bens, O., Huttli, R.F. 2006. Tillage effects on hydraulic properties and macroporosity in silty and sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1998-2007.

Cabrera, A.L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. pp. 1-85: Parodi L. (ed.). *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Buenos Aires. Editorial Acme S.A.C.I.

Caires, E.F., Churka, S., Garbuio, F.J., Ferrari, R.A., Morgaño, M.A. 2006. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. *Sci. Agric.* 63: 370-379.

Caires, E.F., Barth, G., Fernando, G., Garbuio, J., Churka, S. 2008. Soil Acidity, Liming and Soybean performance under No-Till. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 65(5) 532-540.

Caires, E. F., Garbuio, F. J., Churka, S. Joris, H.A.W. 2011. Use of Gypsum for Crop Grain Production under a Subtropical No-Till Cropping System. *Agron. J.* 103:1804-1814.

Cambardella, C.A., Elliot, E.T. 1992. Organic changes across a grassland cultivation sequence. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.

Carrizo, M.E., Alesso, C.A., Cosentino, D. Imhoff, S. 2015. Aggregation agents and structural stability in soils with different texture and organic carbon contents. *Scientia Agricola*. 72(1): 75-82.

Chan K.Y., Van Zwieten, E.L., Meszaros, I., Downie, A. Joseph, S. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*.46: 437-444.

Conover, W.J. 1999. *Practical Nonparametric Statistics*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 428-433.

Cotrufo, M., Soong, J., Horton, A. Campbell, E., Haddix, M., Wall, D., Parton, W. 2015. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geosci* 8: 776-779.

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

Cosentino D.J., Pecorari C. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.

Cosentino, D., Conti, M., Giuffré, L. 2007. Forty years of soil degradation in vertic Argiudolls in Entre Rios province, Argentina. *Ciencia del suelo* 25(2):133-138.

Cruzate, J.L. 2008. *Suelos y ambiente de Chaco*. Instituto de Suelos, INTA. Castelar, Buenos Aires. AR. 2008.

Cuniberti, M., Herrero, R., Distéfano, S., Mir, L., Berra, O. y Macagno, S. 2006. Calidad industrial y sanitaria de la soja en la región núcleo sojera. Cosecha 2006/07. Información de Actualización Técnica, INTA Marcos Juárez, 7: 63-65.

Dardanelli, J., Balzarini, M., Martínez, M.J., Cuniberti, M., Resnik, S., Ramunda, S.F., Herrero, R. Baigorri, H. 2006. Soybean Maturity Groups, Environments and their Interaction define Mega-environments for Seed Composition in Argentina. *Crop Science* 46; 1939-1947.

De Battista J., y Arias N. 2016. Utilización de la cama de pollo como fertilizante en cultivos anuales, en suelos Vertisoles de Entre Ríos. En: *Cama de pollo en Entre Ríos: aportes*

para un mejor uso y manejo / Natalia Soledad Almada ... [et al.] ; coordinación y compilación de Juan Martín Gange.- 1a ed . – Concepción del Uruguay, Entre Ríos: Ediciones INTA, Libro digital, PDF. ISBN 978-987-521-772-0

De Orellana, J., Pilatti, M. 1994. La Estabilidad de Agregados como Indicadores edáficos de Sostenibilidad. *Ciencia del Suelo*, 2: 75-80.

Del Pino A., Repetto, C., Mori, C., Perdomo, C. 2008. Patrones de descomposición de estiércoles en el suelo. *Terra Lationoamericana* 26: 43-52.

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.

Díaz Zorita, M., Duarte, G.A., Grove, J.H. 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.

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. Robledo, C. 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

Dikinya, O., Mufwanzala, N. 2010. Chicken manure-enhanced soil fertility and productivity: Effects of application rates. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 1(3): 46-54.

Dos Passos, A.M.A., Milanez de Rezende, P., Carvalho, E.R., de Ávila, F.W. 2015. Biochar, farmyard manure and poultry litter on chemical attributes of a Distrophic Cambissol and soybean crop. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár. Recife*. 10(3): 382-388.

Draper, N.R., Smith, H. 1998. *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons Inc., New York, 3rd Ed

Edwards, D.R., Daniel, T.C. 1992. Environmental impacts of on-farm poultry waste disposal: A Review. *Bioresource Technol.* 41: 9-33.

Egli, D.B. 1998. Seed biology and the yield of grain crops. Wallingford, U.K.: 178 p.

Endale, D.M., Schomberg, H.H., Jenkins, M.B., Franklin, D.H., Fisher, D.S. 1998. Management implications of conservation tillage and poultry litter use for Southern Piedmont USA cropping systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 88: 299-313.

Favaretto, N., Norton, L. D., Joern, B., Brouder, S.M. 2006. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium affecting phosphorus and nitrogen in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1788-1796.

Favaretto, N., Norton, L.D., Brouder, S.M., Joern, B.C. 2008. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium effects on plant nutrition under conditions of intensive nutrient extraction. *Soil Science.* 173(2):108-118.

Fehr, W.R, Caviness, C.E. 1977. Stages of soybean development. Special report n° 80. Iowa State University of Science and Technology. 11 pp.

Felton, G. K., Hughes, J., Russek-Cohen, E. 2004. Water-extractable phosphorus reduction in poultry litter with calcium and iron-rich by product amendments. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.* 47(6): 2069-2077.

Ferreras, L., Gomez, E., Toresani, S., Firpo, I. Rotondo, R. 2005. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology.* 97: 635-640.

Foster, A.J. 2011. Long-Term application of poultry litter to improve soil aggregate stability under cool and warm season grasses. *Turkish Journal of Field Crops.* 16(2): 108-116.

Gabioud, E.A., Wilson, M.G., Sasal, M.C. Indelángelo, N. 2008. Análisis de la metodología de estabilidad de agregados de Le Bissonnais (1996) para diferenciar usos de suelos. XXII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes. San Luis. 7 p.

Gabioud, E.A., Sasal, M.C., Wilson, M.G., Seehaus, M., Van Opstal, N.V., Beghetto, S., Wingeyer, A.B. 2020. Addition of organic and inorganic amendments to regenerate the surface structure of silty soils. *Soil Use Manage.* 36: 449-458.

Gabriel, K.R. 1971. Biplot display of multivariate matrices with application to principal components analysis. *Biometrika*, 58: 453-467.

Galantini, J.A. 2008. Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. En: Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de Argentina. Galantini, J.A., (ed.). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, pp. 19-39.

Gambaudo, S., Zampar, A., Tomatis, L. y Quaino, O. 2001. Respuesta de la alfalfa a la aplicación de dos enmiendas calcáreas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur.* 12: 4-6.

Gascho, G. J., Hubbard, R.K., Breneman, T.B., Johnson, A.W., Sumner, D.R. Harris, G.H. 2001. Effects of Broiler Litter in an Irrigated, Double-Cropped, Conservation-Tilled Rotation. *Agronomy Journal.* 93:1315-1320.

Gascho, G.J., Hubbard, R.K. 2006. Long-term impact of broiler litter on chemical properties of a coastal plain soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61: 65-74.

Gee, G.W., Bauder, J.W. 1986. Particle-size Analysis. In: Klute A. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* 2° Ed. N° 9 Part 1 in Series Agronomy. SSSA. Pp: 383-411.

Gerster, G.J. 2008. "Compactación por tránsito de maquinarias en un Argiudol Típico". Tesis de maestría. Universidad Nacional De Rosario. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/7310>

[afb32c62918a032579030053e4a5/\\$FILE/Tesis%20MSc%20Guillermo%20Gerster%20UNR%202009.pdf](http://afb32c62918a032579030053e4a5/$FILE/Tesis%20MSc%20Guillermo%20Gerster%20UNR%202009.pdf).

Ghani A., Dexter, M., Perrott, K.W. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biology & Biochemistry*. 35: 1231-1243.

Ghosh, P.K., Ramesh, P., Bandyopadhyay, K.K., Tripathi, A.K., Hati, K.M., Misra, A.K., Acharya, C.L. 2004. Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping systems in vertisols of semi-arid tropics. I. Crop yields and system performance *Bioresource Technology*. 95: 77-83.

Gimenez, F., Luquez, J., Suarez, J.C. 2001. Stability and adaptability of soybean part of Buenos Aires province. *Rev. Fac. Agron., La Plata* 104(2): 93-103.

Giorgi, R., Tosolini, R., Sapino, V., Leon, C. Chiavassa, A. 2009. Capacidad productiva de los suelos de la provincia de Santa Fe. INTA-CR Santa fe, EEA Rafaela.

Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., Nelson, W.L. 2005. Sulfur, Calcium, and Magnesium. In: *Soil Fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. 7th ed. p. 219-243.

Haynes, R.J., Naidu, R. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 123-137.

He, Z., Tazisong, I.A., Senwo, Z.N., Zhang, D. 2008. Soil Properties and Macro Cations Status impacted by Long-Term Applied Poultry Litter. *Soil Science and Plant Analysis*. 39: 858-872.

He, Z., Honeycutt C., Griffin T., Cade-Menun B., Pellechia P., Dou Z. 2009. Phosphorus forms in conventional and organic dairy manure identified by solution and solid state P-31 NMR spectroscopy. *J. Environ. Qual.* 38: 1909-1918.

Henín, S., Gras, R., Monnier, G. 1972. El perfil cultural, el estallido físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Ed. Mundiprensa Madrid. 340pp.

Hepper E.N., Buschiazzo, D.E., Hevia, G.G., Urioste, A., Antón, L. 2006. Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents. *Geoderma* 135: 216-223.

Heredia, O.S., Giuffré, L., Gorleri, F.J., Conti, M.E. 2006. Calidad de los suelos del norte de Santa Fe. Efecto de la geomorfología y el uso de la tierra. *Ciencia del Suelo* 24(2): 109-114.

Idalgo, R.J., Botta, G.F, Tolón Becerra, A., Pozzolo, O.R., Dominguez, J.F. Serafini, E. 2014. Rastrojo de arroz (*Oryza sativa* L.) en sistemas de siembra directa: alternativas de manejo. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 46(2): 163-175.

Imhoff, S., Carrizo, M.E., Martel, R., Lotto, V y Zen, O. 2014. Efluentes líquidos de tambo: efectos de su aplicación sobre las propiedades físicas de un Argiudol. *Ciencia del suelo*, 32(2): 177-187.

Iriondo, M. 1993. Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America) *Geomorphology*. 7: 289-303.

Irruti L.A., Buschiazzo, D.E., Diaz Zorita, M. 2011. Acidification evidences of no-tilled soils of the central region of Argentina. *Ci. Suelo (Argentina)* 29(1): 13-19.

Izquierdo, N., Zuil, S. Effect of high temperature during grain filling on oil fatty acid composition of soybean. Sudáfrica. Durban. 2013. The World Soybean Research Conference.

Jackson, M.L. 1958. "Soil Chemical Analysis" Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

Jackson, W.A., Leonard, R.A., Wilkinson, S.R. 1975. Land Disposal of Broiler Litter-Changes in Soil Potassium, Calcium, and Magnesium. *J. Environ. Qual.* 4: 202-206.

Jakobsen, S.T. 1993. Interaction between Plant Nutrients: III. Antagonism between Potassium, Magnesium and Calcium. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B. Soil & Plant Science* 43(1).

Jastrow J.D., Miller, R.M., Lussenhop, J. 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 905-916.

Jian, Y., Lei, T., Shainberg, I., Mamedov A.I., Levy, G.J. 2003. Infiltration and Erosion in Soils Treated with Dry PAM and Gypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 630-636.

Johnson, R.A., Wichern, D.W. 1998. Applied multivariate statistical analysis. 4th Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Kingery, W.L., Wood, C.W., Delaney, D.P., Williams, J.C., Mullins, G.L. 1994. Impact of Long-Term Land Application of Broiler Litter on Environmentally Related Soil Properties. *J. Environ. Qual.* 23: 139-147.

Kloster, N., Avena, M. 2015. Interaction of humic acids with soil minerals: adsorption and surface aggregation induced by Ca²⁺. *Environmental Chemistry* 12(6): 731-738.

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods*, 2 ed. American Society of Agronomy, Madison, ch.26, pp. 635-660.

Kraemer F.B., Morrás, H., Fernández, P.L., Duval, M., Galantini, J., Garibaldi, L. 2021. Influence of edaphic and management factors on soils aggregates stability under no-tillage in Mollisols and Vertisols of the Pampa Region, Argentina, *Soil and Tillage Research*. 209-104901.

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

Le Bissonnais, Y., Duval, O., Gaillard, H. 2002. Mesure de la stabilité de sols pour l'évaluation de la sensibilité à la battance et à l'érosion. Fiche de protocole. INRA Orléans, Unité de Science du Sol.

Ledesma, L.L. 1973. Introducción al conocimiento de los suelos del Chaco. Convenio INTA–Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG-Chaco. Pte. Roque Saenz Peña, Chaco.

Lee, J., Hopmans, J.W., Roston, D.E., Baer, S.G. Six, J. 2009. Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 134: 251-256.

Lehrsch, G.A., Sojka, R.E. Jolley, P.M. 1993. Freezing effects on aggregate stability of soils amended with lime and gypsum. In: Poesen, J.W.A., Nearing, M.A. (Eds.), *Soil Surface Sealing and Crusting*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Germany, pp. 115-127.

Li, J.T., Zhong, X.L., Wang, F. Zhao, Q.G. 2011. Effect of poultry litter and livestock manure on soil physical and biological indicators in a rice-wheat rotation system. *Plant Soil Environ.* 57(8): 351-356.

Liu, A., Ma, B.L., Bomke, A.A. 2005. Effects of Cover Crops on Soil Aggregate Stability, Total Organic Carbon, and Polysaccharides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 2041-2048.

Lombardo, P., Pescio, F. 2011. Avance de la agriculturización en el noroeste argentino: el caso de la provincia de Santiago del Estero. [Disponible en: www.alasru.org/wp-content/uploads/2011/07/07-GT-Lombardo-Pescio.doc].

Lopes Scheid, A. 1991. Micronutrientes: Filosofias de aplicação, fontes, eficiência agrônômica e preparo de fertilizantes. p. 357-390. En: Ferreira, M.E. y M.C. Pessôa da Cruz (ed.) *Micronutrientes na Agricultura*. POTAFOS. Brasil.

López- Masquera M.E., Cabaleiro, F., Sainz, M.S., López- Fabal, A., Carral, E. 2008. Fertilizing value of broiler litter: Effects of drying and pelletizing. *Bioresource Technol.* 99: 5626-5633.

Lovelock, C.E., Wright S.F., Clark D.A. y Ruess R.W. 2004. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. *Journal of Ecology.* 92: 278-287.

Madias A., Di Mauro G., Vitantonio-Mazzini, L.N., Gambin, B.L, Borrás, L. 2021. Environment quality, sowing date, and genotype determine soybean yields in the Argentinean Gran Chaco, *European Journal of Agronomy.* 123(126217)

Maisonnave R., Lamelas K., Mair G. 2017. Buenas Prácticas de Manejo y Utilización de Cama de Pollo y Guano. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Ministerio de Agroindustria. 44 pp.

Marriott, E.E., Wander, M. 2006. Qualitative and quantitative differences in particulate organic matter fractions in organic and conventional farming systems, *Soil Biology and Biochemistry.* 38(7): 1527-1536.

Martínez, E.H., Fuentes, J.P.E., Acevedo, E.H. 2008. Soil organic carbon and soil properties. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8(1): 68-96.

Masud, M.M., Baquy, M.A.A., Akhter, S., Sen, R., Barman, A., Khatun, M.R. 2020. Liming effects of poultry litter derived biochar on soil acidity amelioration and maize growth. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 202:110865.

Mbah, C.N., Anikwe, M., Mbagwu, J.S.C. 2005. Effect of animal wastes on soil sodicity and sulphate concentration of an ultisol in south east Nigeria. *Nig Journ. of Soil Sc.* 15 (2): 93-100.

Micucci, F., Taboada, M.A. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) roots abundance in conventionally-and-zero-tilled soils in the humid Pampas of the Argentina. *Soil and Tillage Research.* 86: 152-162.

Mieres, L., Zuil, S. 2011. Consumo de agua por soja en siembra directa y convencional en un ambiente subtropical. *Quinto Congreso de Soja del Mercosur / Primer Foro de la Soja ASIA – Mercosur.* SP1.

Millán, G., Vázquez, M., Terminiello, A., Sbuscio, D.S. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la Región Pampeana. *Ci. Suelo (Arg).* 28(2): 131-140.

Miretti, M.C, Imhoff, S., Pires da Silva, A., Lavado, R. 2010. Soil structure degradation in patches of alfalfa fields. *Scientia Agricola.* 67(5): 604-610.

Moro E.C., Venialgo, C.A., Gutierrez, N.C., Drganc, D., Asselborn, A. Oleszczuk, J.D. 2004. Efecto de las Labranzas y Rotaciones sobre la compactación de suelos en distintos sistemas productivos de la Provincia del Chao- República Argentina. *Agrotecnia* 12: 1-6.

Morrás, H. 1995. Mineralogy and cation exchange capacity of the fine silt fraction in two soils from the southern Chaco Region (Argentina). *Geoderma* 64: 81-295.

Morrás, H., Moretti, L. 2009. Diferenciación geoquímica y mineralógica de suelos y sedimentos superficiales del Chaco Meridional, Argentina. ANCC. Córdoba, AR. Pp. 94.

Muneeer, M., Oades, J.M. 1989. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability.II. Field studies with ^{14}C -labeled straw, CaCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Australian Journal of Soil Research*. 27(2): 401-409.

Murphy, J., Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36.

Naramabuye, F., Haynes, R. 2005. Short-term effects of three animal manures on soil pH and Al solubility. *Australian Journal of Soil Research*. 44 (5) 515-521.

Natsher, M., Schwetnmann, N. 1991. Proton buffering in organic horizons of acid forest soils. *Geoderma*. 48: 93-106.

Novelli L.E., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma*. 167-168: 254-260. Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson, M.G., Sasal, M.C. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*. 195-196, 260-267.

Oades, J. M. 1992. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56: 377-400.

Ohno, T., Grunes, D.L. 1985. Potassium-magnesium interactions affecting uptake by wheat forage. *Soil Sci. Soc. of America Journal*. 49: 685.

Osinaga, N.A., Álvarez, C.R., Taboada, M.A. 2018. Effect of deforestation and subsequent land use management on soil carbon stocks in the South American Chaco. *SOIL*. 4: 251-257.

Page, A.L. 1982. Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties. 2° ed. (Part 2), in the series Agronomy. American Society of Agronomy, Inc. SSSA, Inc. Publisher, Madison, Wisconsin, USA, pp 1159.

Panigatti, J.L., Cruzate, G. Vivas, H. 2007. Suelos y ambientes de Santa Fe. [Disponible en: <http://inta.gob.ar/imagenes/santafe.jpg/view>].

Parra, R., Sosa, M.A. 2002. La soja y el girasol en el noreste argentino. Área de investigación en producción agrícola. INTA E.E.A. Reconquista. IDIA XXI – Revista de investigación y desarrollo agropecuario. 3: 41-47.

Paruelo, J.M., J.P. Guerschman, y S.R. Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso de suelo. *Ciencia Hoy*. 15(87).

Paytas, M., Martínez, G. Ortiz, M. 2005. Efecto del arreglo espacial de plantas de algodón en la absorción de nutrientes minerales y en el rendimiento. Resumen: A-024. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. Universidad Nacional del Nordeste.

Pearson, K. 1965. Some incidents in the early history of biometry and statistics 1890-1894. *Biometrika*. 52: 3-18.

Pitta, C, Adami, P., Pelissari, A., Assmann, T, Franchin, M., Cassol, L., Sartor, L. 2012. Year-round poultry litter decomposition and N, P, K and Ca release. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 36(3).

Ponette Q., Belkacem, S. Nys, C. 1996. Ion dynamics in acid forest soils as affected by addition of Ca fertilizers. *Geoderma*. 71: 53-76.

Pocknee, S., Sumner, A. 1997. Cation and nitrogen contents of each of organic matter determines its liming potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 86-96.

Provincia del Chaco (1975/2003). *Cartas de Suelos de la Provincia del Chaco*. Resistencia, Provincia del Chaco, República Argentina. Convenio: INTA – Provincia del Chaco.

Ragonese, A.E., Castiglioni, J.C. 1970. La vegetación del parque chaqueño. *Bol. Soc. Arg. Bot.* 11: 133-160.

Rakiya A., Lihan, S., Edward, R. 2015. Effects of short-term application of arbuscular mycorrhizal fungi and poultry manure on improvement of soil quality. *European Journal of Experimental Biology*. 5(8): 23-30.

Raut, Y.Y., Shedekar, V.S., Islam, K.R., et al. Soybean yield response to gypsum soil amendment, cover crop, and rotation. 2020. *Agric Environ Lett.* 5:e20020.

Ré, A.E., y Ferrer, J.L. 2016. Utilización de cama de pollo como fertilizante de pasturas y verdeos en Vertisoles de Entre Ríos. En: *Cama de pollo en Entre Ríos: aportes para un mejor uso y manejo* / Natalia Soledad Almada ... [et al.]; coordinación y compilación de Juan Martín Gange.- 1a ed. – Concepción del Uruguay, Entre Ríos: Ediciones INTA, Libro digital, PDF. ISBN 978-987-521-772-0

Rojas J, M., Roldan M.F, Guevara, G.S. 2015. Influencia de rotaciones en la calidad del suelo en la zona central del chaco y su relación con la producción de algodón. *Ciencia del suelo [online]*. 33(2). ISSN 1850-2067.

Rojas, J.M., Prause, J., Sanzano, G.A., Sánchez, M.C. 2016. Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. *Soil and Tillage Research* 155: 250-262.

Rojas, J.M., Buschiazzo, D.E., Arce, O.E.A. 2013. Parámetros edáficos relacionados con la erosión eólica en Inceptisoles de Chaco. *Ci. Suelo*. 31(1): 133-142.

Roldán, S., Lorenz, G., Bonelli, L. 2000. Aspectos de calidad de la materia orgánica del suelo en función del uso de la tierra en el Centro Este santiagueño. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Argentina. En soporte CD.

Rotondo, R., Firpo, I., Ferreras, L., Toresani, S., Fernandez, S., Gómez, E. 2009. Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y fertilizante nitrogenado sobre propiedades edáficas y productividad en cultivos hortícolas. *Horticultura Argentina*. 28 (66): 18-25.

SAGPYA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina. Dirección de Producción Agrícola). 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis e Suelos (SAMLA). Versión Electrónica. ISBN 987-9184-40-8.

Sainz Rozas, H., Echeverria, H.E. Angelini, H.P. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo* 29: 29-37.

Sainz Rozas, H., Echeverria, H., Angelini, H. 2012. Available phosphorus in agricultural soils of the pampa and extra-pampas regions of Argentina. *RIA* 38: 33-39.

Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Echeverría, H.E., Barbieri, P., Angelini H., Larrea G.E., Ferraris N., Barraco, M. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Simposio Fertilizar 2013. IPNI Cono Sur. 62-72.

Salgado E., Norambuena, M., Neaman, A., Schiappacasse, M.C. 2014. Effect of liquid humus and calcium sulphate on soil aggregation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 14 (3): 701-709.

Salvagiotti, F., Specht, J.E., Cassman K.G., Walters, D.T, Weiss, A., Dobermann, A. 2009. Growth and Nitrogen Fixation in High-Yielding Soybean: Impact of Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal*. 101(4): 958-970.

Salvagiotti, F., Collino, D.J., Peticari, A., Piccinetti, C., Ovando, G., Urquiaga, S., Racca, R.W. 2016. El aporte de la fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja en Argentina. Para mejorar la producción 54. INTA EEA Oliveros, pp 145-150.

Sasal, M.C., Andriulo, A.E. Taboada, M.A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*. 87(1): 9-18.

Sasal, M.C., Castiglioni, M.G., Wilson, M.G. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till Res*. 108: 24-29.

Sena, J.R.D.G., Ragagnin, V.A., Rodrigues Junior, S.A., de Lima Neto, P.M., Moraes Nogueira, P.D. 2014. Broadcast and band application of poultry litter on soybean crop. *Biosci. J., Uberlandia*. 30 (2): 811-818.

Singh, B., Sing, Y., Maskina, M.S., Meek, O.P. 1996. The value of poultry manure for wetland rice grown in rotation with wheat. *Nutr. Cycl Agreecosyst*. 47: 243-250.

Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 63: 1350-135.

Six, J., Elliott, E.T. y Paustian, K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*. 32: 2099-2103

Sousa, D.M.G., E. Lobato y M.A. Rein. 2005. Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado. Circular Técnica nº 32. Embrapa Cerrados. Embrapa

Singh R, Prasad R, Delaney DP, Watts DB. 2021. Does Soybean Yield and Seed Nutrient Content Change Due to Broiler Litter Application? *Agronomy*. 11(8):1523.

Sumner, M.E. 1990. Gypsum as an ameliorant for the subsoil acidity syndrome. University of Georgia. FIPR. Publication No 024-090. Pp 68.

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

Tisdall, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil Science*. 33: 141-163.

Valverde, A., Sarria, B., Monteagudo, J.P. 2007. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica* Año XIII, No 37. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 255.

Vance, E.D., Brookes, P.C. Jenkinson, D.S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*. 19(6): 703-707.

Varela, M.F., Fernández, P.L., Álvarez, C., Scianca, C., Rubio, G., Taboada, M.A. 2010. Propiedades físicas que varían por la incorporación de cultivos de cobertura en Hapludoles franco arenosos. En: *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario. [CD-ROM].

Vázquez, M. 2005. Calcio y Magnesio del suelo. Encalado y enyesado. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed. Echeverría H., García F. INTA, Cap. 8, 525 p.

Vázquez, M., Terminiello, A., Millán, G., Gussonisalu, A., Álvarez, J.M. 2007. Dinámica edáfica de correctores de la acidez y yeso aplicados superficialmente en un suelo bonaerense. FCAyF/UNLP. La Plata, Argentina. Universitat de les Illes balears 10 pp. [Disponible en https://www.uib.es/digitalAssets/178/178154_3.pdf].

Vázquez, M., Terminiello, A., Duhour, A., Guilino, F., García, M. 2009. Efectos del encalado sobre propiedades físicas de un suelo de la pradera pampeana. Asociación con propiedades químicas. *Ci. Suelo, Argentina*. 27(1): 67-76.

Vázquez, M.; Terminiello, A.; Casciani, A.; Millán, G.; Cánova, D.; Gelati, P.; Guilino, F.; García Díaz, J.; Kostiria, J. García, M. 2010. Influencia del agregado de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en ámbitos templados argentinos. *Ciencia del Suelo*. 28 (2): 141-154.

Vázquez, M.; Terminiello, A., Casciani, A., Millán, G., Cánova, D., Gelati, P., Guilino, F., Dorronzoro A., Nicora, Z., Lamarche, L., García, M. 2012. Respuesta de la soja (*Glicine max* L. Merr) a enmiendas básicas en suelos de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. *Ci. Suelo*. 30 (1): 43-55.

Venialgo, C.A., Gutierrez N.C., Gutierrez, J.R. 2004. Variables edáficas en diferentes sistemas de uso del suelo en el sudoeste chaqueño. Resumen: A-074. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. Universidad Nacional del Nordeste.

Venialgo, C., Gutierrez, N., Canteros, M.G. 2001. Caracterización de los niveles de nutrientes en suelos del dorsal agrícola chaqueño sometidos a labranza cero. Resumen: A-079. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. Universidad Nacional del Nordeste. [Disponible en <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2001/5-Agrarias/A-079.Vidal>]

Vidal, C.M., Aparicio, V. 2008. Evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de suelos provenientes del desmonte en el norte de Santa Fe. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Potrero de los Funes, San Luis. [En CD].

Vieira Fontoura, S.M., de Castro Pias, O.H., Tiecher, T., Cherubin, M.R., de Moraes, R.P., Bayer, C., 2019. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. *Soil Tillage Res*. 193: 27-41.

Vivas, H.S., Esperanza, V.E, Wuthrich A.F., Lacelli, G.A., Sosa, M.A. 1992. Proyecto de agricultura conservacionista para el noreste de Santa Fe. Características edáficas, climáticas y productivas. INTA Reconquista. Public. Miscelanea N° 10, pp. 20.

Vivas, H.S., Sosa, M.A. 1998. Labranzas conservacionistas para el norte de Santa Fe. En Siembra Directa. Editores: Panigatti J.L., Marelli, H., Buschiazzo, A., Gil, R. SAGPyA – INTA. Ed. Hemisferio Sur. 1° edición. 1998.

Vitti, G.C., Luz P.H, Leão H.C., Silva M.M. 1996 . Técnicas de utilização de cal-cáριο e gesso na cultura dos citros.In: Anais IV Seminario Internacional de citros, Sao Paulo, Brasil. Fundacao Cargill.p. 131-160

Volante, J.N., Paruelo, J.M., Vale, L., Morales, C., Suhring, S. 2009. Dinámica espacial y temporal de la deforestación en la región Chaqueña del Noroeste Argentino Período 1977-2007. Laboratorio de Teledetección y SIG, INTA EEA Salta. Poster. XIII° Congreso Forestal Mundial.

Wagner, S., Cattle, S.R., Scholten, T. 2007. Soil-aggregate formation as influenced by clay content and organic-matter amendment. J. Plant Nutr. Soil Sci. 170: 173-180.

Watts D.B., Torbert, H.A. 2009. Impact of Gypsum Applied to Grass Buffer Strips on Reducing Soluble P in Surface Water Runoff. J. Environ. Qual. 38: 1511-1517.

Watts, D.B., Torbert, H.A., Prior, S.A., Huluka, G. 2010. Long-Term Tillage and Poultry Litter Impacts Soil Carbon and Nitrogen Mineralization and Fertility. Soil Sci. Soc. Am. J. 74: 1239-1247.

Wood, B.H., Wood, C.W., Yoo, K.H., Yoon, K.S. Delaney, D.P. 2008. Nutrient accumulation and nitrate leaching under broiler litter amended corn fields. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 27: 2875-2894.

Wright, S.F., Upadhyaya, A. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*. 161: 575-586.

Wright, S.F., Upadhyaya, A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*. 198: 97-107.

Ybran R.G., Lacelli G.Á., E.A Gallard. 2018. La Cadena Avícola de carne en el norte santafesino. INTA Reconquista. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Ministerio de Agroindustria. 78 pp.

Zambrosi, F.B., Alleoni, L.R.F, Caires, E.F. 2007. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. *Nutr Cycl Agroecosyst*. 79: 169-179.

Zuil, S. 2011. Comportamiento de soja en tres campañas contrastantes en el norte de Santa Fe. Quinto Congreso de Soja del Mercosur / Primer Foro de la Soja ASIA – Mercosur. E6

Zuil, S., Izquierdo, N. 2012. Efecto de incrementos térmicos sobre el rendimiento de soja durante el llenado de granos. VI Congreso Brasileiro de Soja.