

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Tesis
Para optar al Grado Académico de
Doctor en Ciencias Agrarias

**PROPAGACIÓN LATERAL DE LA COMPACTACIÓN POR TRÁNSITO DE
LA MAQUINARIA AGRÍCOLA: ¿AFECTA LA CALIDAD DEL SUELO, EL
INTERCAMBIO GASEOSO Y LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS?**

Ing. Agr. María Josefina Masola

Director: Ing. Agr. (Dra.) Silvia Imhoff.

Co-Director: Ing. Agr. (Dr.) Carlos Agustín Alesso.

Comisión Asesora de Tesis:

Dra. Silvia Imhoff

Dr. Carlos Agustín Alesso

Dr. Miguel Ángel Taboada

Esperanza, Santa Fe

2020

INDICE

LISTA DE TABLAS	I
LISTA DE FIGURAS	II
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
Capítulo I.....	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
<i>Teoría del estrés</i>	1
<i>Teoría de la deformación</i>	3
<i>Distribución del estrés en el suelo</i>	4
<i>Influencia de la compactación sobre la degradación del suelo</i>	9
Hipótesis de Trabajo	18
Objetivo general.....	19
Objetivos específicos.....	19
Capítulo II.....	21
COMPACTACIÓN DEL SUELO EN SENDAS PERMANENTES DE TRÁNSITO Y ÁREAS DE CULTIVO	21
Introducción	21
Materiales y métodos	24
<i>Sitios de estudio</i>	24
<i>Diseño y tratamientos experimentales</i>	25
<i>Determinaciones</i>	27
<i>Análisis estadístico</i>	30
Resultados.....	31
<i>Aurelia</i>	31
<i>Videla</i>	38
Discusión	41
Conclusiones.....	44
Capítulo III	46
IMPACTO DEL PROCESO DE COMPACTACIÓN SOBRE INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO Y LAS EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO	46

Introducción	46
Materiales y Métodos.....	50
<i>Lugar de realización</i>	50
a) <i>Intervalo hídrico óptimo</i>	51
b) <i>Emisiones de óxido nitroso del suelo</i>	54
Resultados y discusión.....	59
a) <i>Intervalo hídrico óptimo</i>	59
b) <i>Emisión de óxido nitroso</i>	77
Conclusiones	86
Capítulo IV	88
IMPACTO DEL PROCESO DE COMPACTACIÓN DEL SUELO SOBRE LOS CULTIVOS	88
Introducción	88
Materiales y Métodos.....	91
<i>Características de los cultivos</i>	91
<i>Determinaciones</i>	93
<i>Análisis estadístico</i>	94
Resultados y discusión.....	95
<i>Rendimiento de cultivos</i>	95
<i>Biomasa radicular</i>	104
Capítulo V	110
DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES Y POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	110
BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	116
PUBLICACIÓN DERIVADA DE ESTA TESIS	133

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1. Caracterización física y contenido de carbono orgánico de los sitios en estudio.....	25
Tabla 2.2. Resumen de los distintos tratamientos en estudio.....	26
Tabla 2.3. Características de las máquinas cosechadoras utilizadas en cada sitio.....	27
Tabla 2.4. Rotaciones y equipamientos utilizados en la siembra en cada sitio.	27
Tabla 2.5. Fechas de siembra, cosecha y muestreo de suelo en los sitios en estudio.....	29
Tabla 2.6. Valores medios de compactación relativa y contrastes evaluados entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha de soja 2016/2017	33
Tabla 2.7. Valores medios de compactación relativa y contrastes evaluados entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha de soja 2017/2018.	36
Tabla 3.1. Caracterización química de los suelos en estudio.....	51
Tabla 3.2. Cronograma de labores y muestreos para la determinación de óxido nitroso en cada sitio experimental.....	55
Tabla 3.3. Coeficientes y parámetros de ajuste de la curva de retención hídrica del suelo para cada sitio experimental, momento, profundidad y posición de muestreo. CRH: $\theta = [\theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \psi)^n]^{(1-1/n)}]$	60
Tabla 4.1. Características de los cultivos en cada sitio experimental.....	92

LISTA DE FIGURAS

	Página
Fig.1.1. Componentes del estrés resueltos como componentes normales (σ) y tangenciales (τ). x,y,z representan los ejes cartesianos orientados (Adaptado de Koolen, 1994).....	2
Fig. 1.2. Diferentes patrones de deformación por los que un cuerpo A puede convertirse en B. (Adaptado de Koolen, 1994).	4
Fig.1.3. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las partículas del suelo. a) representación gráfica de una partícula del suelo. b) representación de las fuerzas resultantes (σ_n = estrés normal; τ =resistencia al corte o cizallamiento). (Adaptado de Hartge & Horn, 2016).....	5
Fig.1.4. Esquema del impacto del proceso de compactación sobre el suelo y el ambiente. Adaptado de Chamen et al. (2015b).....	13
Fig. 2.1. Localización geográfica de los suelos estudiados en la provincia de Santa Fe, Argentina.	24
Fig.2.2. Esquema de la ubicación de las sendas de tránsito permanente (STP), líneas de cultivos y posiciones de muestreo de suelo, plantas y raíces. Rectángulos grises representan: STP. Rectángulos rayados blancos y negros: plataformas de cosechadoras. Líneas verticales: líneas de cultivo; líneas verticales de color gris: posiciones de muestreo para determinar rendimiento. A, B, C y D: posiciones de muestreo de suelo. 1, 2, 3 y 4 representan posiciones de muestreo de biomasa radicular.....	30
Fig. 2.3. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la compactación de las sendas de tránsito permanente (STP) en Aurelia. A,B,C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes en la misma profundidad de muestreo indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).	32
Fig. 2.4. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha del cultivo de maíz 2016. A,B,C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes en la misma profundidad de muestreo indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).....	33

Fig. 2.5. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha del cultivo de soja 2016/2017 en la profundidad de suelo 100-200 mm. A,B,C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$).....	34
Fig. 2.6. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha del cultivo de soja 2017/2018 en la profundidad de suelo 0-100 mm. A,B,C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$).....	35
Fig. 2.7. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha del cultivo de trigo 2018. A,B,C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes en la misma profundidad indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$).	37
Fig 2.8. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la compactación de las sendas de tránsito permanente y la cosecha de distintos cultivos en Videla. Letras itálicas diferentes en la misma profundidad de muestreo indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$).	40
Fig. 3.1. Esquema de la ubicación de las sendas de tránsito permanente y la zona de cultivo sin tránsito en cada sitio experimental. Círculos negros representan las bases para la medición de óxido nitroso. STP: senda de tránsito permanente. NT: zona de cultivo sin tránsito de maquinaria. Rectángulo rayado blanco y negro representan los cabezales de las cosechadoras.	56
Fig.3.2. Intervalo hídrico óptimo luego de la compactación de las sendas de tránsito permanente (STP). Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en STP y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.	63
Fig.3.3. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de	

maíz 2016. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.....

64

Fig.3.4. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo soja 2016/2017. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.....

66

Fig.3.5. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo soja 2017/2018. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.....

67

Fig.3.6. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de trigo 2018. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT) 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.....

69

Fig.3.7. Intervalo hídrico óptimo luego de la compactación de las STP. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores

promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento..... 71

Fig.3.8. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de maíz 2016/2017. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento..... 73

Fig.3.9. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de girasol 2017. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento..... 74

Fig.3.10. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de maíz 2018. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento..... 75

Fig.3.11. Precipitaciones diarias (mm) registradas en cada sitio experimental durante el período de mediciones de óxido nitroso. Flechas grises indican fecha de instalación de las bases de las cámaras para la determinación de óxido nitroso. Flechas de color negro (punteada y rellena) indican fecha de primer y último muestreo respectivamente. Círculos indican fechas de muestreo en cada sitio experimental. 78

Fig.3.12. Temperatura del suelo y del aire ($^{\circ}\text{C}$) en cada fecha de muestreo y sitio experimental. Los círculos representan el valor medio y las barras el desvío estándar. 78

Fig.3.13. Evolución del contenido de N-NO_3 del suelo durante los

experimentos en Aurelia y Videla. Las barras representan el error estándar. En a) y b) * indica diferencias significativas entre tratamientos. T0: tratamiento control. T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 4 MPa al inicio del experimento. En c) y d) * indica diferencias significativas entre posiciones de muestreo. STP: sendas de tránsito permanente; NT: zona de cultivo no transitada. En e) y f) letras diferentes indican diferencias significativas en la interacción tratamiento*posición ($\alpha=0,05$; LSD Fisher). 80

Fig.3.14. Evolución del espacio poroso del suelo con agua (EPA, %) durante los experimentos en Aurelia y Videla. Las barras representan el error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$; LSD Fisher). 82

Fig.3.15. Emisiones de óxido nitroso ($\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) en sendas de tránsito permanente y zonas libre de tránsito en función de las fechas de muestreo en cada sitio experimental. Los cuadrados indican el valor medio de emisiones en cada posición de muestreo. Las barras representan el error estándar. STP: sendas de tránsito permanente; NT: zona de cultivo sin tránsito. *: indica diferencias significativas entre posiciones de muestreo en cada fecha ($\alpha=0,05$; LSD Fisher). 83

Fig.4.1. Rendimiento (Mg ha^{-1}), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de maíz 2016 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$). 96

Fig.4.2. Rendimiento (Mg ha^{-1}), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de soja 2016/2017 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$). 97

Fig.4.3. Rendimiento (Mg ha^{-1}), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de soja 2017/2018 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el

error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$). 98

Fig.4.4. Rendimiento ($Mg\ ha^{-1}$), número de espigas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de trigo 2018 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$). 99

Fig.4.5. Rendimiento ($Mg\ ha^{-1}$), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de soja 2015/2016 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$). 100

Fig.4.6. Rendimiento ($Mg\ ha^{-1}$), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de maíz 2016/2017 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$). 102

Fig.4.7. Rendimiento ($Mg\ ha^{-1}$), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de girasol 2017 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$). 103

Fig.4.8. Rendimiento ($Mg\ ha^{-1}$), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de maíz 2018 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el

error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$). 104

Fig.4.9. Biomasa radicular (equivalente masa de raíces en una masa de suelo de 1000 Mg ha⁻¹) por posiciones de muestreo. STP: senda de tránsito permanente. NT: zona de cultivo sin tránsito. Las barras representan el promedio por posición y las líneas verticales el intervalo de confianza del 95%. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$). 105

Fig.4.10. Esquema de la distribución de la biomasa de raíces en la profundidad de suelo 0-100 mm y de 100-200 mm. MSR: masa seca de raíces. 1 y 2 posiciones de muestreo en la senda de tránsito permanente; 3 y 4: posiciones de muestreo en la zona de cultivo no transitada..... 107

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

- α** , alfa.
 β , beta.
Ca, calcio.
CE, conductividad eléctrica.
CIC, capacidad de intercambio catiónico.
CR, compactación relativa.
CRH, curva de retención hídrica.
CV, coeficiente de variación.
 ΔC , variación en la concentración de N_2O .
 Δl , cambio en un segmento lineal de suelo.
 Δt , variación de tiempo.
EPA, espacio poroso lleno de agua.
 ϵ_x , componente de la deformación del suelo en el plano x.
 ϵ_y , componente de la deformación del suelo en el plano y.
 ϵ_z , componente de la deformación del suelo en el plano z.
FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
FC, fecha de cosecha.
M, fecha de muestreo.
FS, fecha de siembra.
P, fósforo extractable.
GEI, gases con efecto invernadero.
IHO, intervalo hídrico óptimo.
 l , segmento lineal de suelo.
Li, límite inferior del IHO.
LLWR, Least Limiting Water Range.
Ls, límite superior del IHO.
Mg, magnesio.
MO, Materia Orgánica.
MSR, materia seca de raíces.
MSS= masa de suelo seca.
 μ , media general.
n, número de repeticiones.
N-NO₃, nitrógeno de nitratos.
NT, zonas de cultivo permanente sin tránsito de maquinaria.
N total, nitrógeno total.
N₂O, óxido nitroso.
K, potasio.
PSH, peso de suelo húmedo.
 Ψ , altura de tensión de agua ; potencial agua.
PSS, peso de suelo seco.
PVC, policloruro de vinilo.
RP, resistencia a la penetración.
 ρ_a , densidad del agua.
 $\rho_{m\acute{a}x}$, densidad máxima de suelo.
 ρ_p , densidad de partículas.
 ρ_s , densidad aparente del suelo.
 ρ_{sc} , densidad crítica del suelo.
STP, sendas de tránsito permanente.
 σ , estrés normal total.
 σ' , estrés efectivo.
 σ_x , componente del estrés normal en el plano x.
 σ_y , componente del estrés normal en el plano y.
 σ_z , componente del estrés normal en el plano z.
Na, sodio.
TC, tránsito controlado de la maquinaria.
 τ , componente tangencial del estrés normal
 $\tau_{x,y}$, componente tangencial del estrés normal en el plano x,y.
 $\tau_{x,z}$, componente tangencial del estrés normal en el plano x,z.
 θ , contenido volumétrico de agua del suelo.
 θ_{CC} , contenido hídrico volumétrico en capacidad de campo.
 θ_{PA} , contenido hídrico volumétrico en 15% de porosidad de aeración.
 θ_{PMP} , contenido hídrico volumétrico en punto de marchitez permanente.
 θ_r , contenido volumétrico de agua residual.
 θ_{RP} , contenido hídrico volumétrico en 3 Mpa de resistencia a la penetración.
 θ_s , contenido volumétrico de agua en saturación.
 u , estrés neutral.
 u_a , presión de agua en los poros.
 u_{ai} , presión de aire en los poros.
X, factor saturación.
W, contenido gravimétrico de agua.

RESUMEN

En la provincia de Santa Fe los principales suelos destinados a la producción agrícola son Argiudoles. Estos suelos presentan su estructura degradada debido a la compactación por tránsito de maquinaria en condiciones de inadecuada humedad. Como consecuencia, sus propiedades físicas y la productividad de los cultivos se ven afectadas negativamente, lo que genera la necesidad de estudiar alternativas para reducir la superficie compactada de lotes agrícolas y regenerar su estructura. El tránsito controlado de la maquinaria (TC) es una práctica de manejo que reduce la superficie compactada y establece sendas de tránsito permanente (STP) y zonas libres de compactación (NT). El objetivo general de esta tesis fue generar información sobre la forma en que se transmite la compactación causada por el uso del TC y su efecto sobre las propiedades físicas, la emisión de gases de efecto invernadero y el rendimiento de cultivos agrícolas, tanto en las sendas de tránsito como en las zonas adyacentes a las mismas en suelos Argiudoles de textura franco-limosa. Para ello se llevaron a cabo ensayos experimentales a campo sobre suelos Argiudoles típicos. Los tratamientos consistieron en diferentes estados iniciales de compactación del suelo en las STP: T0: sin compactación, T1 y T2: compactados hasta alcanzar 2 y 4 MPa, respectivamente. Se determinó: compactación relativa, intervalo hídrico óptimo (IHO), emisión de óxido nitroso del suelo, rendimiento de cultivos y biomasa radicular en diferentes profundidades y posiciones relativas a las STP. Los resultados demuestran que existe una distribución tridimensional del estrés aplicado al suelo por el TC desde las STP hacia zonas aledañas. La evolución de la compactación relativa entre los diferentes tratamientos fue similar en el estrato superficial pero diferente entre sí en el estrato subsuperficial. Se observó mayor amplitud de los IHO y menores emisiones de óxido nitroso en NT respecto de STP. La respuesta de los cultivos varió con el tipo de cultivo, con el clima durante su desarrollo y con el grado de compactación relativa. Los mayores rendimientos se observaron en la NT. El grado de compactación alcanzado en las STP afectó la cantidad y la distribución de la biomasa radicular del cultivo de girasol, que limitó el crecimiento radicular al estrato superficial. Estos resultados demuestran que realizar un manejo eficiente del tránsito de la maquinaria permite disminuir la superficie compactada de los lotes agrícolas, lo que favorece la recuperación de la estructura del suelo en las zonas libres de tránsito.

Palabras clave: Tránsito controlado de la maquinaria, compactación relativa, intervalo hídrico óptimo, óxido nitroso, rendimiento, biomasa radicular.

ABSTRACT

In the province of Santa Fe the main soils for agricultural production are Argiudolls. These soils have poor structure due to the compaction caused by the machinery traffic in conditions of inadequate humidity. As a consequence, their physical properties and crop productivity are negatively affected, which creates the need to study alternatives of reducing the compacted area in the fields to regenerate their structure. Controlled traffic farming (TC) is a driving practice that reduces the compacted surface and establishes permanent traffic lanes (STP) and compaction-free areas (NT). The general objective of this thesis was to generate information about the way in which the compaction caused by the use of CT is transmitted, and its effect on the physical properties, the emission of greenhouse gases and the crops yield, both in the traffic lanes and in the areas adjacent to them in Argiudolls of loamy texture. For this, experimental field trials were carried out on two Argiudolls. The treatments consisted on different initial stages of soil compaction in the STP: T0: without compaction, T1 and T2: compacted until reaching 2 and 4 MPa, respectively. It was determined: soil relative compaction, optimum water range (IHO), nitrous oxide emission from the soil, crops yield and root biomass at different depths and positions relative to STP. The results show that there is a three-dimensional distribution of the applied stress to the soil from the STP to surrounding areas. The relative compaction evolution between the treatments was similar in the surface layer but different from each other in the subsurface layer. Greater amplitude of the IHO and lower nitrous oxide emissions were observed in NT compared to STP. Crop responses varied with the type of crop, with the weather during its development and with the degree of soil relative compaction. The highest yields were observed in NT. The degree of relative compaction achieved in STP affected the amount and distribution of the root biomass of sunflower, which limited the root growth to the surface layer. These results demonstrate that the efficient management of the machinery traffic allows the compacted area of agricultural fields to be reduced, which favors the recovery of soil structure in traffic-free areas.

Key words: Controlled traffic of machinery, relative soil compaction, optimum water range, nitrous oxide, yield, root biomass.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN GENERAL

El suelo es un cuerpo natural que comprende partículas minerales y materia orgánica, líquidos y gases, y se caracteriza por presentar horizontes que se distinguen del material inicial como resultado de aportes, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 2014). Desde el punto de vista físico, el suelo es un medio poroso, no rígido, trifásico y está formado por partículas que presentan gran complejidad en sus formas, tamaños y estructuras mineralógicas. Este concepto es importante para comprender el comportamiento mecánico del suelo (Reichert et al., 2010).

En general, la mecánica puede ser definida como el conocimiento de las fuerzas y movimientos de los materiales. La mecánica aplicada a suelos agrícolas (suelos estructurados) se refiere a las fuerzas que se aplican en el perfil del suelo (“pedon”), más específicamente en las capas estructuradas más superficiales, como resultado de las actividades tecnológicas, como las labranzas y el tránsito de la maquinaria (Fredlund & Rahardjo, 1993; Keller et al., 2013). Estas fuerzas generan diversas respuestas del suelo en términos de deformación. El tipo más común de deformación en suelos agrícolas causada por la maquinaria es la compresión (Koolen, 1994). Para comprender dicho proceso es necesario introducir conceptos básicos, que se enmarcan dentro de la llamada “stress-strain Theory” o Teoría de estrés-deformación del suelo.

Teoría del estrés

El comportamiento mecánico del suelo se puede describir por las fuerzas que actúan sobre él, considerándolo como un cuerpo tridimensional. Toda fuerza aplicada sobre el suelo debe ser relacionada a un área para que provea información respecto al proceso de deformación. Así, la fuerza aplicada al suelo por unidad de área se denomina

estrés (Horn & Lebert, 1994). La aplicación de un estrés puede transmitirse hacia el interior del suelo generando una deformación tridimensional de su volumen. Teniendo presente que el suelo es un cuerpo tridimensional, la aplicación de un estrés perpendicular a uno de sus planos se denomina estrés normal (σ , kPa), por lo que en total son tres componentes (“normal component”) denotados como σ_x , σ_y y σ_z , según el plano considerado. Por otro lado, a cada estrés normal le corresponde dos componentes tangenciales (“shear component”), que se denotan como τ (Horn et al., 1992). Por ejemplo, un estrés aplicado en el plano x tiene un componente normal σ_x y dos componentes tangenciales $\tau_{x,y}$ y $\tau_{x,z}$ (Fig.1.1.)

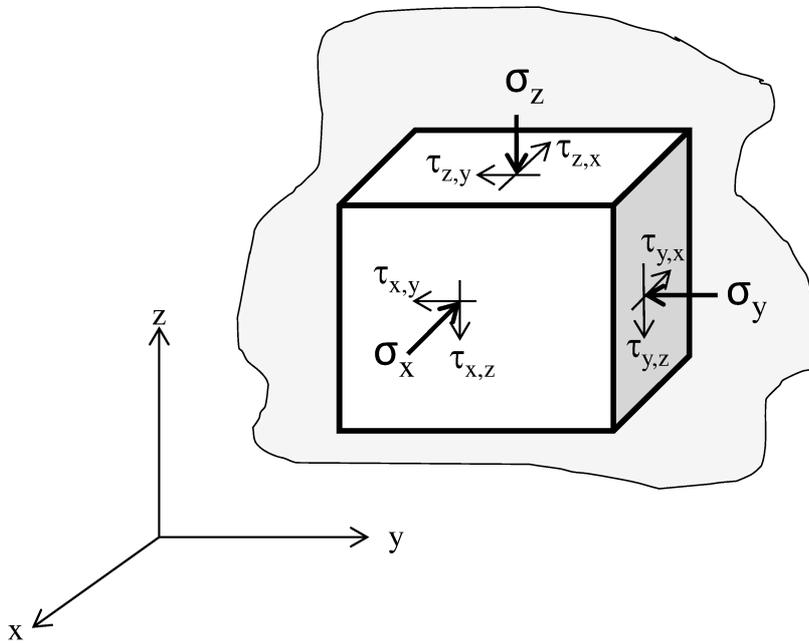


Fig.1.1. Componentes del estrés resueltos como componentes normales (σ) y tangenciales (τ). x, y, z representan los ejes cartesianos orientados (Adaptado de Koolen, 1994).

Los 9 componentes mencionados pueden resolverse mediante la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{x,y} & \tau_{x,z} \\ \tau_{y,x} & \sigma_y & \tau_{y,z} \\ \tau_{z,x} & \tau_{z,y} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

En condiciones de equilibrio $\tau_{x,y} = \tau_{y,x}$, $\tau_{x,z} = \tau_{z,x}$ y $\tau_{y,z} = \tau_{z,y}$, por lo que solo 6 componentes son necesarios para definir el estrés aplicado en un punto en todas las direcciones. Por otro lado, cuando se considera la aplicación de estrés en una dirección (perpendicular a la superficie del suelo) se considera el estrés normal (σ_z) y sus dos componentes tangenciales $\tau_{z,x}$ y $\tau_{z,y}$ (Reichert et al., 2010).

Teoría de la deformación

Con cada estrés aplicado al suelo se produce una cierta deformación (“strain”). Los componentes de la deformación del suelo son:

- Deformación normal (“normal strain”) del suelo: refiere al cambio en la longitud (por extensión o contracción) de un segmento lineal de suelo antes (l , m) y después de la deformación ($l+\Delta l$, m).

$$\text{Deformación normal} = \frac{\Delta l}{l}$$

La deformación normal también posee tres componentes que siguen las direcciones x , y , z , y que se definen como ε_x , ε_y y ε_z .

- Deformación de cizallamiento (shear strain), refiere a los cambios de ángulo que ocurren en las tres direcciones (x , y , z) respecto de un ángulo inicialmente recto (α , β), y se indican como ε_{xy} , ε_{xz} , ε_{yz} .

$$\text{Deformación de cizallamiento} = \frac{1}{2} (\alpha + \beta)$$

De forma similar a lo que ocurre con el estrés, el vector deformación también se puede resolver con una matriz de 9 componentes y su combinación da lugar a las diversas formas que adquiere un cuerpo cuando es sometido a un estrés (Fig.1.2.) (Koolen & Kuipers, 1983; Reichert et al., 2010).

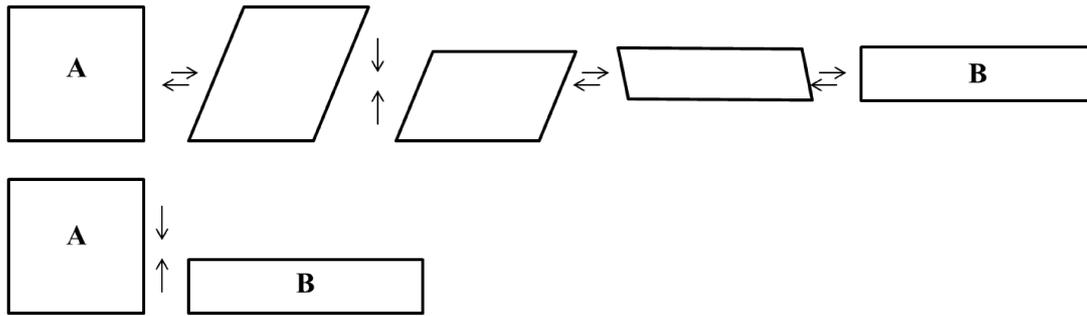


Fig. 1.2. Diferentes patrones de deformación por los que un cuerpo A puede convertirse en B. (Adaptado de Koolen, 1994).

Distribución del estrés en el suelo

La aplicación de las teorías estrés-deformación han permitido conocer los efectos sobre el suelo de la aplicación de cierto estrés, por la maquinaria y animales, sobre las propiedades y funciones del suelo (Keller et al., 2013). El estrés en el suelo depende del propio peso del suelo y las cargas externas aplicadas (Horn & Rostek, 2000). Cuando se aplica una presión en cierta superficie del suelo (ej. por neumáticos), ésta es transmitida en el volumen del suelo tridimensionalmente por las fases sólida, líquida y gaseosa, por lo que el efecto sobre las propiedades del suelo varía considerablemente desde el centro de aplicación, tanto en profundidad como lateralmente. Si la permeabilidad del suelo al aire es elevada o suficiente para permitir la deformación inmediata de los poros con aire, la densidad del suelo es alterada principalmente por el flujo del aire (Horn & Baumgartl, 1999). El contenido y el flujo del aire pueden ser interrumpidos por cambios en el contenido de agua o en la presión de los poros. Por lo tanto, la intensidad y la forma de transmisión de la carga son afectadas por la resistencia de la matriz del suelo a la deformación la que depende de la mineralogía y del contenido de materia orgánica.

La distribución de la presión en la fase sólida del suelo ocurre entre los puntos de contacto entre partículas y entre agregados, siendo su dirección variable ya que deriva de varios componentes que actúan sobre ellos (Hartge & Horn, 2016). Las fuerzas externas que actúan sobre cada partícula primaria del suelo y sobre los agregados son: (i) fuerza de la gravedad (peso propio de la partícula), (ii) fuerzas de cohesión y adhesión, (iii) fuerzas transferidas por partículas sólidas vecinas (fase sólida) y (iv) fuerzas transferidas por el movimiento de la solución del suelo (gradiente hidráulico) (Figura 1.3.).

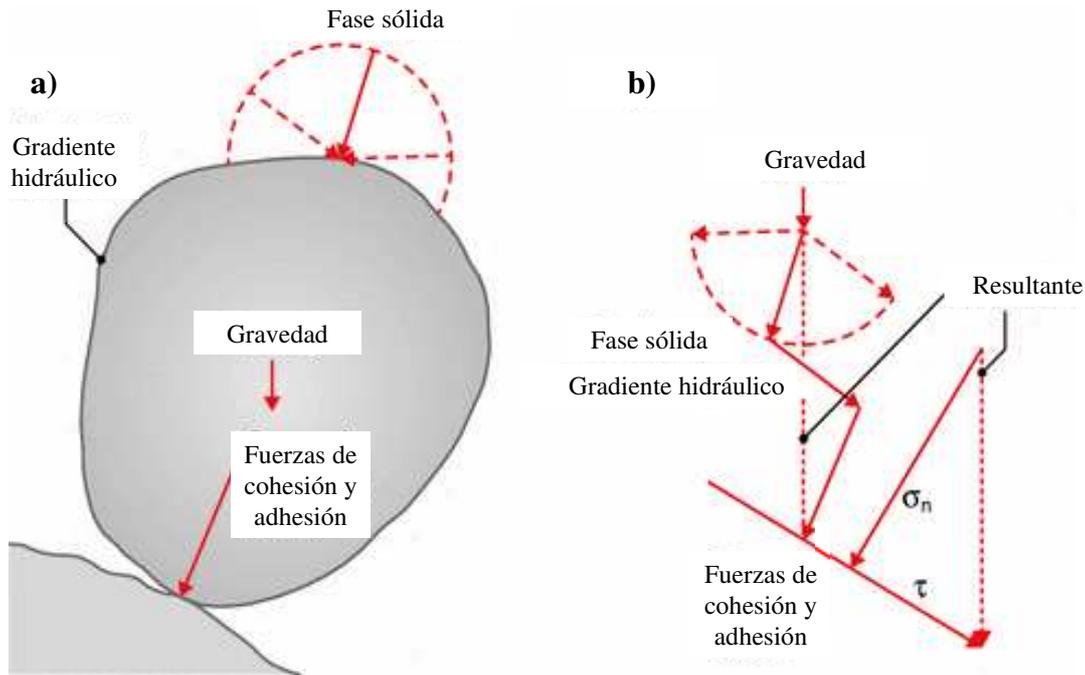


Fig.1.3. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las partículas del suelo. a) representación gráfica de una partícula del suelo. b) representación de las fuerzas resultantes (σ_n = estrés normal; τ =resistencia al corte o cizallamiento). (Adaptado de Hartge & Horn, 2016).

El vector resultante tiene una dirección que favorece el incremento de la densidad (Fig. 1.3. b), mientras que la resultante de las fuerzas de cohesión y adhesión, que actúan en sentido perpendicular a la superficie de contacto, favorecen la persistencia del estado actual de densidad del suelo.

Cuando la resultante no es anulada por las fuerzas contrarias, la partícula o el agregado no se encuentra en equilibrio y por lo tanto entra en movimiento con la dirección de la fuerza resultante. Los componentes que se oponen al movimiento son dos: uno con dirección al plano normal (σ_n) y otro tangencial (τ) (Fig. 1.3. b). Entonces, una partícula mineral o agregado mantiene su posición con respecto a las partículas vecinas, cuando los componentes de las fuerzas son suficientemente grandes para compensar la resultante de las fuerzas activas. En esta situación, la estructura se considera estable. Cuando se produce un movimiento de las partículas la estructura deja de ser estable, y vuelve a serlo cuando ocurre un nuevo acomodamiento de las mismas.

La distribución del estrés en las fases líquida y gaseosa es más compleja ya que la resultante de la fuerza se direcciona al punto con menor presión o tensión de agua. En general, se considera que el agua no es compresible. Como resultado, cualquier cambio de volumen del suelo en condiciones no saturadas es determinado principalmente por el movimiento de las partículas sólidas (cambio de posición, forma, reordenamiento), que es afectado principalmente por la presión de agua en los poros, mientras que en condiciones de suelo saturado el cambio de volumen es determinado por el movimiento del agua dentro de los poros (conductividad hidráulica). Por lo tanto, el número de variables para definir como el estrés actúa dentro del suelo depende del número de fases (sólida, líquida o gaseosa) involucradas (Reichert et al., 2010).

En condiciones de suelo saturado, el estrés normal total (σ , kPa) es dividido en estrés efectivo (σ' , kPa) y estrés neutral (u , kPa). El estrés efectivo es transmitido sólo por la fase sólida mientras que el estrés neutral es transmitido por la fase líquida, que es igual a la presión del agua dentro de los poros. Como resultado, el estrés efectivo que actúa dentro del suelo queda determinado por:

$$\sigma' = \sigma \pm u$$

En suelos no saturados, el estrés aplicado es transmitido dentro del suelo por las tres fases: sólida, líquida y gaseosa.

$$\sigma' = (\sigma - u_{ai}) + X(u_{ai} - u_a)$$

Dónde: u_{ai} (kPa) = presión de aire en los poros; u_a (kPa) = presión de agua en los poros; X = factor que depende del grado de saturación (cuando el suelo está saturado ($\psi = 0$ kPa), $X=1$; cuando el suelo está seco al aire, $X=0$) (Horn & Lebert, 1994).

Diversas relaciones (modelos) de estrés-deformación se han desarrollado para entender el proceso de cambio de volumen de suelo cuando se aplica un estrés basadas en las teorías mencionadas junto a las teorías de plasticidad y elasticidad (Kirby et al., 1999; Berli et al., 2003; Keller et al., 2014; Katja et al., 2019). Sin embargo, su uso para calcular con precisión dicho cambio continúa siendo difícil dado que el suelo no es

totalmente plástico ni elástico. Por lo tanto, cuando se aplica un estrés al suelo, por ejemplo la presión aplicada por la maquinaria agrícola, la deformación que se cause dependerá de las características de la maquinaria (carga, presión de inflado y tipo de neumáticos, velocidad, etc.) y de las características del suelo en ese momento.

En general se considera que la reacción del suelo cuando se aplica cierto estrés responde a tres tipos de sistemas: i) sistemas que no se deforman, ii) sistemas que se endurece con el tiempo, iii) sistemas que puede fluir.

En la situación del tipo i), la presión aplicada es inferior a la resistencia del suelo, por lo que éste no se deforma; la huella de tránsito de la maquinaria no es visible, no cambian las propiedades del suelo.

En la situación del tipo ii), la presión aplicada supera la resistencia del suelo y éste se deforma hasta alcanzar un estado en que su resistencia equipara la presión; la huella de tránsito es visible (el suelo se deforma debajo de la superficie), pero no ocurre cambio de volumen del suelo inmediatamente al costado de la huella.

En la situación iii), la presión aplicada supera notablemente la resistencia del suelo, por lo que el suelo fluye. En este caso la huella de tránsito alcanza la mayor profundidad y se observa el desplazamiento del suelo hacia los costados del neumático.

El proceso que describe los cambios ii) y iii), es decir la disminución de volumen del suelo por unidad de masa, debido a la aplicación de presiones externas o a cambios en la presión interna, se denomina compresión (Horn & Lebert 1994).

Las cargas externas que se aplican pueden ser estáticas (sin movimiento) o dinámicas, como la vibración, tránsito de maquinarias, el pisoteo animal en movimiento, por lo que la presión aplicada varía entre situaciones. Las presiones internas también varían ya que son definidas por la presión o la succión de agua causada por el gradiente hidráulico durante los ciclos de humedecimiento y secado, congelamiento y deshielo y la expansión-contracción del suelo (Horn, 1995).

En los suelos saturados, la compresión se denomina consolidación y depende del drenaje del exceso del agua del suelo de acuerdo a su conductividad hidráulica y gradiente hidráulico. En los suelos no saturados, la compresión se denomina compactación, en la cual parte del aire localizado en los poros del suelo es expulsado. La cantidad y velocidad con la que el aire es expulsado del suelo a la atmósfera depende de su permeabilidad al aire, continuidad de poros y al grado de saturación de agua en el perfil (Mossadeghi-Björklund et al., 2016).

La resistencia que opone el suelo a la disminución de volumen cuando éste es sujeto a una carga mecánica se denomina compresibilidad y se describe mediante la curva de deformación en función de la presión aplicada (Horn, 1995). Diversos métodos de evaluación de dicha curva han sido desarrollados. Entre los más comunes se encuentran el test de Proctor y el test de compresión uniaxial, a partir de los cuales se obtienen las curvas e indicadores como la compactación máxima, la susceptibilidad a la compactación y la capacidad de soporte de carga del suelo (Horn & Lebert, 1994; Micucci & Taboada, 2006; Álvarez et al., 2012; Imhoff et al., 2016).

La compactación máxima, también llamada densidad máxima, se puede determinar en laboratorio a través del test de Proctor y del test de compresión uniaxial. El primero consiste en aplicar una determinada cantidad de energía sobre una muestra de suelo con estructura perturbada con diferentes contenidos hídricos. Luego se relaciona la densidad del suelo obtenida en función del contenido de agua donde se observa un aumento de la densidad en función del contenido de agua hasta alcanzar un valor máximo. Este valor máximo se denomina densidad máxima de compactación del suelo, a partir de la cual la densidad del suelo disminuye con el incremento del contenido de agua de la muestra (Proctor, 1933).

El test de compresión uniaxial, aplicado en agronomía para el estudio de suelos, requiere el uso de un equipo denominado consolidómetro. Este equipo aplica sobre cada muestra de suelo con estructura no deformada, que tiene cierto contenido hídrico, una serie de presiones crecientes (ej. 50, 100, 300, 600, 1000 kPa). De esta forma se obtiene la curva de deformación (expresada como densidad del suelo o relación de vacíos) en función de la presión aplicada (Reichert et al., 2010). A partir de esta curva se derivan indicadores como la capacidad de soporte del suelo a la deformación y densidad de referencia que, por convención, se acepta que es la densidad del suelo obtenida cuando se aplica una presión de 200kPa. Esta densidad, llamada densidad de referencia, es considerada una densidad crítica dado que cuando los valores de densidad del suelo se aproximan o superan la densidad crítica se tornan limitantes para el desarrollo normal de las plantas dado que la calidad del suelo ha sido afectada (Håkansson, 2005).

En general los valores de densidad de referencia obtenida por la curva de compresión se aproximan a la densidad máxima obtenida por el test de Proctor, por lo que muchos autores utilizan la densidad máxima como referencia. La relación (cociente) entre la densidad real del suelo y la densidad de referencia se denomina grado de compactación del suelo. Esta relación brinda información útil para la caracterización del estado de compactación del suelo en respuesta a distintas prácticas de manejo en diferentes tipos de suelo (Aragón et al., 2000). Según Håkansson (2005), cuando el valor es inferior a 85 %, la calidad del suelo es adecuada para el desarrollo de los cultivos, mientras que cuando se supera el 88 % se torna muy limitante. Entre el 85 y 88 %, la respuesta de los cultivos depende principalmente del cultivo y de las condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo.

Durante el proceso de compactación, la aplicación de un estrés produce la expulsión del aire de los poros del suelo y el deslizamiento de las partículas del suelo en diferentes direcciones causando su reacomodamiento, la disminución de la cantidad y continuidad de los poros de mayor tamaño y como consecuencia, el incremento de la densidad. En este proceso, el agua constituye un agente lubricante entre las partículas facilitando su reacomodamiento. Como consecuencia, el proceso de compactación depende principalmente del contenido de humedad del suelo, de la textura, estructura y contenido de materia orgánica (Håkansson & Voorhees, 1998). El resultado del cambio del grado de compactación del suelo es la alteración de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que indirectamente afecta el desarrollo radicular y de la parte aérea de las plantas (Håkansson & Reeder, 1994; Horn, et al., 1995; Hamza & Andersson, 2005; Batey, 2009). Por estos motivos, la compactación es considerada una de las principales causas de degradación de los suelos agrícolas del mundo (Hamza & Anderson, 2005).

Influencia de la compactación sobre la degradación del suelo

La FAO ha definido a la degradación como un cambio en la salud del suelo que resulta en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios. Este proceso afecta la sustentabilidad de los sistemas agrícolas y la calidad medioambiental y disminuye la productividad del suelo (Lal, 1993). Las principales

causas de la degradación física, química y biológica del suelo son la erosión, salinización, lixiviación, la extracción de nutrientes sin reposición adecuada, la contaminación y la compactación (Gibbs & Salmon, 2015). Específicamente, la degradación física incluye pérdidas de espesor del suelo por erosión, degradación estructural, menor capacidad de almacenamiento de agua y reducción de los stocks de carbono y de nutrientes del suelo. En la actualidad se estima que aproximadamente dos billones de hectáreas en el mundo se encuentran degradadas y se prevé que para el año 2050 alrededor de dos tercios de las tierras agrícolas estarán afectadas por distintos procesos de degradación. La recuperación de estas áreas constituye una alternativa para el aumento de la producción sustentable de alimentos y la protección del ambiente (Matson et al., 1997).

En Argentina, la región pampeana es la principal área de producción de cultivos agrícolas extensivos. Los cultivos que se producen en esta región tienen como principal destino la exportación; entre ellos predominan los cultivos de soja [*Glicine max* L. (Merr.)], trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) (Díaz-Zorita et al., 2002). En general, estos cultivos son producidos sobre suelos Molisoles, con predominancia de Argiudoles y Hapludoles.

En la provincia de Santa Fe, los Argiudoles son suelos de textura franco-limosa y se caracterizan por ser muy vulnerables a la degradación física y escasamente resilientes (Sasal et al., 2006; Taboada et al., 2008). Esto se debe a que han perdido materia orgánica y cationes (Ca principalmente) y a su limitado potencial de expansión-contracción decurrente de la predominancia de la illita dentro de la fracción arcilla. Este tipo de arcilla confiere al suelo una limitada capacidad de agrietamiento durante los ciclos de humedecimiento-secado, por lo que presentan baja capacidad de regenerar su estructura (Sasal et al., 2006). Estas condiciones particulares de los suelos han contribuido a que la intensificación de los sistemas productivos acelere notablemente, sobre todo en las últimas décadas, el deterioro de sus propiedades (Díaz-Zorita et al., 2002; Micucci & Taboada, 2006; Heredia et al., 2006; Ferreras et al., 2007; Álvarez & Steinbach, 2009; Imhoff et al., 2010a; Revelli et al., 2010; Novelli et al., 2013; Ghiberto et al., 2015).

La reducción de la intensidad de labranza y la adopción del sistema de siembra directa fueron propuestas como alternativas de recuperación de la calidad física de los suelos (Reicosky & Saxton, 2005). En Argentina, la superficie en sistema de siembra directa es cercana a 30 millones de hectáreas (Antille et al., 2015b, Botta et al., 2013). En la provincia de Santa Fe el uso de este sistema se ha generalizado por sus múltiples ventajas: menor costo de implantación de los cultivos, mayor cobertura del suelo con rastrojos, reducción del escurrimiento superficial y de la erosión hídrica, incremento de la tasa de infiltración de agua y la conductividad hidráulica por el desarrollo de poros verticales continuos generados por las raíces de los cultivos, entre otras. Además, los residuos sobre la superficie permiten amortiguar el impacto de los rodados de los implementos agrícolas en el suelo (Li et al., 2007; Strudley et al., 2008; Soane et al., 2012). Por estos motivos el sistema de siembra directa ha contribuido a expandir la frontera agrícola. Sin embargo, este aumento del área sembrada sumado a la necesidad de realizar la siembra en fechas adecuadas ha impulsado el desarrollo de nueva maquinaria. Esta maquinaria se caracteriza por tener mayor dimensión, peso y capacidad de carga (Botta et al., 2006; Colombi & Keller, 2019). Como consecuencia, el suelo se expone a presiones crecientes que pueden aumentar la compactación, especialmente cuando el tránsito se produce en condiciones de suelo inadecuadas (Keller et al., 2019).

La compactación del suelo puede diferenciarse en superficial y subsuperficial (Flowers & Lal, 1998). La primera es principalmente dependiente de la presión específica (presión en la zona de contacto rueda/suelo) y, por lo tanto, del sistema de labranza (convencional, labranza reducida, siembra directa) y de las características de la maquinaria (distancia entre ejes, ancho de las neumáticos, etc.). La compactación subsuperficial es determinada fundamentalmente por la masa de los equipos (peso sobre cada eje) (Håkansson & Reeder, 1994; Jorajuría & Draghi, 1997; Botta et al., 2002; Botta et al., 2008; Botta et al., 2016). Por otro lado, la profundidad a la cual se manifiestan los efectos del tránsito de la maquinaria está relacionada con el número de pasadas y con el peso de los equipos (Danfors, 1994; Jorajuría & Draghi, 2000; Botta et al., 2006).

Numerosos trabajos han demostrado que los suelos Argiudoles y Hapludoles de la Pampa Ondulada se compactan como consecuencia del pasaje repetido de la maquinaria (Jorajuria & Draghi, 1997; Botta et al., 2006; Botta et al., 2010). Otros estudios han demostrado que, tanto en el sistema de labranza tradicional como en siembra directa, la compactación superficial en el centro de la huella aumenta con la intensidad de tránsito. Sin embargo, en profundidad los resultados no fueron consistentes, aunque hay que destacar que las variables evaluadas fueron diversas *e.i.* densidad de suelo y resistencia mecánica (Botta et al., 2004; Draghi et al., 2015).

El proceso de compactación es influenciado por factores relacionados con la maquinaria utilizada (Flowers & Lal, 1998; Botta et al., 2002; Botta et al., 2004; Hamza & Anderson, 2005; Botta et al., 2016) y por las propiedades intrínsecas del suelo, como la textura, el contenido de materia orgánica, el estado de compactación y humedad del suelo en el momento de pasaje de la maquinaria (Larson et al., 1980; Imhoff et al., 2004; Imhoff et al., 2016).

La compactación modifica propiedades físicas del suelo, tales como el tipo de estructura, la densidad aparente, la resistencia a la penetración, el volumen total de poros y la distribución del tamaño de los poros y su continuidad y, consecuentemente, la conductividad hidráulica y la permeabilidad al aire. Numerosos autores evaluaron el efecto de la compactación sobre dichas propiedades físicas de forma aislada (Flowers & Lal, 1998; Botta et al., 2004; Botta et al., 2006; Botta et al., 2007) relacionándolas en algunos casos con rendimiento de cultivos y/o con su crecimiento radicular. Sin embargo, las interacciones entre el contenido de agua y la densidad aparente sobre la resistencia y la aireación dificultan la interpretación de dichos resultados (Chen et al., 2014). El intervalo hídrico óptimo (IHO) fue un indicador propuesto por Letey (1985) para superar dichas limitaciones. Éste integra los efectos de la aireación del suelo, la resistencia a la penetración y la retención de agua de la matriz del suelo sobre el crecimiento de los cultivos en un parámetro único (Leão et al., 2006) y ha sido utilizado por diversos autores (Da Silva et al., 1994; Da Silva & Kay, 1997; Zou et al., 2000; Leão et al., 2006; Wilson et al., 2013; Chen et al., 2014).

Además, dado que la compactación presenta un efecto negativo sobre el sistema poroso (Reeve, 1953, Osunbitan et al., 2005; Sasal et al., 2006; Taboada et al., 2008; Imhoff et al., 2010a; Ghiberto et al., 2015) puede ocasionar la formación de sitios anaeróbicos que conllevan un aumento de producción de gases de efecto invernadero (GEI), como el óxido nitroso (N_2O) (Cosentino et al., 2013). Este gas contribuye al calentamiento global, razón por la cual en los últimos años la compactación de los suelos ha adquirido aún mayor importancia para la conservación del ambiente (Antille et al., 2015a; Oertel et al., 2016). Los procesos mencionados se muestran en la Fig.1.2.

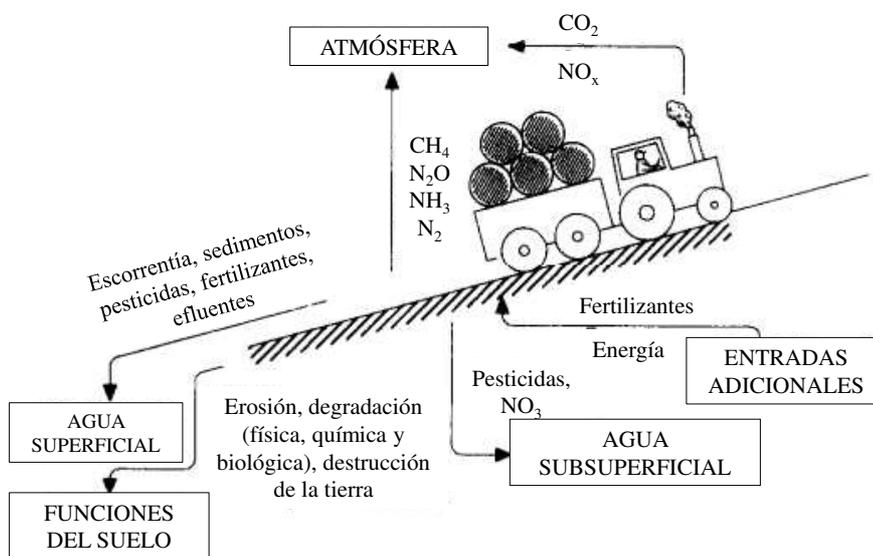


Fig.1.4. Esquema del impacto del proceso de compactación sobre el suelo y el ambiente. Adaptado de Chamen et al. (2015b).

Los suelos Argiudoles y Hapludoles de la pampa llana santafesina en general son planos o presentan pendientes muy reducidas, por lo que la escorrentía superficial y el transporte de sedimentos, fertilizantes y efluentes hacia cursos de agua superficial son procesos de escaso impacto; por el contrario, los contaminantes permanecen sobre la superficie del suelo cuando se encuentran saturados y luego infiltran lentamente pudiendo llegar a la capa freática, afectando su calidad.

Como resultado de la alteración del sistema poroso, se modifica la disponibilidad de aire, agua y nutrientes, y la resistencia mecánica, propiedades que afectan directamente el crecimiento de las raíces, por lo que se afecta negativamente el nivel de

producción de los cultivos (Letey, 1985). Numerosos trabajos han evaluado el efecto de la compactación sobre el rendimiento (Botta et al., 2004; Botta et al., 2006; Botta et al., 2010; Imhoff et al., 2010b; Imvinkelried et al., 2010, Tolón-Becerra et al., 2011). Estos estudios demuestran que la productividad de los cultivos disminuye con el aumento en la compactación del suelo y con la intensidad del tránsito de la maquinaria.

La compactación del suelo producida por el tránsito de la maquinaria agrícola es de compleja solución, por lo que resulta clave su prevención (Chamen et al., 2015b). Diversas alternativas han sido consideradas para reducir o evitar el efecto de la compactación (Hamza & Anderson, 2005; Jorajuría & Draghi, 2000). El uso de neumáticos con baja presión de inflado es una alternativa de prevención que disminuye el estrés aplicado al suelo, por lo que resulta efectiva para evitar la compactación superficial y la subsuperficial en el caso del uso de implementos traccionados por tractor (Ansorge & Godwin, 2007, 2008). Otras alternativas incluyen el uso de máquinas e implementos más livianos (reducción de la carga por eje), el incremento de la superficie de contacto neumático-suelo y la reducción del número de pasadas de la maquinaria agrícola. Botta et al. (2007) demostraron que la reducción de 60% de la intensidad del tránsito durante tres años permitió aumentar el rendimiento del cultivo de soja en 30% y reducir el consumo de combustible en 30% debido a la reducción de la compactación.

Otra opción es el uso de maquinaria agrícola automatizada con sistemas de precisión para evitar el tránsito sobre toda la superficie del suelo. Kroulík et al. (2009) determinaron que el 95% de la superficie de un lote agrícola puede experimentar al menos una pasada de maquinaria mientras que al utilizar un sistema de labranza mínima con piloto automático, esta superficie se reduce al 45% y, si a esto, se le adiciona el uso del sistema de tránsito controlado la superficie transitada se reduce a menos del 20%, pudiendo llegar a solo 10%.

El sistema de tránsito controlado de la maquinaria agrícola (TC) introduce el principio de no circulación al azar con la maquinaria dentro de los lotes (Hamza & Anderson, 2005; Chamen, 2005). El TC consiste en establecer dentro de los lotes sendas permanentes de tránsito, por lo que en dichas sendas el suelo se densifica e incrementa

su transitabilidad, entendiéndose a ésta como la capacidad del suelo para proporcionar la tracción adecuada para la maquinaria, soportar su peso y el tránsito de la misma sin causar compactación adicional o daño estructural. En el resto del lote, al no ser transitado, se mantienen las propiedades físicas del suelo presentes al momento del inicio de la práctica de tránsito controlado. Dichas propiedades mejoran con el tiempo si se realizan rotaciones de cultivos adecuadas, prácticas de manejo de los cultivos apropiadas y se utiliza el sistema de siembra directa (Campbell & O'Sullivan, 1991; Chamen, 2006; Botta et al., 2007; Tullberg et al., 2007; Kingwell et al., 2011; Gasso et al., 2014; McPhee et al., 2015; Antille et al., 2015b; Chamen, 2015a). Antille et al. (2015a) indicaron que el uso de TC permite mejorar la porosidad del suelo entre 5-70%, aumentar la infiltración del agua y la conductividad hidráulica, mejorar la estructuración y el contenido de materia orgánica. Además, la mejora en la porosidad del suelo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero entre 20-50%, aunque pueden incrementarse en las sendas de tránsito.

Bradford & Peterson (2010) indicaron que el TC debería iniciarse directamente sólo en suelos que presenten adecuada calidad física, mientras que aquellos suelos que presenten condiciones físicas inadecuadas deberían ser descompactados antes de iniciar el TC para permitir un mejor desarrollo radicular que facilite la posterior recuperación de la calidad física del suelo. El subsolado del suelo es una de las labranzas más utilizadas para descompactar la capa arable del suelo o una capa adensada ubicada inmediatamente debajo de la capa arable, que se conoce como piso de arado o piso de labranza. La remoción de la compactación de estas capas mediante subsolado es una práctica sencilla, mientras que si la compactación se propaga a horizontes ubicados por debajo del horizonte superficial resulta muy difícil de remover, por lo que puede ser considerada irreversible (Horn & Rostek, 2000). Según Bradford & Peterson (2010), si posterior a la descompactación del suelo se implementa el sistema de TC asociado al sistema de siembra directa con adecuada rotación de cultivos se logra una rápida recuperación de la calidad del suelo entre las sendas de tránsito. Por otro lado, el grado de compactación aumenta notablemente en las sendas de circulación (mayor capacidad portante del suelo), lo que facilita el tránsito de la maquinaria (mayor transitabilidad) (Li et al., 2007). El aumento de transitabilidad en las sendas permite la realización de las labores en condiciones de mayor humedad en el suelo (Imhoff et al., 2004; Imhoff et al., 2016). Por lo tanto, las actividades de siembra y cosecha, el control de plagas,

enfermedades y malezas se pueden realizar antes que en el sistema de tránsito al azar. Esto, en muchas ocasiones, representa la diferencia entre perder o tener la oportunidad de cosechar los cultivos.

A pesar de las ventajas del TC, algunos trabajos indican que los beneficios pueden depender de la intensidad del tránsito en las sendas. Jorajuria et al. (1997) aplicaron distintas intensidades de tránsito sobre una pastura y verificaron que la producción disminuyó en las sendas transitadas en función del número de pasadas y en general aumentó entre las sendas, aunque en algunas parcelas la producción de la pastura disminuyó hasta un metro de distancia de la senda. La disminución no fue función directa del número de pasadas ni del peso del tractor, por lo cual los autores indicaron que era necesario profundizar los estudios. Buttarelli (2008) estudió el efecto de aplicar varios grados de compactación sobre toda la superficie de las parcelas y sólo en las sendas de circulación de la maquinaria sobre el rendimiento de soja en Argiudoles del centro de Santa Fe. En este estudio se verificó que el rendimiento de soja decreció con el aumento de la compactación en las parcelas compactadas en toda la superficie y también decreció en aquellas parcelas con elevado grado de compactación en las sendas de circulación de la maquinaria. La autora indicó que la propagación de la compactación desde el centro de la senda de tránsito hacia los laterales pudo haber causado la disminución del rendimiento del cultivo.

Aunque algunos trabajos han demostrado que los cultivos poseen mecanismos para adaptarse a situaciones adversas sin disminuir el rendimiento, otros demostraron que grados de compactación elevados provocan reducción de la producción (Kay et al., 2006; Invinkelried et al., 2010; Imhoff et al., 2010b). Imhoff et al. (2010b) determinaron que tanto los parámetros de la parte aérea (tasa de transpiración, actividad fotosintética, área foliar y peso seco) como del sistema radicular (longitud, superficie, diámetro y peso) del cultivo de maíz respondieron diferentemente a las condiciones de compactación y humedad del suelo en función de la textura. Ramos et al. (2010) indicaron que características morfológicas de los ápices radiculares del cultivo de soja, como las células papilosas, diámetro de la radícula en expansión y malformaciones apicales de los pelos radiculares, fueron muy sensibles al grado de compactación en suelos Argiudoles de la región central de Santa Fe. En esta región y, en general, en toda

la región pampeana es posible encontrar diversos tipos de estructura de suelo que evidencian un elevado grado de compactación, con muy baja porosidad, especialmente en suelos que poseen elevado contenido de limo y escaso contenido de materia orgánica (Taboada et al., 2008; Álvarez et al., 2008). Por lo tanto, el uso del sistema de siembra directa en combinación con el sistema de TC podría ser una tecnología útil para disminuir o evitar la compactación en suelos de baja resiliencia como los mencionados.

Sin embargo, en Argentina aún no se ha generalizado el uso del sistema de TC (Antille et al., 2015b). Una de las principales razones que limitan la adopción de la práctica de TC es la necesidad de hacer modificaciones en la maquinaria para que todas tengan el mismo ancho entre los ejes y así puedan transitar sobre las mismas sendas. La otra razón son los estudios que presentan resultados contradictorios respecto del rendimiento de los cultivos en las líneas próximas a las sendas de tránsito. La teoría de estrés-deformación presentada en el inicio de este capítulo puede contribuir a explicar dichos resultados.

Si el tránsito de la maquinaria en las sendas se produce en condiciones en que el suelo se comporta según la situación de tipo ii) (la presión aplicada supera la resistencia del suelo y éste se deforma en profundidad) o según la situación tipo iii) (la presión aplicada supera notablemente la resistencia del suelo, por lo que el suelo se deforma en profundidad y hacia los costados), los efectos de la compactación sobre el desarrollo de los cultivos son sin dudas diferentes. La falta de información de los aspectos mencionados puede dificultar la adopción de esta práctica tecnológica (Gasso et al., 2013), especialmente en suelos franco-limosos a limosos de baja resiliencia, como los que se encuentran en gran parte de la provincia de Santa Fe.

Los conocimientos disponibles al presente (antecedentes) indican que:

a) el proceso de compactación depende de factores intrínsecos del suelo y extrínsecos (antropogénicos);

b) el suelo se compacta tanto por sucesivas pasadas de maquinaria más liviana o por menor número de pasadas de maquinaria más pesada;

c) la susceptibilidad a la compactación del suelo (también llamada índice de compresión) aumenta con el contenido de arcilla y/o limo y decrece con el aumento de densidad del suelo;

d) la transitabilidad (también conocida como capacidad portante) del suelo generalmente aumenta con el incremento de la densidad del suelo y contenido de arcilla,

e) la compactación se propaga en mayor proporción en profundidad que hacia los laterales de las sendas;

f) como consecuencia del proceso de compactación se altera el flujo de agua y aire en el suelo y aumenta la resistencia del suelo al crecimiento radicular;

g) los cultivos tienen cierta capacidad de adaptación a situaciones de estrés ocasionadas por condiciones inadecuadas de humedad, aeración y resistencia mecánica del suelo, pero superado el umbral crítico el crecimiento de las raíces y la producción de los cultivos resulta disminuida;

h) la utilización del sistema de siembra directa ha permitido detener y/o revertir la degradación de los suelos, pero en los franco-limosos a limosos no ha sido suficiente debido a la baja resiliencia que presentan;

i) Una de las técnicas recientemente propuesta en Argentina para reducir la superficie compactada es la adopción del sistema de TC. Sin embargo, aún es necesario generar conocimientos que avalen su efecto positivo sobre la calidad de los suelos y la producción de los cultivos.

Hipótesis de Trabajo

a) En suelos de textura franco-limosa el grado de compactación del suelo depende de la intensidad de tránsito acumulada y decrece desde el centro de las sendas de tránsito

permanente hacia las áreas adyacentes, por lo que la transmisión horizontal del estrés se limita a dicha senda de tránsito sin afectar las zonas aledañas.

b) El grado de compactación del suelo en las sendas de tránsito permanente y áreas adyacentes determina la magnitud del deterioro de la calidad estructural del suelo lo que resulta en la disminución del intervalo hídrico óptimo y el aumento de las tasas de emisión de óxido nitroso.

c) La compactación del suelo se reduce desde el centro de la senda de tránsito hacia los laterales condicionando el rendimiento y el desarrollo del sistema radicular de los cultivos.

d) Existe un umbral crítico de grado de compactación que favorece la transitabilidad en las sendas de tránsito sin afectar la productividad de los cultivos en las áreas adyacentes.

Objetivo general

Generar información sobre la forma en que se transmite la compactación causada por el uso del sistema de tránsito controlado (TC) y su efecto sobre las propiedades físicas y el rendimiento de cultivos agrícolas, tanto en las sendas de circulación como en las zonas adyacentes a las mismas, en suelos Argiudoles de textura franco-limosa.

Objetivos específicos

i) Evaluar el grado de compactación generado por el uso del sistema de TC al aplicar diversas intensidades de tránsito de la maquinaria agrícola, tanto en las sendas de circulación como en áreas adyacentes.

ii) Cuantificar propiedades físicas del suelo que afectan el desarrollo de los cultivos y el intercambio gaseoso en diversas posiciones relativas a las sendas.

iii) Evaluar el comportamiento morfológico y productivo de los cultivos presentes en la rotación en diversas posiciones relativas a las sendas.

iv) Determinar el umbral crítico de compactación del suelo que favorece la transitabilidad en las sendas de tránsito permanente sin que se reduzca la productividad de los cultivos en las zonas aledañas a dichas sendas.

Con el fin de responder los objetivos mencionados, el presente trabajo se organiza de la siguiente manera:

El **capítulo I** consiste en una introducción general, con la presentación del problema principal, el estado del arte del tema tratado con sus antecedentes y la justificación del trabajo. Se incluyeron además las hipótesis y los objetivos principales.

En el **capítulo II** se presentan los resultados sobre el grado de compactación que alcanzó el suelo luego de aplicar diversas intensidades de tránsito de la maquinaria agrícola, tanto en las sendas de tránsito permanente como en áreas adyacentes. Para ello, se midieron parámetros que caracterizan el estado y el grado de compactación del suelo, lo que comprendió determinaciones de textura, contenido de materia orgánica, densidad aparente y compactabilidad (densidad máxima).

En el **capítulo III** se presentan los resultados del efecto de la compactación sobre diversas propiedades físicas del suelo que afectan el desarrollo de los cultivos. Para ello se midieron parámetros relacionados con la dinámica hídrica (curva de retención hídrica y constantes hídricas), con la resistencia a la penetración de las raíces (curvas de resistencia a la penetración), con la calidad del suelo para el desarrollo de los cultivos (intervalo hídrico óptimo) y con el intercambio gaseoso (emisión de óxido nitroso) en diversas posiciones relativas a las sendas.

En el **capítulo IV** se presentan los resultados del efecto de la compactación del suelo sobre el comportamiento morfológico y productivo de los cultivos. Para ello se determinó su rendimiento y se evaluó el crecimiento radicular de los cultivos en diversas posiciones relativas a las sendas.

En el **capítulo V** se presenta la discusión general, las conclusiones y las implicancias prácticas que surgen de los resultados de la tesis.

COMPACTACIÓN DEL SUELO EN SENDAS PERMANENTES DE TRÁNSITO Y ÁREAS DE CULTIVO

Introducción

En los últimos años la extensión de la agricultura, la incorporación de maquinarias de mayor tamaño y peso (Keller et al., 2019) y el uso de diversas prácticas de manejo de cultivos (i.e. laboreo del suelo, tránsito aleatorio de la maquinaria agrícola, escaso uso de rotaciones de cultivos) han contribuido a la degradación de diversas propiedades físicas de los suelos agrícolas (Håkansson, 2005; Sasal et al., 2006; Tolón-Becerra et al., 2011) lo que afecta la productividad de los cultivos (Lipiec et al., 2003a; Imvinkelried et al., 2019).

El menor crecimiento y desarrollo de los cultivos se encuentran relacionados a condiciones físicas desfavorables (i.e. elevada resistencia del suelo y densidad aparente, reducida porosidad) provocadas por el proceso de compactación del suelo (Soane et al., 1981; Lipiec et al., 2003; Botta et al., 2018). Este proceso es considerado la principal causa de la degradación física de los suelos agrícolas del mundo y se atribuye principalmente al tránsito de maquinaria en condiciones de inadecuada humedad de suelo (Horn & Rostek, 2000).

Algunas de las propiedades que han sido utilizadas por numerosos autores para evaluar el estado de compactación del suelo son la densidad aparente y la resistencia del suelo (Silva et al., 1997; Tolón-Becerra et al., 2011; Botta et al., 2013). Sin embargo, para separar los efectos de las propiedades intrínsecas del suelo de los factores de manejo sobre la densidad aparente es necesario normalizar los valores de dicha propiedad (Carter, 1990; Håkansson, 2005). Por lo que relacionar la densidad aparente actual con la densidad máxima de compactación del suelo resulta un indicador útil para comparar el estado de compactación y la respuesta de los cultivos en diferentes tipos de

suelo (Eriksson et al., 1974; Håkansson, 1988; Aragón et al., 2000). Esta relación es comúnmente denominada compactación relativa del suelo y se expresa como porcentaje (%).

El test Proctor ha sido empleado por diversos autores para caracterizar la resistencia de los suelos agrícolas a la compactación (Soane et al., 1972; Pecorari et al., 1993; Aragón et al., 1996; Zhang et al., 1997) y es una de las metodologías utilizadas para obtener el valor de densidad máxima de compactación de un suelo. Éste consiste en aplicar una carga dinámica estandarizada sobre una muestra de suelo con estructura deformada en un rango amplio de contenidos hídricos del suelo (Hillel, 1980; Aragón et al., 2000).

La compactación relativa se encuentra afectada principalmente por la textura y el contenido de materia orgánica del suelo (Ekwue & Stone, 1995; Thomas et al., 1996; Aragón et al., 1996). Soane (1990) por su parte, estudió el efecto del contenido de materia orgánica sobre la compactabilidad del suelo y estableció una relación inversa entre ellos e indicó que se debe a que los suelos con mayor contenido de materia orgánica presentan mayor resistencia a la deformación y/o incremento en su elasticidad.

Por otro lado, Zhang et al. (1997) indicaron que el efecto de la materia orgánica sobre la compactación del suelo depende de las fracciones que componen dicha materia orgánica y de la textura del suelo ya que ésta condiciona su porosidad y la capacidad de retención de agua, lo que influye directamente en el contenido de materia orgánica. La influencia de estos factores sobre la compactación relativa del suelo depende además de las condiciones climáticas (i.e. temperatura y precipitaciones) y manejo del suelo (i.e. siembra directa, labranzas, rotación de cultivos) que influyen directamente en el contenido de materia orgánica de los suelos (Leirós et al., 1999; Ding et al., 2002).

Una alternativa para reducir la superficie agrícola compactada consiste en realizar un manejo eficiente del tránsito dentro de los lotes agrícolas. El sistema de tránsito controlado de la maquinaria agrícola (TC) (Tullberg, 2001; Chamen, 2015) establece dos zonas con diferentes condiciones de suelo: i) sendas de tránsito permanente que pueden o no ser sembradas y ii) zonas de cultivo permanente sin

tránsito de maquinaria. Por lo tanto, en estas últimas, los cultivos se desarrollan en condiciones óptimas para su crecimiento y se favorece la regeneración de la estructura mientras que en las sendas de tránsito el suelo presenta mayor resistencia mecánica lo que favorece la transitabilidad de la maquinaria (Hamza & Anderson, 2005; Tullberg et al., 2007). Sin embargo, el TC representa un concepto reciente para los productores agropecuarios de nuestro país por lo que en la actualidad la adopción es escasa (Antille et al., 2015b). Una razón de ello es que para adoptar este sistema de tránsito la maquinaria debe presentar anchos de trocha (i.e. distancia entre neumáticos) iguales entre sí y anchos de trabajos iguales o múltiplos entre sí (Chamen, 2015), requisitos que no cumplen las maquinarias agrícolas en Argentina.

Una primera aproximación a la adopción del TC consiste en alinear el tránsito de las maquinarias en una de las sendas de tránsito permanente (GRDC, 2004). De esta manera se logra reducir la superficie compactada (aunque a una superficie mayor a la del TC) sin la necesidad de modificar el ancho de trocha de la maquinaria disponible de cada productor.

Mientras que la mayoría de las investigaciones se han focalizado en estudiar cómo diferentes intensidades de tránsito de maquinaria y distintas prácticas de manejo afectan la compactación del suelo, el impacto del uso del TC sobre las propiedades físicas en las sendas de circulación y áreas adyacentes en suelos Argiudoles de textura franco-limosa de nuestro país no han sido evaluados. Esta temática tiene una trascendencia importante en los actuales sistemas agrícolas ya que permitirá conocer la transmisión de la compactación del suelo desde las sendas de tránsito permanente hacia zonas aledañas (sin compactación).

El objetivo del presente capítulo fue evaluar el grado de compactación del suelo generado al aplicar diversas intensidades de tránsito de la maquinaria agrícola en las sendas de tránsito permanente, tanto en dichas sendas como en áreas adyacentes. La hipótesis de trabajo fue que el grado de compactación del suelo depende de la intensidad de tránsito acumulada y decrece desde el centro de las sendas de tránsito permanente hacia las áreas adyacentes por lo que la transmisión horizontal del estrés se limita a dicha senda de tránsito sin afectar las zonas aledañas.

Materiales y métodos

Sitios de estudio

Los suelos utilizados en este estudio fueron dos Argiudoles típicos (Soil Survey Staff, 2014). Se encuentran localizados en el centro de la provincia de Santa Fe, uno en el departamento Castellanos, en la localidad de Aurelia ($31^{\circ}29'06.67''$ S y $61^{\circ}07'25.29''$ O) y en el departamento San Justo, en la localidad de Videla ($30^{\circ}54'41.46''$ S y $60^{\circ}37'35.26''$ O). Las series de suelo de cada sitio experimental corresponden a Rafaela y San Justo respectivamente. El clima del área es templado húmedo de llanura con precipitaciones anuales medias de 900 a 1200 mm y una temperatura promedio anual de 18°C (Mosconi et al., 1981). El relieve es plano, con pendiente menor al 0,5%.

Estos suelos han sido sometidos a rotaciones agrícolas y en la última década utilizados en siembra directa con rotaciones basadas en trigo (*Triticum aestivum* L.), soja [*Glycine max* (L.) Merrill], maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.)

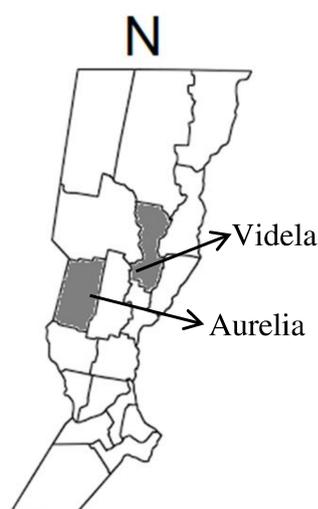


Fig. 2.1. Localización geográfica de los suelos estudiados en la provincia de Santa Fe, Argentina.

Las principales características de los suelos se encuentran en la Tabla 2.1. Inicialmente, en el área experimental de cada localidad, se extrajeron muestras de suelo ($n = 20$) de la capa superficial (0-250 mm en Aurelia y 0-200 mm en Videla) para determinar la distribución del tamaño de partículas con el método del densímetro (Gee

& Bauder, 1986) y el contenido de carbono orgánico a través de la oxidación con dicromato de potasio (IRAM-SAGPyA, 2007). Los datos correspondientes a los demás horizontes fueron tomados de los mapas de suelo de cada sitio con escala 1:50000.

Tabla 2.1. Caracterización física y contenido de carbono orgánico de los sitios en estudio.

Sitio	Horizonte	A	BA	Bt ₁	Bt ₂	Bt ₃	BC	C
Aurelia	Profundidad (mm)	0- 250	250- 400	400- 550	550- 850	850- 1100	1100- 1350	1350- 1600
	Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	1,57	0,90	0,51	0,37	0,24	0,17	0,11
	Arcilla (g kg ⁻¹)	26	28	38	41	33	31	29
	Limo (g kg ⁻¹)	72	69	59	57	65	68	66
	Arena (g kg ⁻¹)	2	3	2	2	2	1	5
Videla	Profundidad (mm)	0- 200	200- 320	320- 500	500- 740	740- 1008	1008- 1520	1520-
	Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	1,90	0,80	0,50	0,40	0,30	0,10	0,10
	Arcilla (g kg ⁻¹)	25	34	63	57	47	32	27
	Limo (g kg ⁻¹)	70	61	35	41	49	63	65
	Arena (g kg ⁻¹)	5	5	2	2	4	5	8

Diseño y tratamientos experimentales

Se estableció un experimento a campo de tránsito controlado de la maquinaria agrícola. Para ello, inicialmente se descompactó el área experimental con una labranza vertical (0-300 mm) para eliminar la influencia del estado de compactación inicial del suelo sobre las propiedades físicas y favorecer el crecimiento de las raíces de los cultivos y la regeneración de la estructura en las zonas de cultivo permanente sin tránsito de maquinaria (NT). Esta labranza se realizó el 15/08/2015 y el 25/08/2015 en Aurelia y en Videla respectivamente.

Los tratamientos consistieron en diferentes estados iniciales de compactación del suelo en las sendas de tránsito permanente (STP): T0, sin compactación, T1 y T2, las STP se compactaron con sucesivas pasadas de una máquina cosechadora hasta alcanzar 2 y 4 MPa respectivamente. Simultáneamente, para cuantificar el estado de compactación del suelo en las STP luego de cada pasada de la cosechadora se realizaron mediciones apareadas (n = 10, 0-250 mm de profundidad) de resistencia a la penetración (RP, MPa) con penetrómetro de campo digital (PNT-2000[®], DLG

Automação) y de contenido hídrico volumétrico (TDR, MPM 160-B). La compactación de las STP fue realizada el 10/12/2015 en Aurelia y el 03/12/2015 en Videla. En la Tabla 2.2. se presentan las características de los distintos tratamientos evaluados.

Tabla 2.2. Resumen de los distintos tratamientos en estudio.

Tratamiento	Labranza vertical	Compactación al inicio del experimento en las STP
0	Sí	No
1	Sí	Sí (hasta 2 MPa)
2	Sí	Sí (hasta 4 MPa)

STP: sendas de tránsito permanente

Las STP en el tratamiento T0 fueron establecidas durante la siembra del primer cultivo de la rotación luego de la descompactación del área experimental. Mientras que en los tratamientos T1 y T2 las STP fueron determinadas previamente por el paso de las máquinas cosechadoras durante la compactación. Independientemente de ello, todos los tratamientos fueron sembrados en la misma fecha y posteriormente recibieron el mismo manejo (siembra, fertilización y cosecha) respetando las STP por lo que quedaron definidas en cada unidad experimental zonas de cultivo transitadas (STP) y zonas de cultivo sin tránsito de maquinaria (NT).

Los tratamientos fueron establecidos por triplicado ($n = 9$) en un diseño en bloque completamente aleatorizado en parcelas de 40 m de largo por el ancho correspondiente al cabezal de la cosechadora utilizada en cada sitio experimental (5.6 y 9 m en Aurelia y Videla respectivamente). Las características de las máquinas cosechadoras utilizadas en cada sitio experimental se encuentran en la Tabla 2.3. La rotación agrícola utilizada en cada sitio y las características de los equipamientos utilizados para la siembra se encuentran en la Tabla 2.4. No se encuentran caracterizadas las máquinas pulverizadoras de cada productor ya que el control de malezas, plagas y enfermedades de cada cultivo se realizó desde el exterior de las parcelas experimentales (sin tránsito en el área experimental).

Tabla 2.3. Características de las máquinas cosechadoras utilizadas en cada sitio.

Sitio experimental	Aurelia	Videla
Modelo cosechadora	JD 1175	Class Tucano 470
Potencia (CV/kW)	181/133	327/240
Neumáticos delanteros	23.1-30	800/65 R 32
Neumáticos traseros	12.4-24	600/55 R 26.5
Ancho de trocha delantero (mm)	2190	3040
Ancho de trocha trasero (mm)	2276	3000
Presión de inflado neumáticos delanteros (kPa/PSI)	143/20	250/35
Presión de inflado neumáticos traseros(kPa/PSI)	206/28	172/24
Carga total (kN/Kg)	81,4/8300	127,5/13000
Carga eje delantero (kN/kg)	56,4/5762	82,8/8320
Carga eje trasero (kN/kg)	24,8/2538	44,6/4680
Carga por neumático delantero (kN/kg)	28,2/2881	41,4/4160
Carga por neumático trasero (kN/kg)	12,4/1269	22,3/2340
Presión media sobre el suelo por neumático delantero (kPa)	83,00	42,24
Presión media sobre el suelo por neumático trasero (kPa)	92,66	65,56

Tabla 2.4. Rotaciones y equipamientos utilizados en la siembra en cada sitio.

Sitio experimental	Aurelia	Videla	
Rotación	Maíz-Soja-Soja/Trigo	Soja-Maíz-Girasol/Maíz	
Tractor	Modelo	Pauny 250	Deutz Fahr AX4190
	Potencia (HP)	160	190
	Neumáticos delanteros	14.9x26	16.9x28
	Neumáticos traseros	23.1x30	24.5x32
	Peso (Mg)	5,6	5,4
Sembradora	Modelo	Maíz	Agrometal Mega TX 2235
		Agrometal TX 7	
		Soja/Trigo	
		Crucianelli Pionera 2917	

Determinaciones

Se colectaron muestras de suelo con estructura perturbada con pala para determinar la densidad máxima ($\rho_{\text{máx}}$) de cada suelo con el Test Proctor (ASTM, 1982). Para ello, se recolectaron un total de 27 sub-muestras en cada sitio ($n = 3$ por parcela, 0-200 mm de profundidad), se homogeneizaron y se dejaron secar al aire. Posteriormente, cada muestra compuesta se tamizó (Tamiz N°4; 4,75 mm) y se dividió en 6 bandejas por duplicado para asignarles de manera aleatoria contenidos crecientes de humedad.

Las muestras se dejaron equilibrar por 24 hs y cada una de ellas fue colocada en 3 capas dentro del cilindro Proctor (944 cm³, 2325 g). Cada capa de suelo recibió 25 golpes con martillo Proctor (2,5 kg, 304.8 mm altura de caída). Posteriormente se enrasó la muestra de suelo al contenido del cilindro Proctor y se pesó. Luego se tomaron por duplicado muestras de suelo del interior del cilindro para determinar su contenido hídrico gravimétrico. Para ello se registró el peso húmedo y se colocaron las muestras en estufa a 105°C hasta peso constante. El contenido hídrico gravimétrico (W , g g⁻¹) del suelo fue determinado con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{PSH - PSS}{PSS} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Dónde: PSH es el peso del suelo húmedo (g) y PSS es el peso del suelo seco (g).

A partir de la relación entre la masa de suelo húmeda y el contenido hídrico gravimétrico se determinó la masa de suelo seca (MSS, g). De la relación de la MSS y el volumen del cilindro Proctor se determinó la densidad del suelo (ρ , g cm⁻³) en cada uno de los diferentes contenidos hídricos. El mayor valor de ρ alcanzado en esta prueba corresponde a la $\rho_{\text{máx}}$ y su correspondiente contenido hídrico se denomina contenido de humedad del suelo de máxima compactación.

La densidad aparente de suelo ρ_s (Mg m⁻³) fue determinada en muestras de suelo con estructura no disturbada siguiendo la metodología propuesta por Blake & Hartge (1986). Para ello, se recolectaron muestras de suelo en cilindros de 50 x 50 mm ($n = 72$) en cada sitio experimental luego de la compactación de las STP (08/01/2016 en Aurelia y 11/01/2016 en Videla) y después de la cosecha mecánica de cada uno de los cultivos implantados desde diciembre de 2015 hasta diciembre de 2018. En la Tabla 2.5. se presenta un cronograma con las fechas de siembra y cosecha de los cultivos y las fechas de recolección de muestras de suelo.

Las muestras de suelo ($n = 648$) se llevaron a laboratorio, se enrasaron y posteriormente fueron procesadas para obtener las curvas de retención hídrica y de resistencia a la penetración (más detalles en el Capítulo III). Finalmente, las muestras se colocaron en estufa a 105°C hasta peso constante para determinar la MSS (g) y se

registraron tres medidas de altura y diámetro de cada cilindro para determinar su volumen. Relacionando la MSS (g) y el volumen del cilindro (cm³) de cada muestra de suelo se obtuvo su ρ_s (g cm⁻³ = Mg m⁻³).

Tabla 2.5. Fechas de siembra, cosecha y muestreo de suelo en los sitios en estudio.

Cultivos												
Aurelia	Maíz 2016			Soja 2016/2017			Soja 2017/2018			Trigo 2018		
	FS	FC	M	FS	FC	M	FS	FC	M	FS	FC	M
	7/1/16	2/8/16	2/12/16	8/11/16	15/4/17	21/6/17	8/11/17	18/4/18	5/6/18	6/6/18	19/11/18	8/02/19
Videla	Soja 2015/2016			Maíz 2016/2017			Girasol 2017			Maíz 2018		
	FS	FC	M	FS	FC	M	FS	FC	M	FS	FC	M
	3/12/15	30/8/16*	-	30/8/16	31/1/17	14/6/17	17/8/17	04/1/18	26/6/18	4/1/18	30/7/18	25/10/18

FS: fecha de siembra; FC: fecha de cosecha; M: muestreo de suelo. *Se simuló cosecha ya que se perdió el cultivo por inundación.

Las muestras de suelo fueron recolectadas a dos profundidades de suelo (0-100 y 100-200 mm) y en cuatro posiciones diferentes (A, B, C y D) en una línea transversal al sentido de avance de la maquinaria incluyendo zonas de cultivo transitadas (STP) y zonas de cultivo sin tránsito de maquinaria (NT). La posición A corresponde al centro de la STP, la posición B fue establecida aproximadamente a 200 mm de A hacia la entre-senda, por lo que dichas posiciones permitieron evaluar el efecto tridimensional de la transmisión del estrés en el suelo. La posición C estuvo ubicada a 20 mm del borde de la STP hacia la entre-senda, por lo que recibió principalmente la transmisión horizontal del estrés aplicado en las mismas por el tránsito de la maquinaria. La posición D corresponde a la zona de cultivo sin efecto del tránsito de maquinaria (NT). En la Fig. 2.2. se presenta un esquema donde se observan las distintas posiciones de muestreo de suelo en cada sitio experimental.

Posteriormente, la compactación relativa del suelo (CR, %) para cada posición y profundidad de muestreo fue obtenida con la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{\rho_s}{\rho_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Dónde: ρ_s , densidad del suelo (Mg m⁻³); $\rho_{m\acute{a}x}$, densidad máxima del suelo.

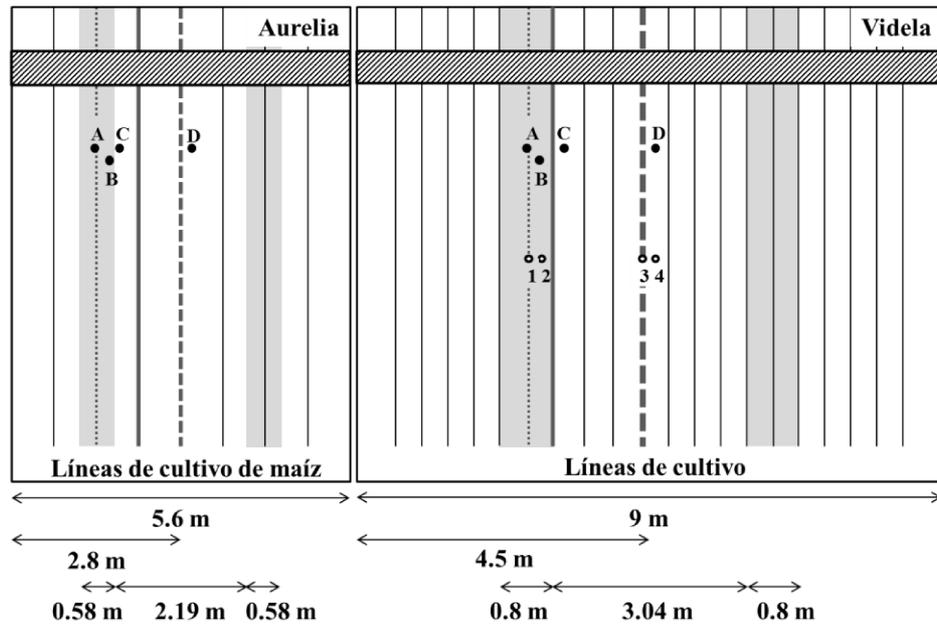


Fig.2.2. Esquema de la ubicación de las sendas de tránsito permanente (STP), líneas de cultivos y posiciones de muestreo de suelo, plantas y raíces. Rectángulos grises representan: STP. Rectángulos rayados blancos y negros: plataformas de cosechadoras. Líneas verticales: líneas de cultivo; líneas verticales de color gris: posiciones de muestreo para determinar rendimiento. A, B, C y D: posiciones de muestreo de suelo. 1, 2, 3 y 4 representan posiciones de muestreo de biomasa radicular.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2013). Para minimizar errores se utilizó el análisis correspondiente a un diseño en parcelas divididas en bloques completamente aleatorizados. Los datos de cada sitio experimental y las diferentes profundidades de muestreo se analizaron por separado. Para ello se ajustó el siguiente modelo lineal mixto:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \rho_k + \delta_{ik} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk} \quad i = 1, \dots, a \quad j = 1, \dots, b \quad k = 1, \dots, r$$

Dónde: y_{ijk} es la k -ésima respuesta del i -ésimo tratamiento medido en la j -ésima posición de muestreo; μ es la media general; α_i el efecto de la i -ésimo tratamiento; ρ_k es el efecto del k -ésimo bloque; δ_{ik} es el error aleatorio asociado a las parcelas principales, i.e. interacción entre tratamiento y bloque $\delta_{ik} \sim N(0, \sigma^2_{\delta})$; β_j es el efecto fijo de la j -ésima posición de muestreo; $(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre

tratamiento y posición de muestreo; y e_{ijk} el error aleatorio asociado a la sub-parcela, $e_{ijk} \sim N(0, \sigma_e^2)$.

Por otro lado, cuando se encontraron efectos significativos, las medias de los tratamientos, posiciones de muestreo y su interacción fueron separadas mediante el Test LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

Resultados

Los valores de $\rho_{\text{máx}}$ fueron $1,58 \pm 0,03$ y $1,62 \pm 0,05$ Mg m⁻³ en Aurelia y Videla. Éstos fueron alcanzados con similares contenidos de humedad del suelo ($0,25$ g g⁻¹ y $0,26$ g g⁻¹ en Aurelia y Videla respectivamente).

El contenido de humedad a capacidad de campo en los primeros 200 mm de suelo fue de $0,31$ cm cm⁻³ en Aurelia y $0,29$ cm cm⁻³ en Videla. Para constituir los distintos tratamientos, la compactación inicial del suelo en las STP fue realizada con un contenido de humedad próximo a capacidad de campo ($0,29$ y $0,28$ cm cm⁻³ en Aurelia y $0,25$ cm cm⁻³ y $0,26$ cm cm⁻³ en Videla a los 0-150 mm y 150-250 mm de profundidad respectivamente).

Los resultados de cada sitio experimental se presentan por separado respetando la cronología de muestreo en cada uno de ellos.

Aurelia

En las figuras 2.3. y 2.4. se presenta la relación entre la CR y los diferentes tratamientos y posiciones de muestreo en dos diferentes momentos i) luego de la compactación de las STP (Fig.2.3) y ii) luego de la cosecha del cultivo de maíz 2016 (Fig.2.4). En ninguno de los dos momentos de muestreo se encontraron efectos significativos en la interacción tratamiento*posición de muestreo ($p>0,05$) en las dos profundidades de suelo en estudio (0-100 y 100-200 mm) por lo que dichas fuentes de variación se evaluaron por separado.

Independientemente de los tratamientos, las posiciones y el momento de muestreo se obtuvieron mayores valores de CR en la profundidad 100-200 mm. Sin embargo, sólo se observaron diferencias estadísticamente significativas entre posiciones de muestreo en las dos profundidades ($p=0,01$ a 0-100 mm y a 100-200 mm).

La posición A presentó los mayores valores de CR en ambas profundidades y momentos de muestreo mientras que los menores se observaron en la posición D (Fig.2.3 y Fig. 2.4). Por su parte, las posiciones B y C presentaron valores intermedios entre A y D, aunque en la profundidad 0-100 mm sólo se diferenciaron de la posición D. Mientras que en la profundidad 100-200 mm la posición B sólo se diferenció de la posición D y C sólo fue diferente de A (Fig. 2.3. y 2.4.).

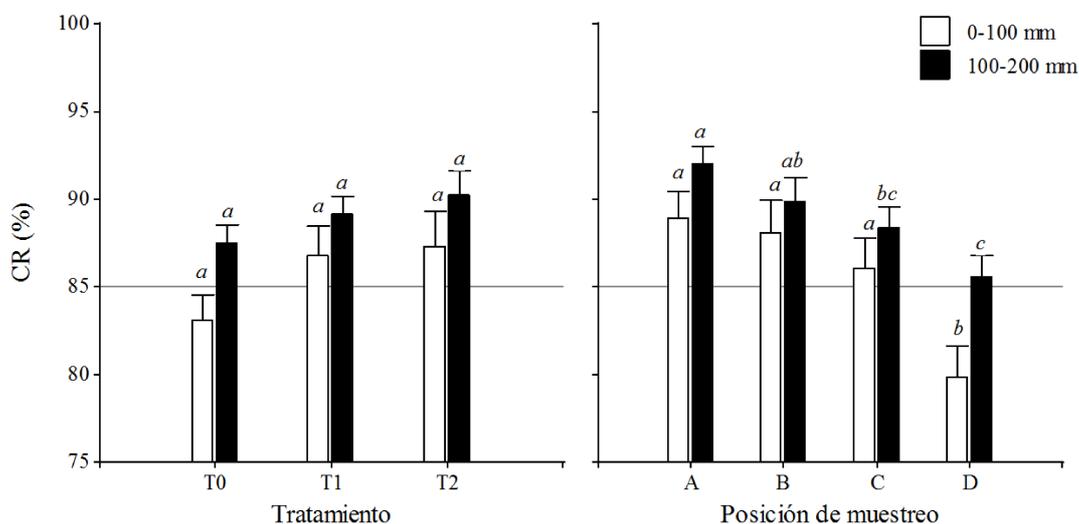


Fig. 2.3. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la compactación de las sendas de tránsito permanente (STP) en Aurelia. A, B, C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes en la misma profundidad de muestreo indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

Además, se observó que independientemente de los tratamientos, las posiciones de muestreo y las profundidades de suelo evaluadas los valores de CR fueron en promedio aproximadamente 3% mayores luego la cosecha del cultivo de maíz (Fig. 2.4.).

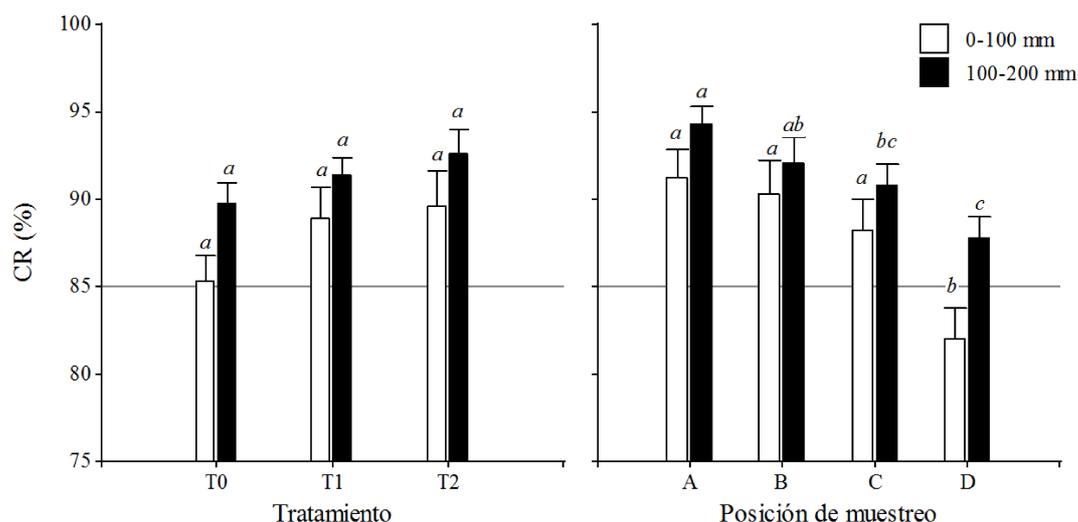


Fig. 2.4. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha del cultivo de maíz 2016. A, B, C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes en la misma profundidad de muestreo indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

Luego de la cosecha de soja 2016/2017, se observó interacción significativa entre tratamiento y posición de muestreo en la profundidad de suelo 0-100 mm ($p=0,04$). Estos efectos se presentan en la Tabla 2.6. Por otro lado, en la profundidad 100-200 mm sólo se observaron diferencias significativas entre posiciones de muestreo ($p=0,01$; Fig. 2.5.).

Tabla 2.6. Valores medios de compactación relativa y contrastes evaluados entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha de soja 2016/2017.

Posición de muestreo	Tratamiento	CR (%)	
A	T0	94,77±0,64	<i>ab</i>
B	T0	90,28±1,61	<i>bc</i>
C	T0	84,44±1,88	<i>d</i>
D	T0	83,99±1,08	<i>d</i>
A	T1	94,51±0,93	<i>ab</i>
B	T1	94,83±0,47	<i>a</i>
C	T1	94,92±0,56	<i>a</i>
D	T1	87,42±1,05	<i>cd</i>
A	T2	95,86±1,35	<i>a</i>
B	T2	95,78±0,56	<i>a</i>
C	T2	94,62±3,58	<i>ab</i>
D	T2	85,29±0,58	<i>d</i>
Contraste	Estimación	EE	Valor- p
T0: A, B vs C	8,75	4,92	0,01
T1: A, B vs C	-1,72	4,92	0,49
T2: A, B vs C	3,18	4,92	0,21

Valores medios \pm error estándar de la media ($n=3$). A, B, C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$). EE: error estándar.

En la Tabla 2.6. se observa que las posiciones de muestreo A, B y C de los tratamientos T1 y T2 presentaron los mayores valores de CR (> 94%), sin diferenciarse entre sí. Tampoco se diferenciaron de la posición A del tratamiento T0. Por otra parte, la posición D presentó los menores valores de CR (<88%), independientemente de los distintos tratamientos. Por último, las posiciones B y C del tratamiento control (T0) presentaron valores de 90 y 84 % respectivamente, diferenciándose de las mismas posiciones de los demás tratamientos. No se detectaron diferencias significativas entre las posiciones de muestreo que se encuentran en las STP (A y B) en el tratamiento T0 ni entre aquellas ubicadas en las zonas no transitadas (C y D) independientemente de su cercanía a la STP.

Los contrastes evaluados en la Tabla 2.6. indican que en T0 la posición C, que se encuentra ubicada en el borde de la STP, presentó valores medios menores y diferentes al de las posiciones A y B (promedio de la CR hallada en las STP). Esto demuestra que el estrés aplicado al suelo en este tratamiento no fue suficiente para propagarse lateralmente. Por otro lado, en los tratamientos T1 y T2 los resultados muestran que la posición C y el promedio de las posiciones A y B no fueron estadísticamente diferentes. Por lo tanto, en estos tratamientos la compactación se propagó horizontalmente más allá del borde de las sendas de tránsito permanente.

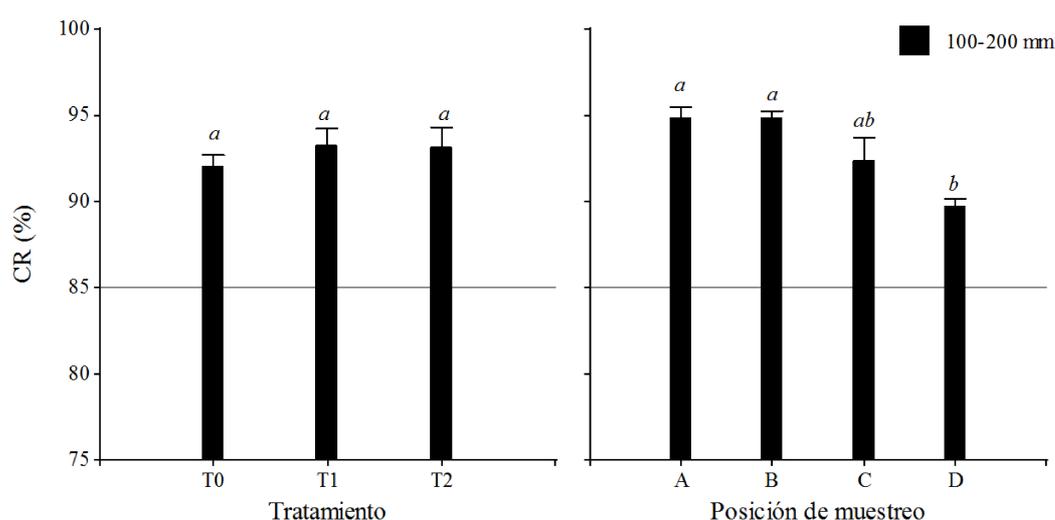


Fig. 2.5. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha del cultivo de soja 2016/2017 en la profundidad de suelo 100-200 mm. A, B, C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente

compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$).

En la profundidad de suelo de 100-200 mm, sólo se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre posiciones de muestreo ($p=0,01$) (Fig. 2.5.). Los mayores valores de CR se presentaron, al igual que en los momentos de muestreo anteriores, en las posición A aunque no se diferenció estadísticamente de las posiciones B y C. La posición de muestreo D, ubicada en la zona libre de tránsito de la maquinaria presentó el menor valor de CR (90 %) aunque no se diferenció de la posición C, localizada a 20 mm del borde de la STP.

Luego de la cosecha del cultivo de soja 2017/2018 se observó interacción significativa entre tratamiento y posición de muestreo sólo en la profundidad 100-200 mm ($p=0,73$ y $p=0,01$ en el estrato superficial y subsuperficial respectivamente) por lo que en los primeros 100 mm de suelo se analizaron por separado dichas variables.

En la Fig. 2.6. se observa que la CR fue similar entre las posiciones de muestreo A, B y C, alcanzando valores medios entre 92-94%. Estos valores fueron diferentes de la posición de muestreo ubicada en la zona libre de tránsito, donde se alcanzaron valores próximos a 83 %.

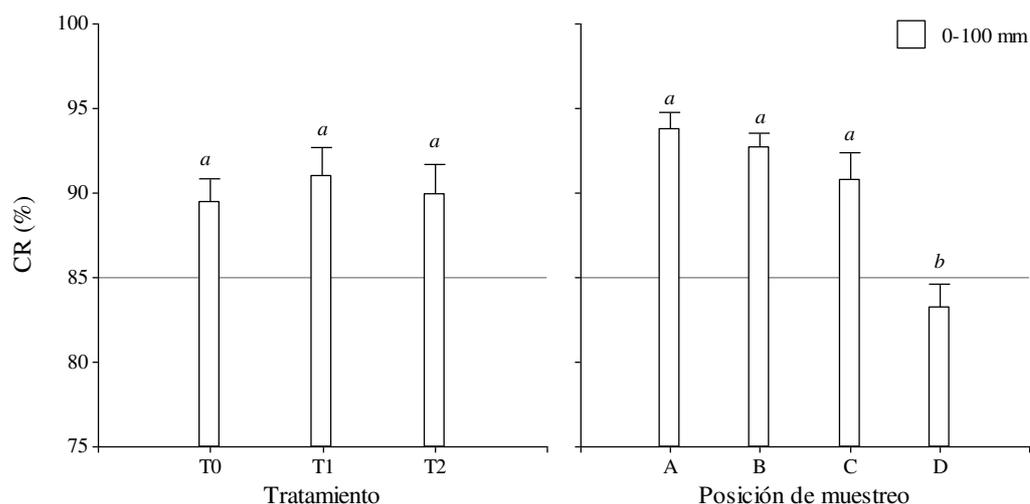


Fig. 2.6. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha del cultivo de soja 2017/2018 en la profundidad de suelo 0-100 mm. A, B, C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$).

Por otro lado, en la Tabla 2.7. se observa que el mayor valor de CR se encontró en la posición B del tratamiento T2, aunque no se diferenció estadísticamente de la posición A del mismo tratamiento. La posición C del T2 fue diferente sólo de la posición A. Además, Las posiciones A, B y C del tratamiento T1 no presentaron diferencias entre sí, y sólo fueron diferentes de la posición B del T2 y de la posición D de los distintos tratamientos. Las posiciones A, B y C del tratamiento control tampoco se diferenciaron entre sí, pero fueron diferentes de las posiciones A, B y D del tratamiento T2. Por último, la posición D presentó los menores valores de CR (< 88 %) y fue diferente entre los tratamientos que recibieron compactación al inicio del experimento (T1 y T2), aunque ninguno de ellos fueron distintos al tratamiento control.

Los contrastes evaluados en la Tabla 2.7 indican que no se detectaron diferencias significativas entre los valores de compactación relativa hallados en las STP (posiciones A y B) respecto de la posición de muestreo hallada en el borde de las STP (posición C). Esto evidencia la propagación horizontal del estrés aplicado en las STP hacia las zonas adyacentes no transitadas.

Tabla 2.7. Valores medios de compactación relativa y contrastes evaluados entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha de soja 2017/2018.

Posición de muestreo	Tratamiento	CR(%)	
A	T0	92,23±0,67	<i>cd</i>
B	T0	90,27±1,41	<i>de</i>
C	T0	91,53±1,03	<i>cd</i>
D	T0	88,01±2,27	<i>ef</i>
A	T1	92,28±0,94	<i>cd</i>
B	T1	93,71±1,22	<i>bc</i>
C	T1	93,77±1,33	<i>bc</i>
D	T1	88,46±1,41	<i>e</i>
A	T2	95,65±0,89	<i>ab</i>
B	T2	97,14±1,22	<i>a</i>
C	T2	93,88±1,38	<i>bc</i>
D	T2	85,40±0,46	<i>f</i>
Contraste	Estimación	EE	Valor-p
T0: A, B vs C	-0,28	2,44	0,82
T1: A, B vs C	-0,78	2,44	0,53
T2: A, B vs C	2,51	2,44	0,06

Valores medios ± error estándar de la media (n=3). A, B, C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras *italicas* diferentes indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$). EE: error estándar.

En la Fig. 2.7. se presentan los resultados de CR correspondientes al muestreo realizado luego de la cosecha de trigo 2018. No se encontraron diferencias significativas en la interacción tratamiento*posición de muestreo ($p=0,18$) en ninguna de las profundidades evaluadas por lo que los efectos de dichas variables sobre la CR del suelo fueron estudiados por separado.

Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos sólo en la profundidad de muestreo 100-200 mm ($p= 0,04$) (Fig.2.7.). El tratamiento T0 presentó el menor valor medio de CR (88%). Por el contrario, el mayor valor lo presentó el tratamiento T2 (91%). Estos valores fueron diferentes entre sí, mientras que el tratamiento T1 presentó un valor medio de CR próximo a 90 % que no se diferenció de los demás tratamientos.

Por otra parte, en ambas profundidades de suelo la posición de muestreo D, presentó los menores valores medios de CR (82 y 87% de 0-100 mm y de 100-200 mm respectivamente). Éstos fueron diferentes del resto de las posiciones de muestreo ($p<0,01$), que presentaron valores medios de CR próximos a 92 % en el estrato superficial y a 90 % en la profundidad 100-200 mm aunque no se diferenciaron entre sí en ninguna de las profundidades en estudio (Fig. 2.7.).

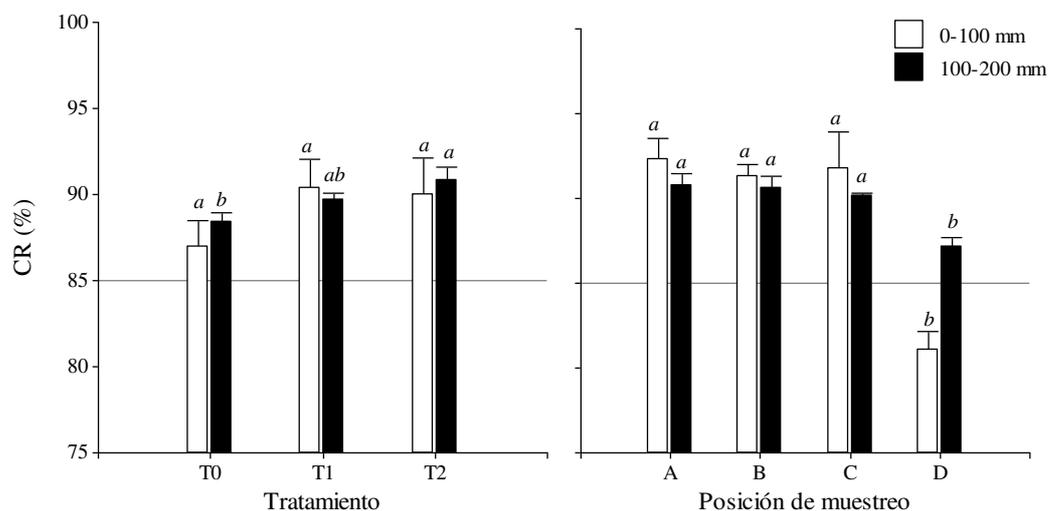


Fig. 2.7. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la cosecha del cultivo de trigo 2018. A, B, C y D: posiciones de muestreo. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Letras itálicas diferentes en la misma profundidad indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha= 0,05$).

En la Fig 2.8. se presenta la relación entre la CR y los diferentes tratamientos y posiciones en los distintos momentos de muestreo en el sitio Videla. La interacción tratamiento*posición de muestreo no fue significativa en ninguno de los momentos y profundidades de muestreo ($p>0,05$). Por lo que dichas variables fueron estudiadas por separado en cada momento de muestreo y profundidad.

En la Fig. 2.8.I se presentan los valores medios de CR luego de la compactación de las STP al inicio del experimento. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, ni entre posiciones de muestreo en la profundidad de suelo 100-200 mm. En el estrato superficial (0-100 mm) sólo se encontraron diferencias estadísticas entre las posiciones A y D. El mayor valor de CR se observó en la posición A (84%) mientras que el menor valor lo presentó la posición D con una diferencia de 10% respecto de la primera. Las posiciones B y C no se diferenciaron entre sí ni con las demás posiciones de muestreo.

Luego de la cosecha del cultivo de maíz 2016/2017 se observaron valores medios de CR mayores a 85% (Fig.2.8.II). En el estrato superficial del suelo (0-100 mm) no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p=0,17$) ni entre posiciones de muestreo ($p=0,48$). Sin embargo, en el estrato inferior (100-200 mm) se observaron diferencias estadísticas entre dichas variables (Fig. 2.8.II). El tratamiento T2 presentó el mayor valor de CR (cerca a 95%) que se diferenció de los demás tratamientos ($CR<92\%$). Por otro lado, las posiciones de muestreo A y B presentaron los mayores valores de CR (94%) aunque no se diferenciaron de la posición C. La posición D presentó el menor valor de CR, el cual difirió en 5% de las primeras.

En la figura 2.8.III se presentan los resultados de CR luego de la cosecha de girasol 2017. Sólo se presentaron diferencias significativas entre tratamientos en la profundidad de muestreo 100-200 mm. En el tratamiento T2 se observó un valor promedio de CR cerca a 93%, que se diferenció de los demás tratamientos cuyos valores medios fueron cercanos a 88%. Además, la CR varió entre posiciones en las dos profundidades medidas ($p=0,04$, 0-100 mm y $p=0,01$, 100-200 mm). Los mayores

valores de CR se encontraron en las posiciones A y B (cerca a 86%), aunque ésta última no fue diferente de la posición C. El menor valor promedio de CR se observó en la posición D (83%) no obstante no fue diferente de C.

Por último, en la Fig.2.8.IV se presentan los resultados correspondientes al muestreo de suelo realizado el día 25/10/2018 luego de la cosecha de maíz. No se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos en ninguna de las profundidades de suelo en estudio ($p=0,44$, 0-100 mm y $p=0,27$, 100-200 mm). Sin embargo, se encontraron diferencias entre posiciones de muestreo en ambas profundidades. Independientemente de la profundidad, los mayores valores de CR se encontraron en las posiciones A y B, alcanzando valores próximos a 88% y 95% de 0-100 y de 100-200 mm respectivamente. Por otra parte, los menores valores de CR se encontraron en la posición D en ambas profundidades y presentaron una diferencia de 4 y 5 % respecto de la misma posición en el estrato inferior. La posición C no fue diferente del resto de las posiciones de 0-100 mm aunque sí se diferenció de A y B de 100-200 mm.

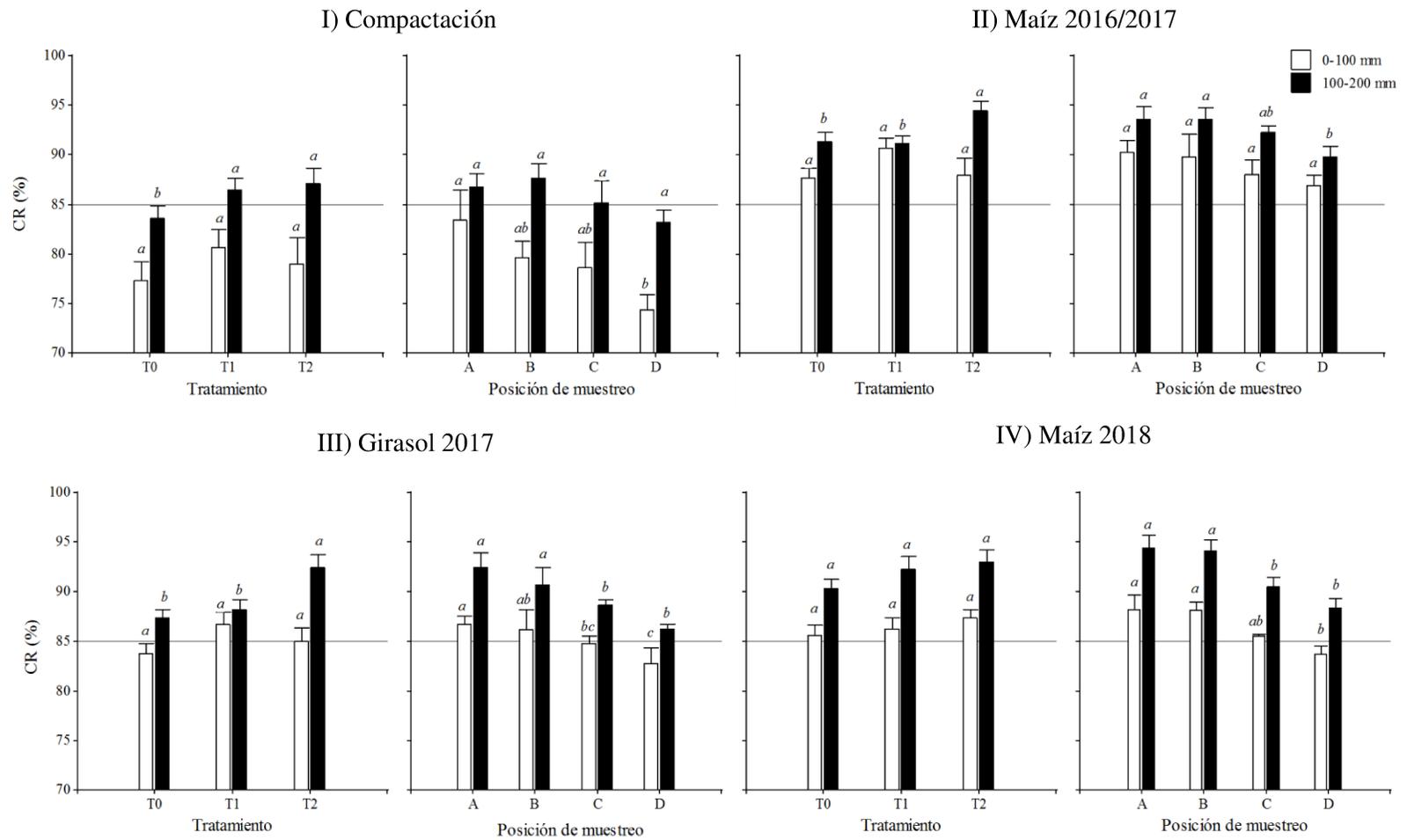


Fig 2.8. Compactación relativa de suelo (CR, %) entre tratamientos y posiciones de muestreo luego de la compactación de las sendas de tránsito permanente y la cosecha de distintos cultivos en Videla. Letras itálicas diferentes en la misma profundidad de muestreo indica diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

Discusión

El efecto de la aplicación de un estrés en el suelo es el resultado de la intensidad de carga relacionada a la resistencia interna del suelo y del área de contacto de los neumáticos (Riggert et al., 2018). El estrés se transmite tridimensionalmente en el suelo, distribuyéndose principalmente de forma vertical y en menor medida en forma horizontal y de cizallamiento (Reichert et al., 2010). La resistencia que opone el suelo depende de sus parámetros internos (contenido de materia orgánica, estructura, potencial mátrico y textura), los que componen el estrés de precompresión (Imhoff et al., 2016). Los resultados de este capítulo se discuten como el efecto total de los procesos de propagación del estrés y de sus componentes.

En el presente estudio, los diferentes valores de CR encontrados entre suelos en ambos sitios y entre profundidades se atribuyen a las diferencias en la estructura de suelo, contenido de agua, materia orgánica y textura, así como a las características de las maquinarias utilizadas (Tablas 2.3. y 2.4.). En los dos sitios, el contenido de agua del suelo en el que se realizó la compactación fue similar. En Videla se observó mayor contenido de materia orgánica y menor contenido de arcilla+limo en el estrato superficial respecto de Aurelia (Tabla 2.1).

En los dos sitios, la compactación del suelo fue mayor en la profundidad de muestreo 100-200 mm, lo que se relaciona principalmente con la disminución del contenido de materia orgánica entre los distintos estratos del horizonte superficial. La estratificación de la materia orgánica en el suelo se debe al uso continuo de siembra directa (Álvarez et al., 2011). Como consecuencia de la disminución del contenido de materia orgánica desde la superficie del suelo hacia estratos inferiores también disminuye la resistencia del suelo a la aplicación de un estrés. Imhoff et al. (2016) determinaron que la presión de preconsolidación de los suelos de la provincia de Santa Fe se incrementa cuando aumentan los contenidos de material orgánica y arcilla lo que confiere a los suelos mayor resistencia a la compactación por tránsito de maquinaria.

En Aurelia, los valores medios del tratamiento T0 en la profundidad 0-100 mm fueron cercanos al 85% mientras que en los demás tratamientos fueron próximos a 89%. En el estrato subsuperficial (100-200 mm) la peor condición física se observó en el tratamiento T2 alcanzando un valor medio de 93%. Håkansson (2005) determinó que valores de 85% de CR son óptimos para el crecimiento de los cultivos en suelos que contienen aproximadamente 30% de arcilla y que dicho valor varía $\pm 3\%$ dependiendo del contenido de materia orgánica. Por lo tanto, las condiciones físicas de suelo que se presentan en este sitio fueron restrictivas para el crecimiento de las raíces de los cultivos, excepto en el tratamiento T0 en el estrato superficial (0-100 mm) (Figs.2.3.-2.7.).

Por otro lado, se observa que en general en las dos profundidades de muestreo los valores promedios de CR disminuyen desde el centro de la STP (posición A) hacia la zona de cultivo no transitada (posición D). Además, al comparar los distintos tratamientos en el estrato subsuperficial se encontraron los mayores valores de CR. Éstos fueron en promedio (considerando todos los momentos de muestreo) menores a 83% y próximos a 87% en las profundidades 0-100 mm y 100-200 mm respectivamente, mientras que el resto de las posiciones presentaron valores promedios mayores a 89% por lo que las raíces tienen condiciones para desarrollarse sin limitaciones sólo en la zona no transitada.

Los valores de CR indican que el paso del equipo de siembra en el tratamiento control (T0), *i.e.* sin la compactación adicional generada con la cosechadora al inicio del experimento, no excedió la resistencia del suelo. Mientras que dicha compactación en los tratamientos T1 y T2 causó un estrés adicional que se propagó de forma vertical (en profundidad) y de forma horizontal (entre posiciones) y que superó la resistencia interna del suelo. La mayor CR encontrada en el borde de la STP (posición C) indicó la presencia de distribución horizontal y de cizallamiento producidas por la deformación plástica del suelo en las STP. Este tipo de deformación del suelo provoca cambios severos en distintas propiedades, como la distribución del tamaño de poros, permeabilidad al aire, conductividad hidráulica, entre otras (Hartge & Horn, 2016; Seehusen et al., 2019).

En Videla, en general, no se presentaron diferencias en la CR entre tratamientos en el estrato superficial. El valor promedio de CR fue menor a 85% por lo que no se presentaron condiciones de suelo críticas para el desarrollo de las raíces de los cultivos. Por el contrario, en el estrato subsuperficial se observaron los mayores valores en el tratamiento T2 (en promedio, 92%). Sin embargo, inicialmente este tratamiento no se diferenció del T1 aunque, luego de la cosecha del cultivo de Girasol 2017, dichos tratamientos fueron diferentes y en el último muestreo (luego de la cosecha de maíz 2018) no se encontraron diferencias entre ninguno de los tratamientos (Fig. 2.8.). En este estrato de suelo (100-200 mm) los valores se consideran muy restrictivos para el crecimiento de las raíces (Håkansson, 2005).

Por otro lado, se observó que el estrés aplicado al suelo con el tránsito de las maquinarias en las STP en general disminuyó desde el centro de la STP hacia la zona de cultivo no transitada (Fig. 2.8.) y además se presentaron menores valores de CR en la profundidad 0-100 mm respecto de 100-200 mm. En esta última profundidad se observaron valores de CR que superaron en 10% al valor considerado por Håkansson (2005). En general, la transmisión horizontal del estrés alcanzó el borde de la STP (posición C) presentando valores de CR que difieren en algunos momentos y profundidades de muestreo de las demás posiciones.

La deformación del suelo depende de factores internos y externos del suelo (Horn & Rostek, 2000). Las diferencias en las características intrínsecas del suelo en los dos sitios han condicionado la transmisión vertical y horizontal del estrés aplicado con el tránsito de la maquinaria en las STP. En ambos sitios, en los tratamientos que han sido compactados se observó una mayor profundidad de huella en las STP, lo que evidencia deformación horizontal del suelo. Esto indica la ocurrencia de deformación de cizallamiento y compresión del suelo (Seehusen et al., 2019). Estos procesos pueden haber estado condicionados además por las diferencias en la maquinaria utilizada en cada sitio (*i.e.* presión de inflado, tamaño y tipo de neumáticos). Estas características explican el menor daño causado en el suelo en Videla, aún utilizando maquinarias con mayor carga total.

A partir de la CR se pudo observar que el estrés aplicado fue transmitido de forma vertical hacia el estrato subsuperficial, especialmente en el tratamiento T2 en los dos sitios y posiblemente a mayor profundidad. Adicionalmente, observamos que la propagación tridimensional del estrés ocurrió desde el centro de la STP hacia el borde de la misma, especialmente en la profundidad 100-200 mm.

Los resultados obtenidos en el tratamiento T2 coinciden con los reportados por Botta et al. (2006a, 2009), Riggert et al. (2019) y Seehusen et al. (2019). Los autores reportaron que sucesivas pasadas de una máquina cosechadora por el mismo sitio producen mayor deformación del suelo. Además, las características de los neumáticos de las máquinas cosechadoras utilizadas en cada sitio fueron diferentes. La máquina utilizada en el sitio Aurelia cuenta con neumáticos de tipo convencionales que se caracterizan por presentar un patrón de construcción en capas diagonales donde la pared lateral y la banda de rodadura del neumático actúan en forma conjunta y, por lo tanto, el efecto negativo es aditivo. En los neumáticos radiales, que presenta la cosechadora utilizada en el sitio Videla, las capas se insertan desde un extremo de la pared lateral del neumático al otro, por lo que la pared lateral del neumático y su banda de rodadura se mueven independientemente. Esto confiere mayor flexibilidad al neumático y permite que, aún con una mayor carga por neumático, ejerza menor presión media sobre el suelo (Tabla 2.3.). Botta et al. (2008) evaluó el efecto del uso de diferentes neumáticos sobre la compactación y determinó que utilizando la misma configuración de neumáticos, los de tipo radial causan menor compactación en el suelo. Por lo tanto, no sólo las propiedades intrínsecas del suelo, sino también las características de la maquinaria, la presión de inflado de los neumáticos y el número de pasadas en las STP han condicionado la deformación del suelo en los sitios estudiados.

Conclusiones

El manejo del tránsito de la maquinaria afectó diferencialmente el grado de compactación del suelo en las sendas de tránsito permanente y en las zonas aledañas, y el contenido de materia orgánica afectó la resistencia del suelo al estrés aplicado. La compactación del suelo disminuyó desde el centro de las sendas de tránsito permanente hacia las zonas no transitadas, lo que indica que el estrés aplicado al suelo fue

transmitido tridimensionalmente. Dicho estrés no se limitó sólo a la senda de tránsito, dado que afectó además la posición de muestreo ubicada en la zona no transitada más próxima a dicha senda.

El uso de neumáticos de tipo radial y la presión de inflado fueron las principales características de las maquinarias que provocaron que la magnitud de la compactación alcanzada inicialmente en cada sitio sea diferente. En Aurelia, al inicio se observó mayor efecto entre las posiciones de muestreo y luego de los diferentes cultivos se apreció también el efecto de los distintos tratamientos principalmente en el estrato subsuperficial. En Videla, se observó que al inicio los tratamientos tuvieron efecto sobre la compactación relativa principalmente en la profundidad 100-200 mm y luego de los cultivos sólo se observó efecto en las posiciones de muestreo. En ambos sitios, el mayor contenido de materia orgánica en el estrato superficial minimizó el efecto de las diferentes intensidades de tránsito aplicadas al inicio del experimento. Esto resalta la importancia de realizar prácticas de manejo que favorezcan la conservación y el incremento del contenido de materia orgánica del suelo, ya que condiciona la resistencia que opone el suelo a la aplicación de cualquier estrés.

Capítulo III

IMPACTO DEL PROCESO DE COMPACTACIÓN SOBRE INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO Y LAS EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO

Introducción

La compactación del suelo por el tránsito de maquinaria es un proceso que está asociado a la disminución de la porosidad total, a la alteración del estado de agregación del suelo y, como consecuencia, a cambios en el movimiento del agua y aire (Da Silva et al., 2004; Dexter et al., 2008).

El proceso de compactación reduce el volumen ocupado por determinada masa de suelo y, como el volumen de suelo ocupado por las partículas minerales no es compresible, provoca la reducción del volumen de poros (Dexter, 2004). Sin embargo, no todos los poros son afectados de igual manera. El sistema poroso se describe por el tamaño (*i.e.* micro, meso y macroporos; <0,2; 0,2-10; 10-50 μm respectivamente), la forma (*i.e.* redondeados, elongados, complejos) y continuidad de los poros. Inicialmente se alteran las características de los poros más grandes y se reduce el volumen ocupado por ellos (Richard et al., 2001). Esta pérdida preferencial de los macroporos tiene el efecto de cambiar la distribución del tamaño de poros (Katou et al., 1987; Dexter, 2004). Esto tiene consecuencias negativas directas sobre la captación y circulación de agua y sobre la disponibilidad de oxígeno, además de aumentar la resistencia mecánica del suelo (Pilatti et al., 2006; Ghiberto et al., 2007). Por lo tanto, las características del sistema poroso condicionan los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el ambiente edáfico.

La resistencia del suelo y la aireación son parámetros dinámicos que se ven afectados por la estructura del suelo, la textura y el contenido de agua (Chen et al., 2014). Valores de aireación menores al 10 % del volumen del suelo se consideran limitantes para el normal desarrollo de la mayoría de los cultivos (He et al., 1996; Da Silva et al., 2004). Aunque diversos autores consideran adecuados valores próximos o mayores a 15% para mantener el flujo de oxígeno del suelo en niveles óptimos (Kay, et al., 2006; Imhoff et al., 2010).

Por otra parte, numerosos autores demostraron que la resistencia mecánica del suelo afecta el crecimiento de las raíces, la biomasa aérea y el rendimiento de los cultivos (Håkansson & Voorhees, 1998; Lipiec & Hatano, 2003; Botta et al., 2006; Botta et al., 2018). El valor crítico de resistencia a la penetración de las raíces varía entre 1,5 a 4,0 MPa principalmente en función de la especie (Beutler et al., 2005). Sin embargo, la mayoría de los estudios utilizan 2,5 MPa como límite crítico (Da Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2001).

La mayoría de los trabajos presentan resultados sobre el efecto individual de la compactación sobre determinadas propiedades físicas (*i.e.* resistencia a la penetración, densidad aparente, espacio de vacíos, porosidad total) (Flowers & Lal, 1998; Botta et al., 2004). Esto dificulta la evaluación de la calidad física del suelo para el desarrollo de los cultivos ya que en el suelo ocurren numerosas interacciones; por ejemplo, el contenido de agua y la densidad aparente afectan la resistencia y la aireación (Chen et al., 2014). Para superar dichas limitaciones, Da Silva et al. (1994) modificaron un indicador, propuesto inicialmente por Letey (1985) con el nombre non limiting water range, y lo denominaron Least Limiting Water Range (LLWR), el que fue traducido como intervalo hídrico óptimo (IHO). Este indicador integra los efectos de la aireación, la resistencia a la penetración y la retención de agua del suelo sobre el crecimiento de los cultivos en un parámetro único (Leão et al., 2006). El IHO ha sido validado por numerosos autores en una amplia variedad de suelos, cultivos y condiciones de manejo como criterio de evaluación de la calidad física del suelo para el desarrollo de cultivos (Da Silva & Kay, 1997; Tormena et al., 1998; Zou et al., 2000; Lapen et al., 2004; Leão et al., 2006; Wilson et al., 2013; Chen et al., 2014; Cecagno et al., 2016).

Como consecuencia de la alteración del sistema poroso, la compactación afecta los procesos relacionados con la dinámica gaseosa del suelo, tanto el volumen como la difusividad de los diferentes gases. A medida que se incrementa el volumen de poros de tamaño pequeño, tanto la concentración de O_2 como su difusividad disminuyen. Paralelamente se incrementa la concentración de otros gases conocidos como gases con efecto invernadero (GEI) (Horn & Rostek, 2000; Antille et al., 2015a; Tullberg et al., 2018). Los principales GEI en la atmósfera son el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y ozono (O_3). El N_2O es la principal sustancia que extingue el ozono en la estratósfera (Ravishankara et al., 2009). Presenta un potencial de calentamiento global de 296 veces mayor al del CO_2 en un período de 100 años (IPCC, 2007) y se encuentra activo en la atmósfera durante 120 años (Ussiri & Lal, 2013).

Aproximadamente dos tercios de las emisiones de N_2O a la atmósfera provienen de los suelos y están directamente relacionados con la producción de alimentos y con el incremento del uso de fertilizantes industriales (Prather et al., 1995; Mosier et al., 1998). El N_2O se produce naturalmente en los suelos por la transformación microbiana de nitrógeno a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación. El primer proceso consiste en la oxidación microbiana aeróbica del amonio en nitrato mientras que la desnitrificación es la reducción microbiana anaeróbica del nitrato en gas de nitrógeno (N_2), siendo la generación de N_2O un paso intermedio. Generalmente el principal proceso de emisión de N_2O es la desnitrificación microbiológica que se produce cuando no hay O_2 en cantidad suficiente (Smith & Conen 2004). El proceso de desnitrificación generalmente ocurre cuando el espacio poroso lleno de agua (EPA) se encuentra en el rango de 65-80% (Dalal et al., 2003) y resulta favorecido por condiciones neutras de pH, altas temperaturas de suelo, baja tasa de difusión de oxígeno y elevado contenido de materia orgánica soluble y N mineral (Cosentino et al., 2013; Ball, 2013; Ussiri & Lal, 2013). Numerosos estudios demuestran que luego de un evento de precipitación, los suelos compactados pueden alcanzar elevados valores de EPA lo que incrementa el riesgo de producir elevadas tasas de emisiones de N_2O (Ball et al., 2008; Berisso et al., 2012; Smith et al., 2018). Por lo tanto, prevenir y/o evitar la compactación del suelo es importante para la seguridad alimentaria, la mitigación del calentamiento global y la sustentabilidad.

En los suelos agrícolas, diversas prácticas de manejo como las labranzas, la fertilización, el riego y el estado de compactación afectan la actividad de los microorganismos del suelo (Smith & Conen, 2004). En nuestro país, más de 25 millones de hectáreas son destinadas a la producción de granos en siembra directa utilizando tránsito aleatorio de las maquinarias dentro de los lotes, de esta manera, la superficie transitada supera el 85% por lo que presentan estados variables de compactación del suelo.

El sistema tránsito controlado de la maquinaria agrícola (TC) disminuye la superficie compactada (10-15%) porque concentra la circulación sobre sendas de tránsito permanente mientras el resto de la superficie se mantiene libre de tránsito, lo que permite que el suelo recupere su estructura (McHugh et al., 2009; Chamen, 2015). En nuestro país las maquinarias agrícolas (tractores, cosechadoras, pulverizadoras) no presentan el mismo ancho de trocha (distancia entre neumáticos), ni anchos de labor iguales o múltiplos entre sí, lo que dificulta la aplicación del TC. Una primera aproximación a la adopción del TC consiste en alinear el paso de la maquinaria en una de las sendas de tránsito permanente (STP); de esta manera, la superficie compactada se reduce al 20-40% según el tamaño de las maquinarias disponibles de cada productor (GRDC, 2004).

Numerosos autores evaluaron separadamente el efecto de la compactación sobre el IHO y sobre las emisiones de N_2O en suelos agrícolas (Da Silva & Kay, 1997; Tormena et al., 1998; Beutler et al., 2005; Rochette, 2004; Bessou et al., 2010; Wilson et al., 2013; Ball, 2013; Chen et al., 2014; Gregorich et al., 2014) y una limitada cantidad de autores han evaluado el efecto de la adopción TC sobre dichas propiedades (Gasso et al., 2013; Antille et al., 2015a; De Souza et al., 2014; Tullberg et al., 2018). En nuestro país, no existe información acerca del efecto de la adopción del TC sobre el IHO y las emisiones de N_2O en los suelos Argiudoles típicos de la Region Pampeana.

Los objetivos de trabajo del presente capítulo fueron: i) Cuantificar el IHO en distintas posiciones relativas a las sendas de tránsito permanente en suelos agrícolas de la región pampeana argentina manejados con TC; y ii) Cuantificar la emisión de N_2O cuando se adopta el sistema de TC en los suelos agrícolas de la región pampeana

Argentina. La hipótesis de trabajo del presente capítulo sostiene que el grado de compactación del suelo en las sendas de tránsito permanente y áreas adyacentes determina la magnitud del deterioro de la calidad estructural del suelo, lo que resulta en la disminución del intervalo hídrico óptimo y el aumento de las tasas de emisión de óxido nitroso.

Materiales y Métodos

Lugar de realización

Los suelos utilizados en este estudio fueron dos Argiudoles típicos (Soil Survey Staff, 2014) localizados en el centro de la provincia de Santa Fe. Uno de ellos se encuentra en el departamento Castellanos, en la localidad de Aurelia (31°29'06.67" S y 61°07'25.29" O) y el otro en el departamento San Justo, en la localidad de Videla (30°54'41.46" S y 60°37'35.26" O). La descripción de los suelos, clima, diseño y tratamientos experimentales se presentan en el Capítulo II de esta Tesis.

Luego de la descompactación de cada sitio experimental se extrajeron muestras disturbadas de suelo (0-200 mm) para caracterizar los suelos en estudio. Se determinó: contenido de Materia orgánica (Galantini et al., 1994), pH (relación suelo agua 1:2,5), nitrógeno total (N total) (SAMLA, 2004), fósforo extractable (P) (Bray & Kurtz, 1945), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio intercambiable (Na), conductividad eléctrica (CE) (relación suelo:agua 1:4) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) según los procedimientos descritos en SAMLA, (2004). Los resultados se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Caracterización química de los suelos en estudio.

Propiedades edáficas	Aurelia	Videla
Materia orgánica (%)		
0-100 mm	2,80	3,30
100-200 mm	2,70	2,80
pH (1: 2,5)	5,90	6,15
N total (%)	0,14	0,15
P (ppm)	16	15,78
Ca (cmolc kg ⁻¹)	7,85	6,74
Mg (cmolc kg ⁻¹)	1,85	0,92
K (cmolc kg ⁻¹)	1,22	0,80
Na (cmolc kg ⁻¹)	0,16	0,28
CIC (cmolc kg ⁻¹)	15,35	12,85
CE (dS m ⁻¹)	0,15	0,16

Las determinaciones y la metodología aplicada para la determinación del IHO y de las emisiones de N₂O del suelo se presentan por separado en los apartados a) y b).

a) Intervalo hídrico óptimo

Determinaciones

Para cuantificar el IHO se colectaron muestras de suelo con estructura no perturbada en el horizonte A con cilindros de 50 x 50 mm en cada sitio experimental luego de establecer los distintos tratamientos (08/01/2016 en Aurelia y 11/01/2016 en Videla) y después de la cosecha mecánica de cada uno de los cultivos implantados desde diciembre de 2015 hasta diciembre de 2018 (n= 648). Las muestras de suelo fueron recolectadas en dos profundidades (0-100 y 100-200 mm) y en cuatro posiciones diferentes (A, B, C y D) en una línea transversal al sentido de avance de la maquinaria incluyendo zonas de cultivo transitadas (STP) y zonas de cultivo sin tránsito de maquinaria (NT) (Capítulo II, Fig. 2.2.).

En el capítulo II, en la Tabla 2.5. se presenta un cronograma con las fechas de siembra y cosecha de los cultivos, así como las fechas de recolección de las muestras de suelo. En el sitio Videla, en el cultivo de soja 2015/2016 no fue posible realizar la

cosecha mecánica por inundación por lo que antes de la siembra del cultivo siguiente se pasó con la cosechadora por las STP en todas las parcelas.

Para elaborar las curvas de retención hídrica, las muestras con estructura no disturbada se enrasaron y se saturaron por elevación gradual de una lámina de agua, se pesaron para obtener el contenido hídrico en saturación (θ_s) y se equilibraron en los siguientes potenciales mátricos (ψ): -1, -3, -6, -8, -10 kPa en mesa de tensión de arena y -33 kPa por medio de presiones aplicadas en placas porosas (Klute, 1986). Luego, se colocaron en estufa a 105°C para determinar su contenido de humedad gravimétrico y la densidad del suelo (Blake & Hartge, 1986). Posteriormente, las muestras de suelo se extrajeron de los cilindros, se desmenuzaron manualmente, se colocaron en aros plásticos de 20 mm de altura y se saturaron por elevación gradual de una lámina de agua sobre placas porosas. A continuación, se equilibraron a los siguientes potenciales mátricos (ψ): -100, -400 y -1500 kPa, posteriormente se registró su peso húmedo y se colocaron en estufa a 105°C hasta peso constante para determinar el peso seco de cada muestra. Con esta información se calculó el contenido hídrico volumétrico para elaborar la curva de retención hídrica (CRH) ($\theta = f \psi$) en las diferentes posiciones de muestreo.

Los datos de las CRH se ajustaron con el modelo propuesto por Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha * \psi)^n)^{(1 - \frac{1}{n})}} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde: θ =contenido volumétrico de agua ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_r =contenido volumétrico de agua residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_s =contenido volumétrico de agua en saturación ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), ψ = potencial mátrico (kPa) y α y n son los parámetros de ajuste.

Para construir las curvas de resistencia a la penetración se asignaron al azar 216 muestras con estructura no disturbada equilibradas en -33kPa y en cada una se midió la resistencia a la penetración del suelo (RP) con penetrómetro electrónico, con cono de 60° de ángulo y 4 mm de diámetro basal. La velocidad de penetración fue de 10 mm min^{-1} y la frecuencia de muestreo correspondió al registro de 1 valor de resistencia cada

0,6767 segundos, obteniéndose 266 lecturas en total. Las lecturas obtenidas entre 10 y 40 mm de profundidad de cada muestra se promediaron para obtener un único valor de RP. Las restantes 432 muestras se volvieron a saturar por elevación gradual de una lámina de agua y 216 de ellas se equilibraron a -3 kPa en mesa de tensión y el resto a -8 kPa, posteriormente en cada una de las muestras con estructura no disturbada se midió la RP.

La relación funcional entre RP, θ y ρ_s se obtuvo ajustando los datos al modelo no lineal propuesto por Busscher (1990):

$$RP = a * \theta^b * \rho_s^c \text{ (Ecuación 3.2)}$$

Donde: RP= resistencia del suelo a la penetración (MPa), θ = contenido volumétrico de agua ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), ρ_s = densidad del suelo (g cm^{-3}) y a, b, c son los parámetros de ajuste.

El IHO se calculó según la metodología propuesta por Da Silva et al. (1994) para cada ρ_s medida. Los contenidos hídricos correspondientes a capacidad de campo (θ_{CC}) y al punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) se obtuvieron con la ecuación (1) para $\psi = -10$ kPa y $\psi = -1500$ kPa, respectivamente. La ecuación (2) se utilizó para determinar el contenido hídrico del suelo en que se alcanza un valor de RP= 3 MPa (θ_{RP}), considerado restrictivo para el normal crecimiento de las raíces de los cultivos agrícolas. El contenido hídrico del suelo en que la porosidad de aeración es 15% (θ_{PA}), se determinó por medio de la ecuación 3.3:

$$\theta_{PA} = \left[\left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right) - 0,15 \right] \text{ (Ecuación 3.3)}$$

Donde: ρ_s = densidad de suelo (g cm^{-3}) y ρ_p = densidad de partículas (g cm^{-3}). La ρ_p considerada en este estudio fue de $2,58 \text{ g cm}^{-3}$.

El IHO se obtuvo calculando la diferencia entre el límite superior, definido como el menor valor entre θ_{PA} y θ_{CC} , y el límite inferior, definido como el mayor valor entre

θ_{PMP} y θ_{RP} , para cada valor de ρ_s . Además, se determinó la densidad de suelo crítica (ρ_{sc}), es decir la ρ_s en que el IHO=0.

Análisis estadístico

Para la obtención de las curvas de retención hídrica y resistencia a la penetración necesarias para el cálculo del IHO, los datos de las distintas posiciones de muestreo (A, B, C y D) se agruparon en aquellos casos en que los valores de compactación relativa (CR, %) no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre posiciones en cada momento y profundidad de muestreo para cada cultivo (*i.e.* en Aurelia, el IHO correspondiente al momento maíz 2016, profundidad 0-100 mm, en la STP se construyó a partir de los datos de las posiciones A, B y C agrupadas mientras que NT a partir de los datos correspondientes a la posición D). La comparación de los parámetros de la ecuación (3.1) para las distintas posiciones de muestreo se realizó con el test “t”, de acuerdo con Steel & Torrie (1997). Para los ajustes de los datos de RP, retención hídrica y el cálculo del IHO se utilizó regresión no lineal (Di Rienzo et al., 2013), con el programa desarrollado por Leão et al., (2006).

b) Emisiones de óxido nitroso del suelo.

Determinaciones

Las determinaciones de N_2O se realizaron inmediatamente después de la cosecha mecánica del cultivo de soja 2017/2018 en Aurelia y luego de la cosecha mecánica del cultivo de girasol 2017 en Videla por un período de tiempo de 30 días. En la Tabla 3.2. se presenta un cronograma de las labores realizadas desde el momento de la descompactación de cada área experimental hasta el momento en el cual se realizó la toma de muestras para la determinación de N_2O . Para ello se utilizaron cámaras estáticas ventiladas, construidas en policloruro de vinilo (PVC) (Parkin et al., 2003). Las mismas constaron de dos partes: una base de 120 mm de alto y 160 mm de diámetro que se insertó 50 mm en el suelo y que se mantuvo allí desde la cosecha mecánica del cultivo hasta el final de las mediciones y una tapa de 160 mm de diámetro con una válvula de ventilación y un orificio de goma sellado para la toma de muestras de gases, que se colocó sobre la base en cada día de medición.

Tabla 3.2. Cronograma de labores y muestreos para la determinación de óxido nitroso en cada sitio experimental.

Sitio		Aurelia								Videla										
Cultivo/ Barbecho	Barbecho 2015	Maíz 2016	Soja 2016/17	Soja 2017/18	Barbecho soja 2018					Barbecho 2015	Soja 2015/16	Maíz 2016/17	Girasol 2017	Barbecho girasol 2018						
Labranza vertical	15/8/15									25/8/ 15										
Compactación	10/12/ 15									03/12/ 15										
Siembra		7/1/ 16	8/11/ 16	8/11/ 17							3/12/ 15	30/8/ 16	17/8/ 17							
Cosecha		2/8/ 16	15/4/ 17	18/4/ 18							30/8/ 16	31/1/17	4/1/18							
Instalación bases GEI					24/4									5/1						
N-N ₂ O					26/4	28/4	30/4	3/5	14/5	24/5					8/1	10/1	12/1	15/1	24/1	5/2
Humedad gravimétrica					26/4	28/4	30/4	3/5	14/5	24/5					8/1	10/1	12/1	15/1	24/1	5/2
Densidad aparente									24/5											5/2
N-NO ₃					26/4	28/4	30/4	3/5	14/5	24/5					8/1	10/1	12/1	15/1	24/1	5/2
Temperatura de suelo y aire					26/4	28/4	30/4	3/5	14/5	24/5					8/1	10/1	12/1	15/1	24/1	5/2

Estas cámaras sólo se instalaron en los tratamientos T0 y T2, en dos posiciones dentro de cada parcela experimental: en las sendas de tránsito permanente (STP) y en áreas no transitadas (NT) (Fig. 3.1.).

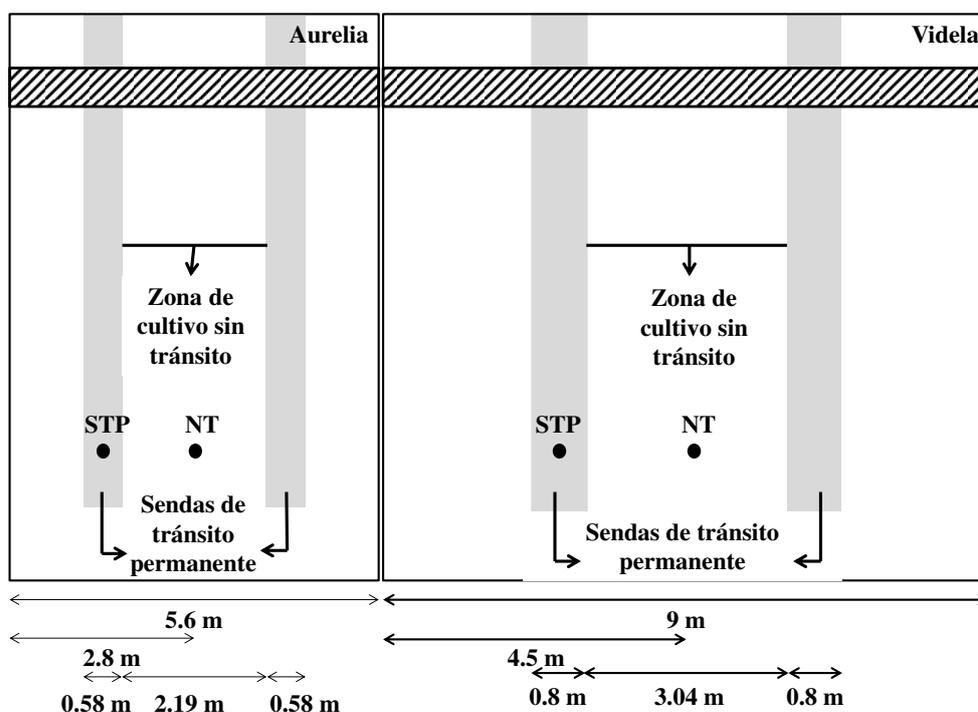


Fig. 3.1. Esquema de la ubicación de las sendas de tránsito permanente y la zona de cultivo sin tránsito en cada sitio experimental. Círculos negros representan las bases para la medición de óxido nítrico. STP: senda de tránsito permanente. NT: zona de cultivo sin tránsito de maquinaria. Rectángulo rayado blanco y negro representan los cabezales de las cosechadoras.

La extracción de la muestra de gas del interior de la cámara se realizó con una jeringa plástica con aguja metálica en tres momentos en cada medición (0, 20 y 40 minutos desde el cierre de la cámara) siguiendo la metodología propuesta por Cosentino et al. (2013). Posteriormente cada muestra fue colocada en un vial de vidrio de 10 cm³ con vacío en su interior. La muestra de gas obtenida en el tiempo 0 representó la concentración atmosférica de N₂O en cada medición. Luego cada muestra fue analizada mediante cromatografía de gases (cromatógrafo de gases GC 7890 A con muestreador automático 7697 A, Agilent Network GC System, AECD, Santa Clara, CA, USA).

Los flujos de N₂O (f) fueron calculados a través de la ecuación 3.4:

$$f = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{m}{V_m} \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

dónde: $\Delta C/\Delta t$ = es el cambio en la concentración de N_2O en el tiempo de incubación t . V es el volumen de la cámara (2,01 L), A es el área de suelo cubierto por la cámara ($0,04 \text{ m}^2$), m es la masa molecular del N_2O ($44 \text{ } \mu\text{g } \mu\text{mol}^{-1}$) y V_m es el volumen molar de N_2O .

Los flujos de gases fueron calculados como el incremento de la concentración de N_2O durante el período de incubación (0-40 minutos). Para ello se ajustó una función lineal entre la tasa de emisión de N_2O y el tiempo de incubación.

Complementariamente en cada momento de muestreo y a una distancia menor a 100 mm de la base de cada cámara se registró la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del suelo (0-50 mm) y del aire durante el tiempo de incubación y se extrajeron muestras de suelo para cuantificar el contenido de humedad gravimétrica del suelo ($W, \text{ g g}^{-1}$) (ecuación 3.5) y la concentración de $N\text{-NO}_3$.

$$W = \frac{PSH - PSS}{PSS} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

dónde: PSH= peso del suelo húmedo (g); PSS= peso del suelo seco (g).

Al finalizar el experimento se determinó la densidad del suelo (ρ_s) en el interior de cada cámara siguiendo la metodología propuesta por Blake & Hartge (1986).

El contenido hídrico volumétrico ($\theta, \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) se calculó a través de la ecuación 3.6:

$$\theta = W \times \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

dónde: ρ_s = Densidad aparente del suelo (g cm^{-3}); ρ_a = Densidad del agua (g cm^{-3}) y W = humedad gravimétrica del suelo (g g^{-1}).

La porosidad total del suelo ($PT, \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) se calculó a través de la ecuación 3.7:

$$PT = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}\right) \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Donde: ρ_s =Densidad aparente del suelo (g cm^{-3}); ρ_p = Densidad de partícula (g cm^{-3}). La D_p considerada fue de $2,65 (\text{g cm}^{-3})$.

El espacio poroso lleno de agua (EPA) se calculó con la ecuación 3.8.

$$EPA (\%) = \frac{\theta}{PT} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Donde: θ = contenido hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); PT = porosidad total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

La concentración de N-NO_3 se determinó a través del método del ácido fenoldisulfónico siguiendo la metodología propuesta por SAMLA (2004). Para ello se pesaron 10 g de suelo en un Erlenmeyer. Se agregó 30 mL de K_2SO_4 0,1 N y se agitó durante 10 minutos en agitador magnético. Posteriormente se filtró y el extracto se llevó a un volumen de 100 mL con agua destilada. Para el desarrollo de color se extrajeron 5 mL del extracto anterior y se colocaron en estufa (105°C) hasta sequedad. Al residuo seco se le agregó 1 mL de reactivo sulfofénico y luego de 15 minutos se agregó 10 mL de agua destilada e hidróxido de sodio (40%) hasta lograr una coloración amarilla persistente. La solución se llevó a un volumen de 25 mL en un matraz aforado con agua destilada. La lectura de la concentración de N-NO_3 se realizó con espectrofotómetro a 420 nm.

Análisis estadístico

Los datos de cada sitio experimental se analizaron por separado ajustando un modelo lineal mixto para un diseño experimental de parcelas divididas con tratamientos y posiciones de muestreo como factores principales. Los tratamientos se aleatorizaron dentro de bloques aleatorios completos y se mantuvo un patrón de posiciones de muestreo dentro de cada bloque para minimizar errores. Los supuestos del modelo se verificaron mediante el análisis de residuos. Para los datos de Videla, se aplicó la

transformación logarítmica para corregir la falta de homocedasticidad y las desviaciones de la distribución normal.

Los efectos de los tratamientos, la posición de muestreo, la fecha de medición y su interacción en las variables estudiadas se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA). Cuando se presentaron efectos significativos, las medias se separaron mediante la prueba de diferencias mínimas significativas LSD ($\alpha = 0,05$). Los análisis de varianza y las regresiones lineales se realizaron con el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2013).

Resultados y discusión

a) Intervalo hídrico óptimo

Los parámetros de ajuste de la curva de retención hídrica (Ecuación 3.1) en los dos sitios experimentales en estudio y en las distintas posiciones de muestreo consideradas se presentan en la Tabla 3.3. Estos coeficientes tomaron diferentes valores entre posiciones para una misma profundidad de muestreo.

Los parámetros de ajuste de la curva de RP (Ecuación 3.2) relacionados con la ψ_s (a y c) presentaron valores positivos mientras que el coeficiente de θ (b) tuvo valores negativos, por lo cual se afirma que la resistencia a la penetración varió positivamente con la ψ_s y negativamente con los contenidos de agua del suelo. La reducción de la RP con el aumento del contenido de humedad del suelo se encuentra asociado con la reducción de la cohesión y el ángulo de fricción interna (Camp & Gill, 1969), mientras que el aumento de la RP con la ψ_s podría atribuirse a la compactación del suelo que resulta en un aumento de la fricción entre partículas (Vepraskas, 1984). Estos resultados coinciden con los reportados en la bibliografía por numerosos autores (Da Silva et al., 1994; Betz et al., 1998; Tormena et al., 1999). Los R^2 obtenidos de los ajustes del modelo de la curva de RP (Ecuación 3.2) se encontraron entre 95 y 99% en todas las posiciones de muestreo consideradas.

Tabla 3.3. Coeficientes y parámetros de ajuste de la curva de retención hídrica del suelo para cada sitio experimental, momento, profundidad y posición de muestreo. CRH: $\theta = [\theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \psi)^n]^{(1-1/n)}]$.

Sitio	Momento	Profundidad (mm)	Posición	θ_r	E.E. θ_r	θ_s	E.E. θ_s	α	E.E. α	n	E.E. n	
Aurelia	Compactación	0-100	STP	A,B,C	0,09	0,03	0,45 ^b	0,003	0,02 ^a	0,003	1,46	0,10
		0-100	NT	D	0,05	0,08	0,50 ^a	0,010	0,01 ^b	0,002	1,22	0,08
	Compactación	100-200	STP	A,B,C	0,09	0,03	0,41	0,002	0,01	0,001	1,55	0,13
		100-200	NT	D	0,05	0,09	0,43	0,010	0,02	0,010	1,37	0,18
	Maíz 2016	0-100	STP	A,B,C	0,09	0,04	0,46 ^b	0,004	0,03 ^a	0,010	1,40	0,11
		0-100	NT	D	0,10	0,10	0,48 ^a	0,010	0,01 ^b	0,003	1,58	0,40
	Maíz 2016	100-200	STP	A,B,C	0,09	0,04	0,45 ^b	0,003	0,02 ^a	0,003	1,43	0,11
		100-200	NT	D	0,10	0,08	0,48 ^a	0,010	0,01 ^b	0,002	1,55	0,27
	Soja 2016/2017	0-100	STP	A,B,C	0,09	0,04	0,41 ^b	0,003	0,02 ^a	0,004	1,40	0,10
		0-100	NT	D	0,05	0,07	0,50 ^a	0,010	0,01 ^b	0,002	1,55	0,25
	Soja 2016/2017	100-200	STP	A,B,C	0,09	0,04	0,45 ^b	0,003	0,02	0,003	1,40	0,11
		100-200	NT	D	0,05	0,08	0,50 ^a	0,005	0,04	0,010	1,28	0,12
	Soja 2017/2018	0-100	STP	A,B,C	0,09	0,03	0,45	0,002	0,02 ^a	0,003	1,42	0,10
		0-100	NT	D	0,05	0,08	0,45	0,010	0,01 ^b	0,002	1,52	0,26
	Soja 2017/2018	100-200	STP	A,B,C	0,09	0,03	0,43 ^b	0,002	0,01	0,001	1,61	0,13
		100-200	NT	D	0,07	0,08	0,44 ^a	0,004	0,01	0,002	1,46	0,22
	Trigo 2018	0-100	STP	A,B,C	0,09	0,03	0,45 ^b	0,002	0,02 ^a	0,003	1,42	0,10
		0-100	NT	D	0,10	0,07	0,47 ^a	0,010	0,01 ^b	0,002	1,57	0,27
	Trigo 2018	100-200	STP	A,B,C	0,09	0,03	0,43 ^b	0,002	0,01 ^b	0,001	1,58	0,13

Sitio	Momento	Profundidad (mm)	Posición		θ_r	E.E. θ_r	θ_s	E.E. θ_s	α	E.E. α	n	E.E. n	
Aurelia	Trigo 18	100-200	NT	D	0,08	0,05	0,48 ^a	0,005	0,02 ^a	0,004	1,38	0,20	
	Compactación	0-100	STP	A, B	0,09	0,02	0,41 ^c	0,003	0,02	0,010	1,41	0,07	
		0-100	BORDE STP	C	0,10	0,02	0,44 ^b	0,003	0,02	0,010	1,34	0,04	
		0-100	NT	D	0,05	0,03	0,50 ^a	0,004	0,02	0,010	1,32	0,05	
	Compactación	100-200	TODAS	A,B,C,D	0,10	0,05	0,43	0,004	0,02	0,005	1,44	0,16	
	Maíz 2016/2017	0-100	TODAS	A,B,C,D	0,08	0,02	0,44	0,003	0,03	0,001	1,47	0,08	
	Maíz 2016/2017	100-200	STP	A,B,C	0,09	0,03	0,43 ^b	0,003	0,02	0,010	1,51	0,14	
			NT	D	0,05	0,08	0,50 ^a	0,010	0,03	0,010	1,39	0,19	
	Videla	Girasol 2017	0-100	STP	A,B	0,10	0,03	0,44 ^a	0,005	0,02 ^a	0,002	1,36	0,08
			0-100	NT	C,D	0,11	0,04	0,45 ^b	0,004	0,01 ^b	0,002	1,66	0,22
Girasol 2017		100-200	STP	A,B	0,11	0,05	0,43 ^b	0,004	0,02 ^b	0,010	1,43	0,19	
		100-200	NT	C,D	0,05	0,08	0,47 ^a	0,004	0,01 ^a	0,010	1,34	0,17	
Maíz 2018		0-100	STP	A,B	0,10	0,02	0,46 ^b	0,003	0,03 ^b	0,005	1,49	0,09	
		0-100	NT	C,D	0,07	0,02	0,50 ^a	0,003	0,08 ^a	0,010	1,32	0,05	
Maíz 2018		100-200	STP	A,B	0,09	0,03	0,42 ^b	0,003	0,01	0,002	1,52	0,13	
		100-200	NT	C,D	0,05	0,05	0,48 ^a	0,003	0,01	0,010	1,34	0,10	

Letras diferentes entre distintas posiciones de muestreo en la misma profundidad indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$)

Para facilitar la interpretación, los resultados de cada sitio experimental se presentan por separado respetando la cronología de muestreo en cada uno de ellos.

Aurelia

Los contenidos hídricos que establecieron los límites del IHO para cada ρ_s medida luego de la compactación de las STP se muestran en la figura 3.2. En ésta, I y II corresponden a la profundidad de muestreo 0-100 mm mientras que III y IV a 100-200 mm. Además, se construyeron por separado diferentes IHO para las sendas de tránsito permanente (Fig.3.2. I y III) y zonas de cultivo sin tránsito (Fig.3.2. II y IV).

En la posición STP las constantes hídricas de θ_{CC} y θ_{PMP} fueron de 0,29 y 0,13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en el estrato superficial y en la posición NT éstas fueron de 0,31 y 0,19 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. En todos los casos el límite superior (Ls) del IHO quedó definido por θ_{CC} y el límite inferior (Li) por θ_{RP} . La ρ_s crítica (ρ_{sc}) en la cual el IHO=0, en el estrato superficial (0-100 mm) fue 1,33 y 1,43 g cm^{-3} en las posiciones STP y NT respectivamente, mientras que en el estrato subsuperficial (100-200 mm) fue 1,34 y 1,39 g cm^{-3} en STP y NT.

En las STP, en ambas profundidades, las ρ_s promedio de los tratamientos T1 y T2 fueron superiores a la ρ_{sc} por lo que, aún cuando el contenido de humedad del suelo se encuentre entre θ_{CC} y θ_{PMP} , la RP limitará el crecimiento de las raíces de los cultivos. En la zona de cultivo libre de tránsito de maquinaria (NT), en el estrato superficial, todos los tratamientos presentaron valores promedio de ρ_s próximos a 1,26 g cm^{-3} por lo que los cultivos se desarrollarán sin restricciones de RP y aireación cuando los contenidos hídricos del suelo se encuentren entre 0,23 y 0,31 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Por otro lado, en la profundidad 100-200 mm los valores de densidad promedio por tratamiento fueron menores a la ρ_{sc} , aunque la amplitud del IHO fue casi nula (0,02 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para dichos valores.

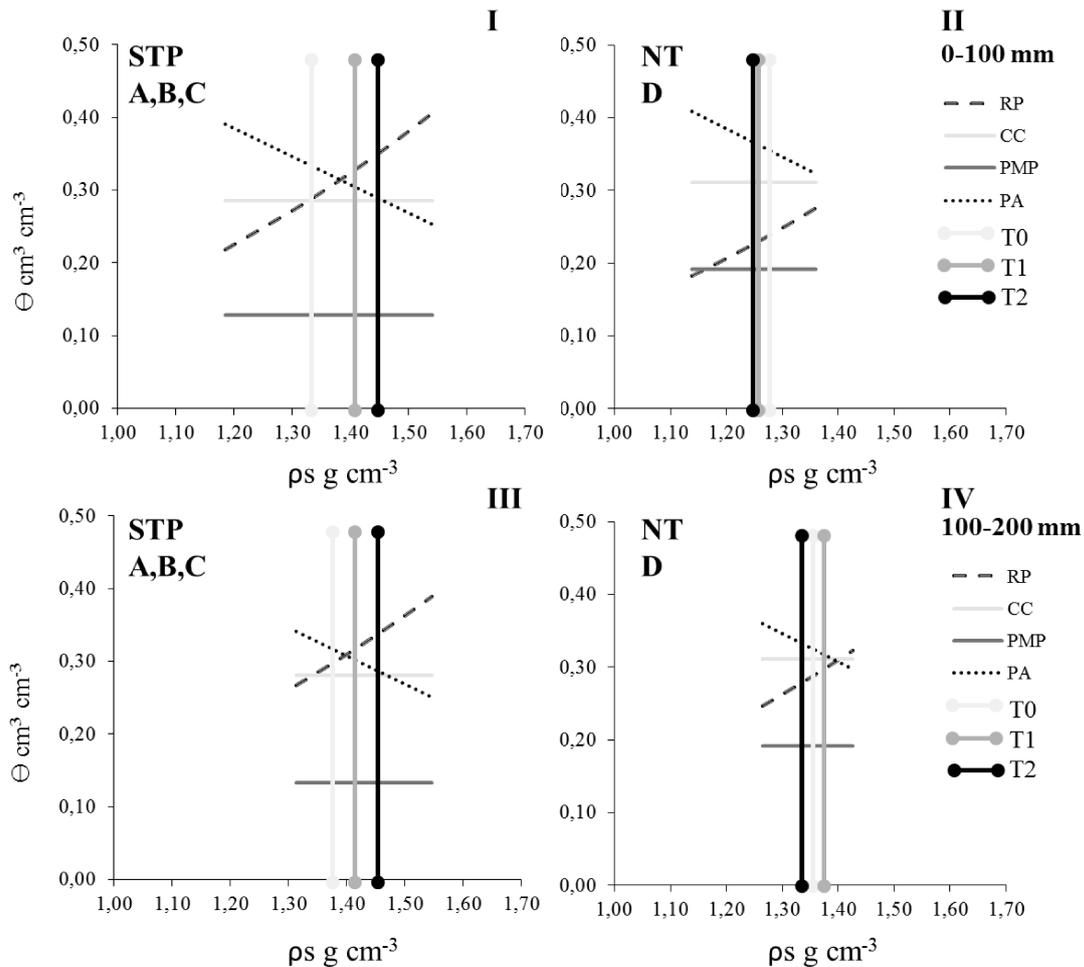


Fig.3.2. Intervalo hídrico óptimo luego de la compactación de las sendas de tránsito permanente (STP). Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en STP y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

En la figura 3.3. se presentan los IHO correspondientes al momento de muestreo posterior a la cosecha mecánica del cultivo de maíz 2016. En las STP, en las dos profundidades de muestreo, el IHO quedó definido por el θ_{CC} como L_s ($0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y por θ_{RP} como L_i (Fig.3.4. I y III). Las ρ_{sc} en esta posición fueron de 1,22 y de 1,36 g cm^{-3} en el estrato superficial y subsuperficial, respectivamente. En los dos casos los valores promedio de ρ_s por tratamiento superaron a sus respectivas ρ_{sc} ($T_0=1,34$; $T_1=1,42$ y $T_2=1,47 \text{ g cm}^{-3}$ de 0-100 mm y $T_0=1,38$, $T_1=1,46$ y $T_2=1,48 \text{ g cm}^{-3}$ de 100-200 mm), indicando severas restricciones para el desarrollo radicular.

Por otra parte, en la zona NT, en los primeros 100 mm de suelo, el IHO estuvo delimitado en la parte superior por θ_{CC} ($0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y en la parte inferior por θ_{RP} para todo el rango de ρ_s medidas ($1,20\text{-}1,34 \text{ g cm}^{-3}$), aumentando con el incremento de ρ_s (Fig.3.3. I). En el estrato subsuperficial se observó que hasta la $\rho_s=1,35$ el Ls quedó definido por θ_{CC} ($0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y que entre $\rho_s=1,35$ y la ρ_{sc} el Ls fue θ_{PA} , el cual decrece con el aumento de ρ_s (Fig.3.3 IV). Al igual que en el estrato superficial, el Li fue definido para todo el rango de ρ_s encontradas por θ_{RP} . Las ρ_{sc} fueron $1,43$ y de $1,41 \text{ g cm}^{-3}$ en el estrato superficial y subsuperficial respectivamente, siendo superiores a los valores de ρ_s promedio de los distintos tratamientos (Fig.3.3 II y IV).

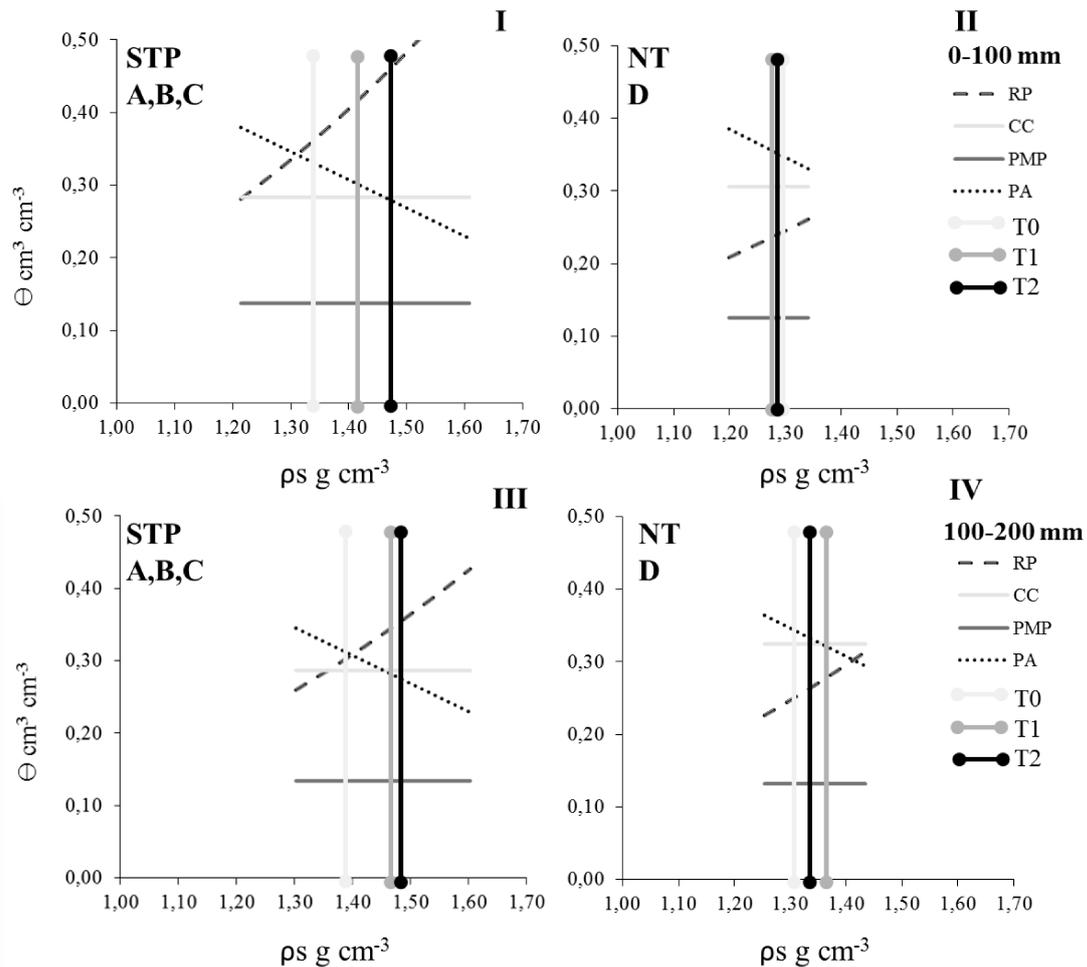


Fig.3.3. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de maíz 2016. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

Luego de la cosecha mecánica del cultivo de soja 2016/2017 se observó que el IHO en la STP en las dos profundidades de muestreo evaluadas (Fig 3.4. I y III) presentó un comportamiento similar a los anteriores momentos de muestreo (Fig. 3.2. I y III, Fig. 3.3. I y III). Los valores promedio de ρ_s de los tratamientos fueron $T_0 < T_1 < T_2$ y en todos los casos fueron superiores a la ρ_{sc} . Además, en las ρ_s medidas menores a la ρ_{sc} los límites del IHO fueron establecidos por θ_{CC} ($0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y θ_{RP} ($0,25$ y $0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en la menor ρ_s medida en las profundidades 0-100 mm y 100-200 mm).

En la posición NT, en el estrato superficial (Fig. 3.4. II) se observó que el Ls del IHO fue definido por θ_{CC} ($0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) hasta la ρ_s $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ y por θ_{PA} desde éste valor de ρ_s hasta la ρ_{sc} ($1,41 \text{ g cm}^{-3}$), mientras que el Li fue definido para todo el rango de ρ_s medido por θ_{RP} . Los valores de ρ_s promedio de los distintos tratamientos fueron similares entre sí y próximos a $1,33 \text{ g cm}^{-3}$ por lo que Li definido por el θ_{RP} en esta ρ_s alcanza un valor de $0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. En la misma posición, en la profundidad de muestreo 100-200 mm, las ρ_s promedio de los distintos tratamientos fueron próximas a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ y fueron menores a la ρ_{sc} ($1,46 \text{ g cm}^{-3}$), por lo que en esta ρ_s el Ls fue de $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y el Li de $0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Fig.3.4.IV).

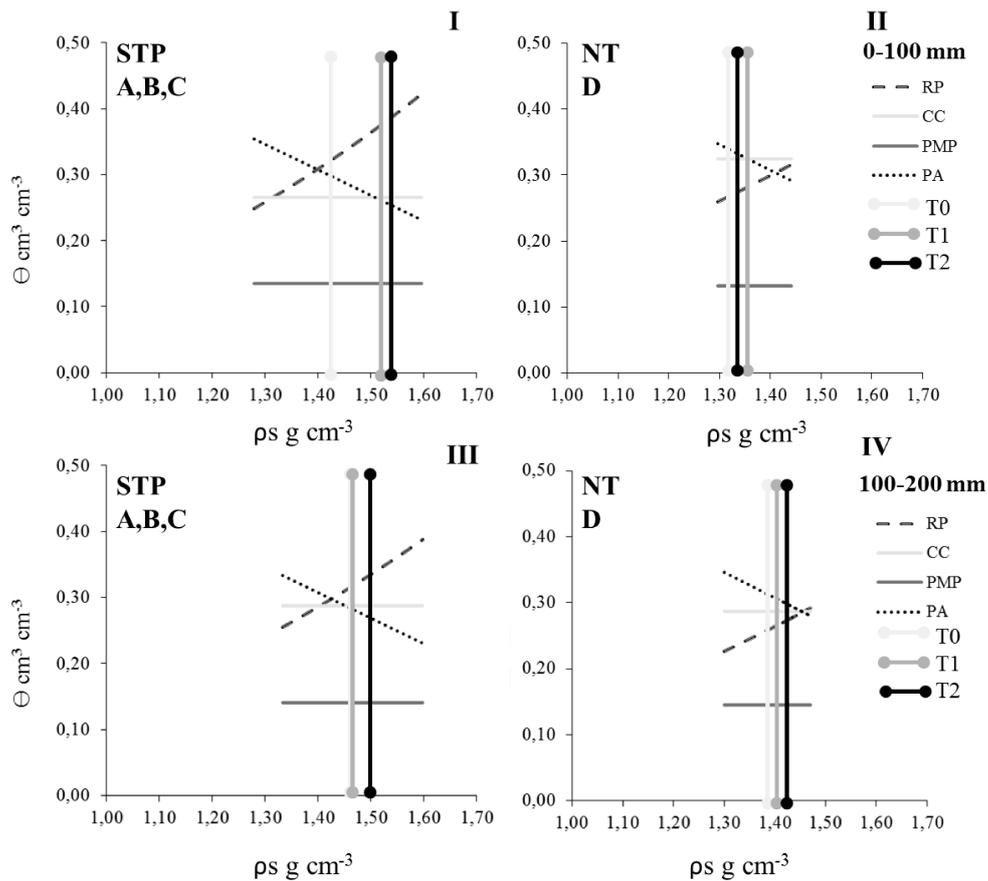


Fig.3.4. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo soja 2016/2017. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

En la figura 3.5. se presentan los IHO de las distintas posiciones y profundidades de muestreo obtenidos luego de la cosecha del cultivo de soja 2017/2018. En la posición STP, en las dos profundidades estudiadas, los límites superiores e inferiores estuvieron definidos por θ_{CC} y θ_{RP} en todo el rango de ρ_s medidas y los valores promedios de ρ_s para los diversos tratamientos fueron superiores a las ρ_{sc} (1,35 y 1,36 g cm^{-3} de 0-100 y 100-200 mm respectivamente; Fig 3.5. I y III), por lo que la calidad física del suelo resulta restrictiva para el desarrollo de los cultivos aún en condiciones de humedad de suelo próximos a CC. En el estrato superficial, todos los tratamientos presentaron ρ_s próximas a 1,46 g cm^{-3} (Fig. 3.5.I) al igual que los tratamientos T0 y T1 en el estrato subsuperficial, mientras que el T2 presentó el mayor valor de ρ_s promedio (1,58 g cm^{-3} ; Fig.3.5.III).

Por otra parte, el IHO fue más amplio en la posición NT en el estrato superficial (0-100 mm) que en el estrato subsuperficial (100-200 mm) para los valores de ρ_s promedio hallados en los distintos tratamientos (Fig. 3.5. II y IV). En ambas profundidades la ρ_{sc} fue de $1,41 \text{ g cm}^{-3}$ y el Li de los IHO fue definido por θ_{RP} . Sin embargo, en el estrato superficial el Ls fue θ_{CC} para todo el rango de ρ_s medidas mientras que en el estrato subsuperficial θ_{CC} constituyó el Ls hasta la $\rho_s=1,38 \text{ g cm}^{-3}$ y entre este valor de ρ_s y la ρ_{sc} el Ls fue definido por θ_{PA} .

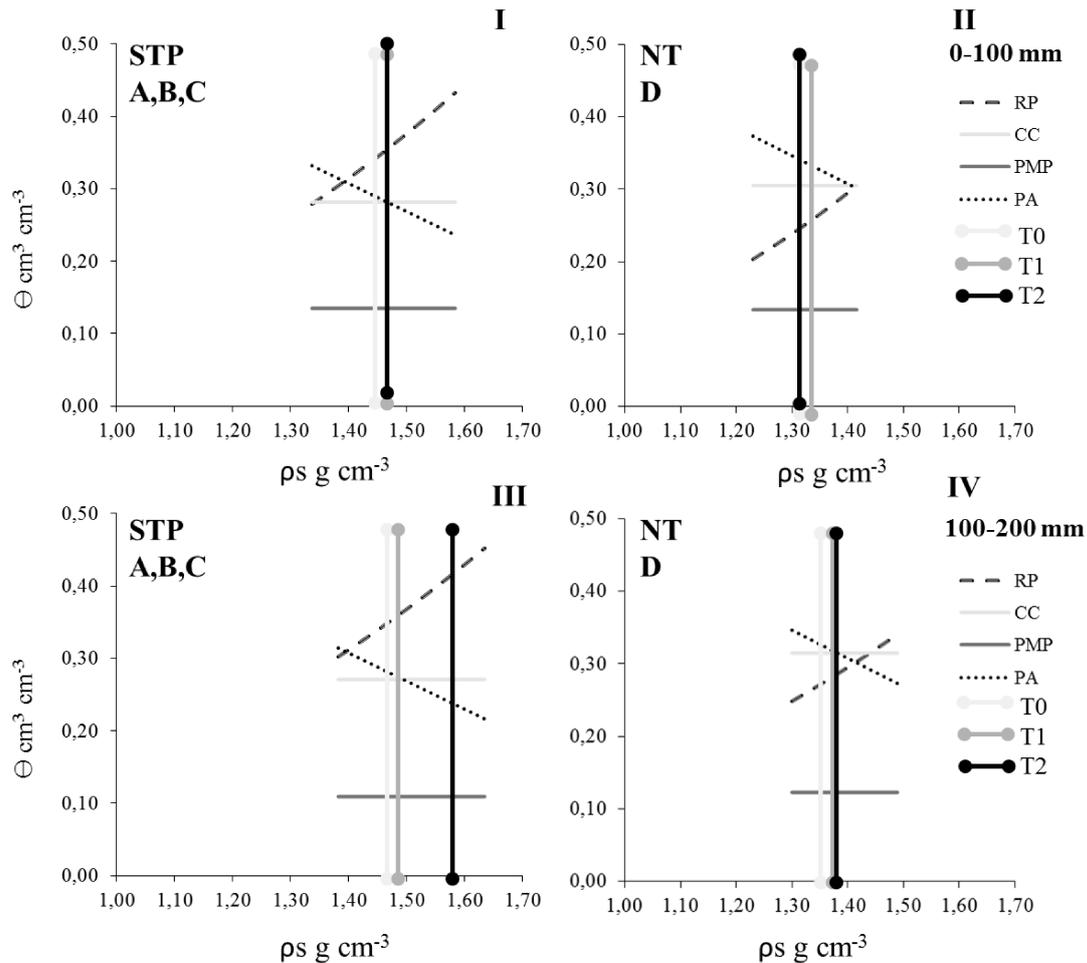


Fig.3.5. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo soja 2017/2018. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

Luego de la cosecha mecánica del cultivo de trigo 2018 se observó mayor amplitud de los IHO independientemente de las posiciones y profundidades de muestreo

evaluadas respecto de los intervalos hídricos óptimos obtenidos luego de la cosecha de los cultivos anteriores (Figs. 3.2., 3.3., 3.4. y 3.5.).

En la posición STP, en las dos profundidades de muestreo, los límites del IHO fueron θ_{CC} y θ_{RP} y todos los tratamientos presentaron valores promedio de ρ_s menores a las ρ_{sc} (1,48 y 1,45 g cm^{-3}). En la profundidad 0-100 mm, el tratamiento T0 presentó un valor promedio de ρ_s diferente de los demás tratamientos (T0=1,37, T1=1,45 y T2=1,47 g cm^{-3}). Sin embargo, en todos los casos la amplitud de los IHO fue estrecha (T0=0,04 T1 y T2= 0,01 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en el estrato superficial y próximos a 0,02 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en el estrato subsuperficial).

En la posición NT, en las dos profundidades de muestreo, el Ls del IHO fue definido por θ_{CC} (0,32 y 0,29 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de 0-100 mm y de 100-200 mm, respectivamente) y el Li por θ_{RP} en todo el rango de ρ_s medidas. Los valores de ρ_s promedio para los tratamientos fueron próximos a 1,28 en el estrato superficial y a 1,37 g cm^{-3} en el subsuperficial, siendo menores que la ρ_{sc} .

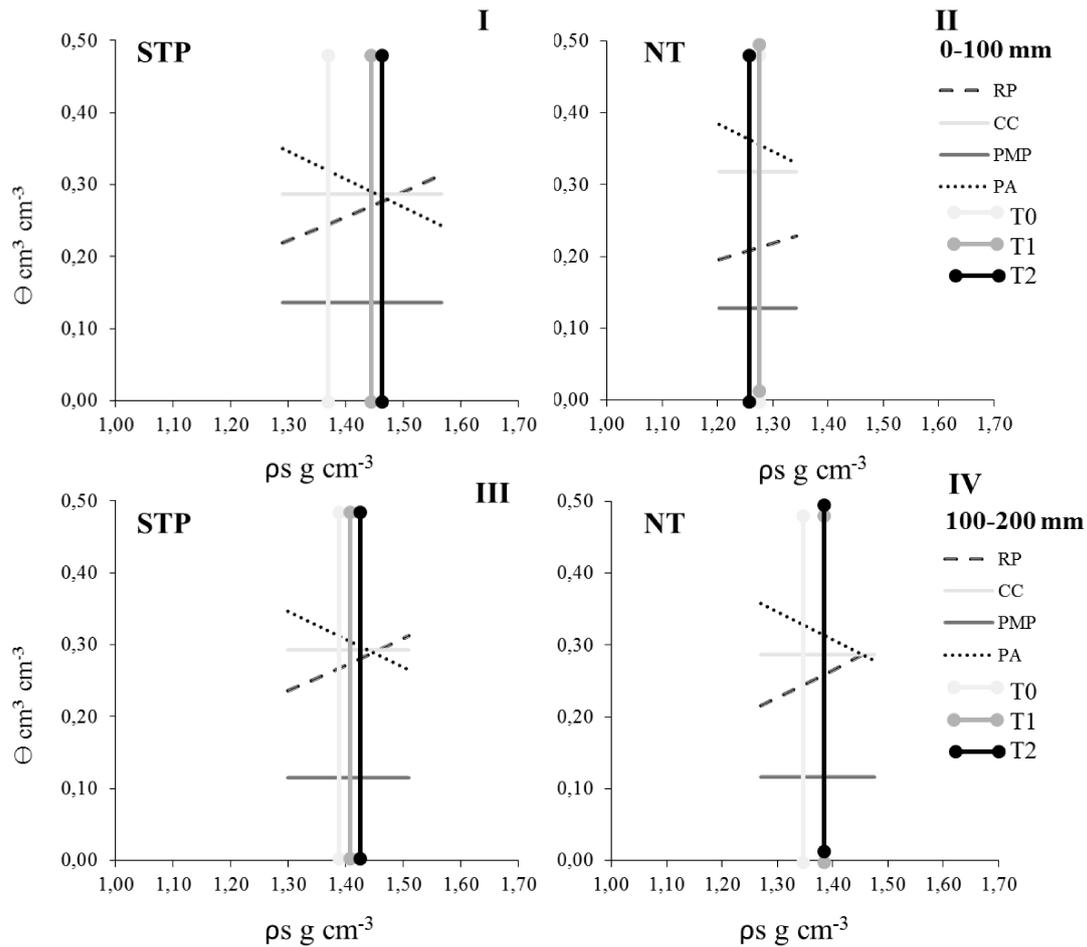


Fig.3.6. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de trigo 2018. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT) 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

Videla

En la figura 3.7. se presentan los IHO correspondientes a las dos profundidades de muestreo luego de la compactación en las STP. A partir de las diferencias estadísticas obtenidas en los valores de compactación relativa (%) en el estrato superficial (0-100 mm) (Capítulo II, Fig. 2.8.I) se agruparon las muestras de las posiciones A y B para establecer el IHO en la STP. Además, se construyó un IHO para la posición C (borde de STP) y uno para la posición D (NT). En el estrato subsuperficial no se detectaron diferencias en los valores de compactación relativa entre las diferentes

posiciones de muestreo por lo que para construir el IHO en esta profundidad se agruparon los datos de todas las posiciones (A, B, C, D).

El Ls del IHO en todas las posiciones consideradas fue definido por θ_{CC} mientras que el Li fue θ_{RP} (Fig.3.7. I, II, III y IV). En la STP (Fig. 3.7.I) se puede observar que sólo el valor promedio de ρ_s del T0 es menor a la ρ_{sc} . Sin embargo, debido a la elevada variabilidad de los valores de ρ_s medidas, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. La ρ_{sc} en esta posición es $1,30 \text{ g cm}^{-3}$. En la posición C (borde de STP, Fig. 3.7.II), la ρ_{sc} fue de $1,38 \text{ g cm}^{-3}$ y no fue superada por ninguna de las ρ_s promedio de los diferentes tratamientos. Por otra parte, en la posición NT (Fig. 3.7.III) las ρ_s medidas fueron notablemente menores a las halladas en las demás posiciones y variaron entre $1,05-1,33 \text{ g cm}^{-3}$. La ρ_{sc} fue $1,41 \text{ g cm}^{-3}$ y la amplitud del IHO en esta posición, considerando que el valor promedio de ρ_s en los diferentes tratamientos fue próxima a $1,22 \text{ g cm}^{-3}$, fue $0,08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. En el estrato subsuperficial (Fig.3.7.IV), considerando todas las posiciones de muestreo agrupadas, se observa que sólo el T0 presenta un valor promedio de ρ_s menor que la ρ_{sc} , por lo que en T1 y T2 las condiciones físicas del suelo serán restrictivas para el desarrollo de los cultivos.

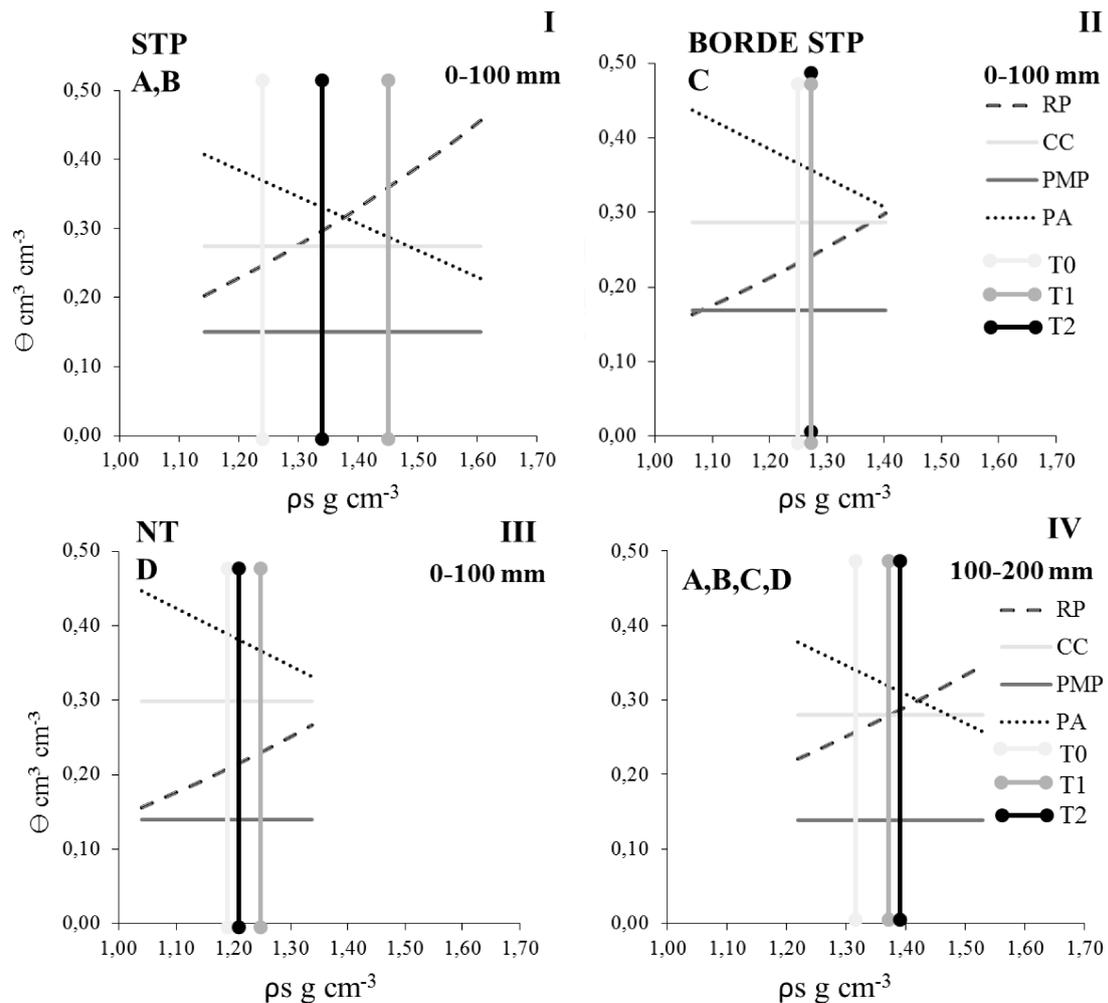


Fig.3.7. Intervalo hídrico óptimo luego de la compactación de las STP. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

Luego de la cosecha mecánica del cultivo de maíz se observa un incremento de las ρ_s medidas en todas las posiciones de muestreo (Fig.3.8.). Esto se atribuye a la ruptura de los agregados y al reacomodamiento de las partículas del suelo durante un evento climático extremo (inundación) ocurrido durante los meses de marzo y abril del año 2016. El agua facilita el movimiento y la aproximación de las partículas del suelo al actuar como lubricante, causando una disminución de su volumen y, consecuentemente, un incremento de la ρ_s .

En el estrato superficial de suelo no se encontraron diferencias significativas en los valores de compactación relativa entre las distintas posiciones de muestreo (Fig.2.8. II), por lo que el IHO fue construido con los datos obtenidos de las CRH y la curva de RP de las posiciones A, B, C y D. La ρ_{sc} fue de $1,38 \text{ g cm}^{-3}$ y fue superada por los valores promedio de ρ_s de todos los tratamientos (próximos a $1,43 \text{ g cm}^{-3}$), por lo que en estas ρ_s el $IHO=0$ (Fig.3.8. I). Sin embargo, es importante destacar que en las ρ_s medidas $<\rho_{sc}$ el L_s del IHO fue definido por θ_{CC} ($0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y el L_i por θ_{RP} ($0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, en la menor ρ_s medida).

En el estrato subsuperficial, para construir el IHO correspondiente a la STP se agruparon las muestras pertenecientes a las posiciones A, B y C. En esta última posición de muestreo el valor de CR no se diferenció estadísticamente de los obtenidos en las posiciones A, B y D. Sin embargo, en C superó ampliamente el valor de 85% considerado por Håkansson (2005) como una condición favorable para el crecimiento de los cultivos. Por este motivo las muestras de obtenidas en esta posición (C) fueron agrupadas con las colectadas en las posiciones A y B. En esta posición (STP, Fig.3.8.II.) las ρ_s promedio fueron diferentes entre tratamientos y superiores a la ρ_{sc} ($1,38 \text{ g cm}^{-3}$). El T2 presentó el mayor valor ($1,58 \text{ g cm}^{-3}$). En esta profundidad de muestreo (100-200 mm), en ambas posiciones consideradas (STP y NT), el IHO estuvo limitado en la parte superior por θ_{CC} y en la inferior por θ_{RP} . En la zona libre de tránsito de maquinaria (NT, Fig.3.8.III.) todos los tratamientos presentaron similares valores promedios de ρ_s (próximos a $1,34 \text{ g cm}^{-3}$) y fueron menores a la ρ_{sc} ($1,39 \text{ g cm}^{-3}$), por lo que la calidad física del suelo puede considerarse como favorable para el crecimiento de los cultivos, aún luego de presentarse un evento climático desfavorable para la reestructuración del suelo.

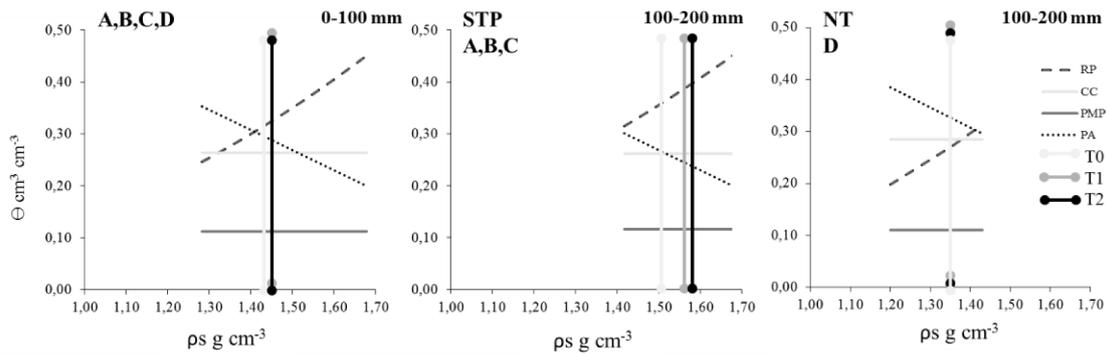


Fig.3.8. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de maíz 2016/2017. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

Luego de la cosecha mecánica del cultivo de girasol 2017 se observó que los límites de los intervalos hídricos óptimos estuvieron definidos en la parte superior por θ_{CC} mientras que en la parte inferior por θ_{RP} independientemente de las distintas posiciones y profundidades de muestreo (Fig.3.9. I, II, III y IV).

En la posición STP, en el estrato superficial, el valor promedio de las ρ_s de los diferentes tratamientos fueron 1,33, 1,35 y 1,37 g cm⁻³ en T0, T1 y T2, respectivamente. Todos ellos superaron a la $\rho_{sc}=1,31$ g cm⁻³ (Fig.3.9.I.). Similar comportamiento se observó en la misma posición en el estrato subsuperficial (100-200 mm), donde la $\rho_{sc}=1,36$ g cm⁻³ y los valores promedio de ρ_s de los distintos tratamientos fueron 1,40, 1,45 y 1,57 g cm⁻³ en T0, T1 y T2 respectivamente (Fig.3.9.III).

En la zona libre de tránsito (NT), independientemente de la profundidad de muestreo, los valores promedios de ρ_s de los distintos tratamientos fueron próximos entre sí y menores a las ρ_{sc} (Fig.3.9.II y IV). Las ρ_{sc} fueron de 1,40 y 1,38 g cm⁻³ en el estrato superficial y subsuperficial, respectivamente. En el estrato superficial se observó una mayor amplitud del IHO en la ρ_s promedio de los distintos tratamientos (0,07 cm³ cm⁻³, 1,26 g cm⁻³) respecto de la amplitud del IHO en el estrato subsuperficial para el valor promedio de ρ_s de los distintos tratamientos (0,02 cm³ cm⁻³, 1,34 g cm⁻³).

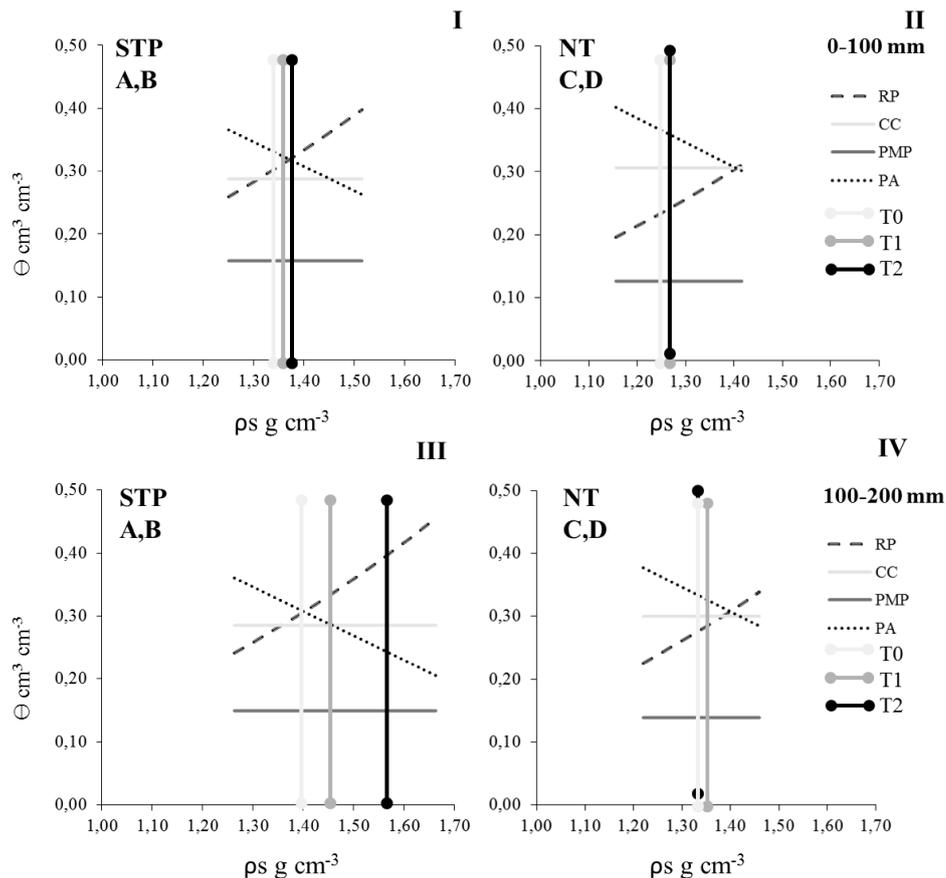


Fig.3.9. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de girasol 2017. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

Por último, en la figura 3.10. se observan los intervalos hídricos óptimos correspondientes a las muestras de suelo recolectadas luego de la cosecha mecánica del cultivo de maíz 2018. Coincidentemente con los IHO previos, los límites superiores fueron establecidos por θ_{CC} y los límites inferiores por θ_{RP} en las dos posiciones, independientemente de la profundidad de muestreo (Fig.3.10. I, II, III, IV).

En la posición STP los valores de ρ_s promedio para los tratamientos fueron superiores a las ρ_{sc} (1,32 y 1,39 g cm^{-3} ; 0-100 y 100-200 mm respectivamente) (Fig.3.10. I y III). En la posición NT los valores de ρ_{sc} fueron de 1,41 y 1,38 g cm^{-3} en el estrato superficial y subsuperficial respectivamente y las ρ_s promedio de los tratamientos no las superaron (Fig.3.10 II y IV). Sin embargo, al igual que luego de la

cosecha de girasol, la amplitud del IHO en el estrato superficial superó al del estrato subsuperficial para los valores promedio de ρ_s hallados en los distintos tratamientos que fueron similares entre sí (0,07 y 0,03 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en las ρ_s de 1,26 y 1,33 g cm^{-3} para las profundidades de muestreo 0-100 mm y 100-200 mm, respectivamente).

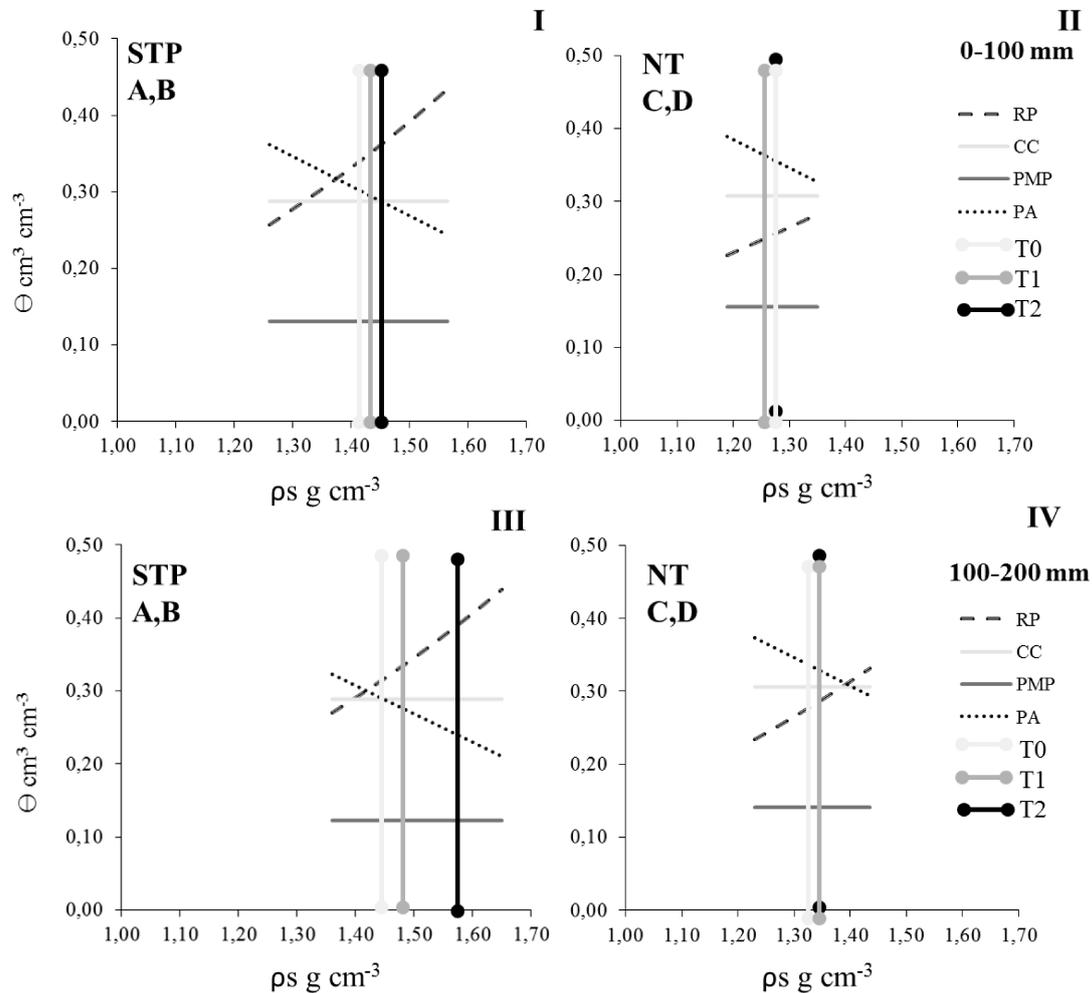


Fig.3.10. Intervalo hídrico óptimo luego de la cosecha mecánica del cultivo de maíz 2018. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (ρ_s) para θ críticos de porosidad de aeración (PA) capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en sendas de tránsito permanente (STP) y áreas no transitadas (NT). 0-100 y 100-200 mm corresponden a las distintas profundidades de muestreo. Líneas verticales representan los valores promedio de ρ_s para cada tratamiento. T0: control; T1 y T2: STP compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

Los resultados indican que, tanto en Aurelia como en Videla, los IHO disminuyeron con el incremento de la ρ_s . Mayores valores de ρ_s resultaron en mayores valores de RP y menores valores de porosidad de aireación. Estos resultados concuerdan con los reportados por otros autores (Da Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999; Wilson

et al., 2013). Por otro lado, los coeficientes de ajuste de las curvas de retención hídrica presentaron diferencias entre posiciones en la misma profundidad de muestreo (Tabla 3.2.), pero los mismos se mantuvieron constantes con los incrementos en la ψ_s . Estos resultados coinciden con los hallados por Zou et al. (2001), Imhoff et al. (2006) y Fernandez et al. (2017).

En general, en las STP, independientemente de las profundidades de muestreo, las ψ_s promedio de los distintos tratamientos fueron superiores a las ψ_{sc} , por lo que los IHO fueron nulos o casi nulos. Esto indica que la estructura del suelo en esta posición se encuentra degradada y que, independientemente del contenido hídrico del suelo, la condición física del suelo será restrictiva para el crecimiento de las raíces de los cultivos (Leão et al., 2006). La compactación causada por el tránsito de la maquinaria en las STP alteró la distribución del tamaño de poros del suelo, provocando una disminución del volumen de macroporos y un incremento del volumen de microporos y, como consecuencia, los valores de ψ_s aumentaron. Estos resultados concuerdan con Che et al., 2014. Similarmente, Zou et al. (2000) estudiaron el efecto de la compactación sobre los intervalos hídricos óptimos de suelos con diferentes materiales de origen y concluyeron que el IHO se reduce al incrementar la compactación en suelos cuyo material de origen es loess, lo que concuerda con los suelos estudiados en esta tesis.

Por otra parte, en las zonas libres de tránsito (NT), en los dos sitios en estudio y en las dos profundidades consideradas, el L_i de los IHO fue definido por θ_{RP} mientras que el L_s varió entre θ_{CC} y θ_{PA} . Esto indica que, aunque la humedad del suelo se mantenga dentro del rango de agua útil (intervalo determinado por la humedad a capacidad de campo y la humedad en el punto de marchitez permanente), las plantas no podrán lograr su potencial de crecimiento debido a que las raíces experimentarán estrés por falta de aeración o por elevada resistencia mecánica, dependiendo si el suelo está húmedo o seco y del valor de ψ_s . En esta posición los valores de ψ_s fueron menores. Esto puede atribuirse al proceso de regeneración de la estructura que se fue produciendo gradualmente a través del tiempo. La ausencia de recompactación del suelo favoreció un mayor desarrollo de las raíces en el suelo, las que físicamente inducen la formación de fisuras y poros. Además, las raíces afectan el número y amplitud de los ciclos de secamiento-humedecimiento del suelo que ocurren naturalmente (Carrizo et al., 2018),

los que también son responsables de la formación de nuevas unidades estructurales y poros (Horn & Dexter, 1988). Por otro lado, las raíces producen exudados que ayudan a aglutinar las partículas del suelo y los agregados de menor tamaño, favoreciendo la estabilización la estructura. Dichos exudados estimulan la actividad microbiana del suelo que también contribuye a lograr una estructura del suelo de mayor calidad (Tisdall et al., 1978; Materechera et al., 1994; Czarnes et al., 2000), la que en este estudio se reflejó claramente en la disminución de los valores de ρ_s y en intervalos hídricos óptimos de mayor amplitud. Además, las condiciones físicas del suelo gradualmente se fueron tornando más uniformes, lo que se constató con la disminución de la variabilidad de las ρ_s medidas y la falta de diferencias significativas de las ρ_s promedio entre tratamientos. Como consecuencia, tanto en Aurelia como en Videla, a pesar de las diferencias de suelo, clima y cultivos, el uso del sistema de TC produjo una mejora de la calidad física del suelo en la zona no transitada, *i.e.* la mayor parte del lote, independientemente del grado de compactación medido en las STP.

b) Emisión de óxido nitroso

En Aurelia, la precipitación acumulada desde que se instalaron las bases de las cámaras hasta la última fecha de muestreo (24/04/18-24/05/18) fue 200 mm y desde el inicio del año hasta el último muestreo (01/01/18-24/05/18) fue 326 mm. Las precipitaciones medidas fueron diferentes a las precipitaciones medias históricas (1967-2017), que presentaron valores medios mensuales de 94 y 46 mm en los meses de abril y mayo y un total de 533 mm desde enero a mayo. Durante el período de medición se presentaron dos eventos de precipitaciones mayores a 50 mm, mientras que se registraron otros cuatro eventos con precipitaciones promedio de 18 mm (Fig.3.11.).

En Videla, la precipitación acumulada desde la instalación de las bases hasta la última fecha de muestreo (05/01/2018-05/02/2018) fue 46 mm, en dos eventos de precipitaciones (Fig.3.11.). Las precipitaciones medidas fueron menores a la media mensual histórica (1960-2017), que es 144 mm. Sin embargo, desde la primera toma de muestras de gases (tres días después de la instalación de las bases) hasta el final de las mediciones (08/01/2018-05/02/2018), sólo se registró un único evento de precipitaciones de 28 mm (Fig. 3.11.).

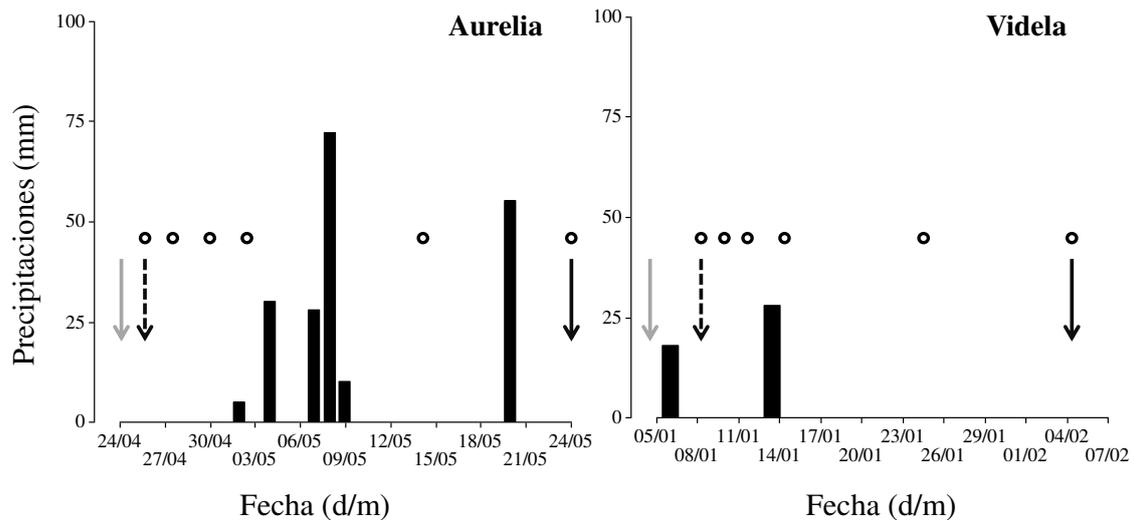


Fig.3.11. Precipitaciones diarias (mm) registradas en cada sitio experimental durante el período de mediciones de óxido nitroso. Flechas grises indican fecha de instalación de las bases de las cámaras para la determinación de óxido nitroso. Flechas de color negro (punteada y rellena) indican fecha de primer y último muestreo respectivamente. Círculos indican fechas de muestreo en cada sitio experimental.

La temperatura media del aire durante el período de medición varió entre 9-22 °C en Aurelia y entre 20-33°C en Videla (Fig. 3.12.). La temperatura promedio en los primeros 50 mm del suelo fue de 18,2°C en Aurelia y de 28,1°C en Videla (Fig. 3.12.).

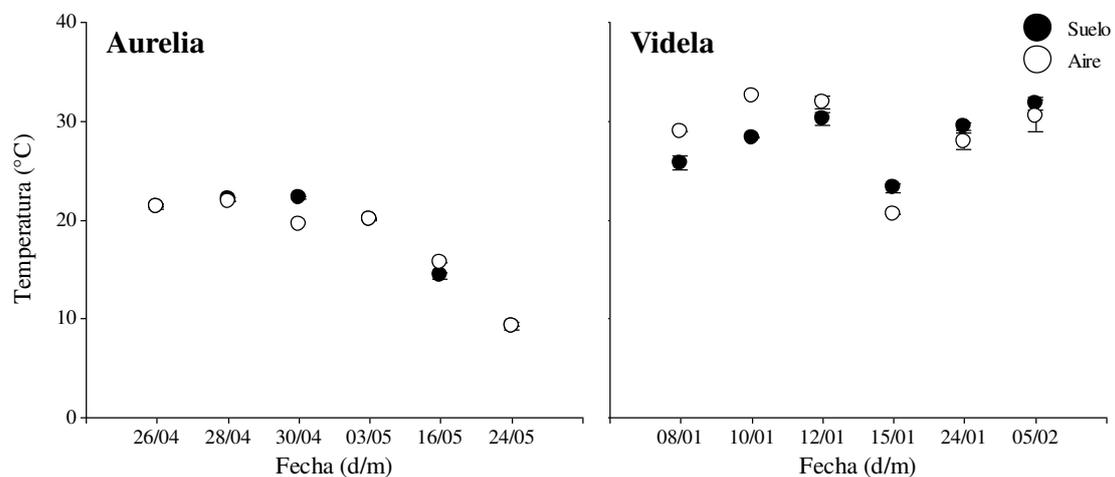


Fig.3.12. Temperatura del suelo y del aire (°C) en cada fecha de muestreo y sitio experimental. Los círculos representan el valor medio y las barras el desvío estándar.

En la figura 3.13. se presenta la evolución del contenido de nitrógeno inorgánico del suelo (N) en forma de nitratos (NO_3^-) en función de los diferentes tratamientos, posiciones, fechas de muestreo y sus interacciones en cada sitio experimental. En el

sitio Aurelia, la menor y la mayor concentración de N-NO₃ fue de 1,8 y 22,6 mg kg⁻¹, respectivamente, y el valor promedio fue de 7,7 mg N-NO₃ kg⁻¹. En este sitio, las interacciones tratamiento*fecha de muestreo, posición*fecha de muestreo y tratamiento*posición de muestreo no fueron estadísticamente significativas (p>0,05) (Fig.3.13. a), c) y e) respectivamente).

En Videla se observaron concentraciones de N-NO₃ entre 1,5 y 38,4 mg kg⁻¹, con un valor promedio de 12,7 mg kg⁻¹. En este sitio, sólo la interacción tratamiento*posición de muestreo fue significativa (p=0,02) (Fig. 3.13. b, d y f). El mayor contenido de N-NO₃ se observó en la posición T2*NT, que sólo se diferenció de la posición STP de ambos tratamientos, mientras que T2*STP presentó el menor contenido de N-NO₃ (Fig.3.13.f.). En este sitio, aunque no se detectaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos y posiciones en las distintas fechas de muestreo, se observó una disminución del contenido de N-NO₃ desde el 08/01/2018 hasta 12/01/2018 (Fig 3.13. b) y d). Esto sugiere que después de la lluvia ocurrida el 06/01/2018 la actividad microbiana se reactivó y, como consecuencia, los procesos de transformación de nitratos en otras formas químicas ocasionaron su disminución. Es sabido que los microorganismos requieren nitrógeno para generar los componentes celulares y que, además, durante los procesos de nitrificación-desnitrificación ocurren pérdidas de nitrógeno, lo que explicaría la disminución observada. En su ausencia (o cantidades muy reducidas), la población microbiana disminuye liberando sus constituyentes celulares en la rizosfera. Este fenómeno puede explicar el aumento en el contenido de nitratos que se observa a partir del día 12/01/2018. Con la ocurrencia de la nueva lluvia se repetiría el fenómeno antes explicado, lo que sería responsable de la nueva disminución en el contenido de nitratos luego del día 15/01/2018.

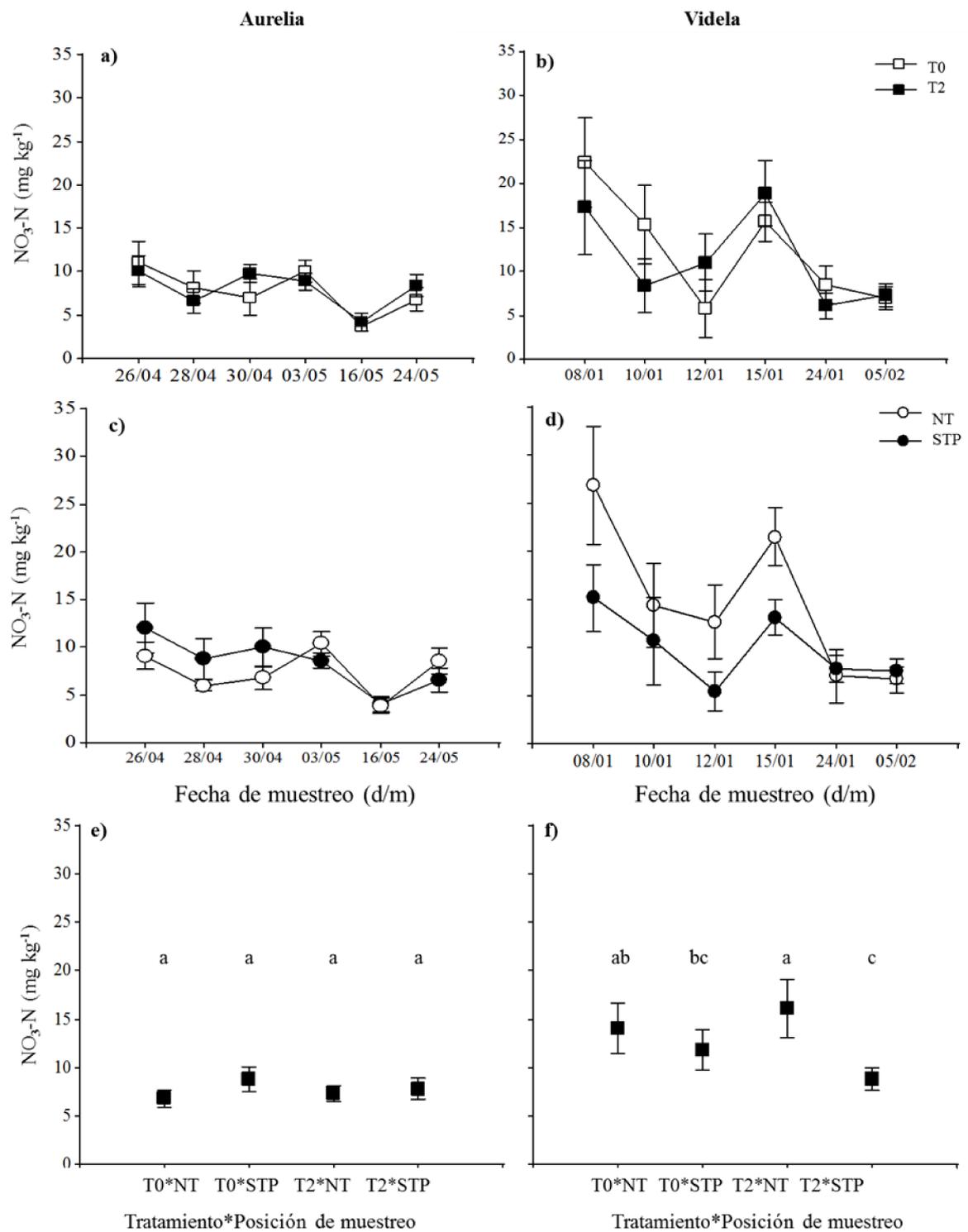


Fig.3.13. Evolución del contenido de N-NO_3 del suelo durante los experimentos en Aurelia y Videla. Las barras representan el error estándar. T0: tratamiento control. T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 4 MPa al inicio del experimento. STP: sendas de tránsito permanente; NT: zona de cultivo no transitada. En las figuras e) y f) letras diferentes indican diferencias significativas en la interacción tratamiento*posición ($\alpha=0,05$; LSD Fisher).

Por otra parte, la ρ_s fue afectada en los dos sitios por los tratamientos y la posición de muestreo ya que la interacción entre estos factores fue estadísticamente significativa ($p < 0,01$). En Aurelia, en los tratamientos evaluados, la ρ_s en la posición NT fue $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$, mientras que en las STP la ρ_s fue diferente entre tratamientos ($1,61$ en T2 y $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ en T0, respectivamente). En Videla, el mayor valor de ρ_s fue encontrado en la posición STP en el T2 ($1,51 \text{ Mg m}^{-3}$). En T0*STP y en T2*NT los valores de ρ_s fueron menores ($1,34$ y $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente) y diferentes de T0*NT ($1,25 \text{ Mg m}^{-3}$). Estos resultados se deben a que, en las sendas de tránsito permanente, la compactación generada por el tránsito de la maquinaria agrícola alteró la estructura y disminuyó el volumen de poros del suelo en función de la intensidad de tránsito, por lo que el incremento de ρ_s fue mayor en T2. Estos resultados coinciden con Richard et al., 2001, Botta et al., 2004 y Dexter, 2004.

En los dos sitios, el EPA no presentó diferencias entre tratamientos, posiciones y fechas de muestreo ni en sus interacciones ($p > 0,05$) (Fig. 3.14.). El suelo en el sitio Aurelia presentó los mayores valores de EPA (en promedio 48%), mientras que en Videla el promedio de todos los valores de EPA fue 11% (Fig. 3.14.). Algunos autores señalan que la compactación del suelo para un determinado contenido hídrico incrementa el EPA y que las tasas de emisión de N_2O aumentan con el incremento del EPA, siendo muy elevadas con contenidos hídricos de suelo próximos a saturación ($\text{EPA} > 85\%$) o cuando el espacio de poros con aire se encuentra bloqueado (Ruser et al., 2006; Ball et al., 2008). Estos autores consideraron al contenido de humedad del suelo y, consecuentemente, al EPA como los indicadores más importantes en la determinación de la magnitud de los flujos de N_2O .

La falta de diferencias significativas entre posiciones de muestreo principalmente en el sitio Aurelia, donde se registraron los mayores valores de EPA y los mayores eventos de precipitaciones, puede atribuirse a que los muestreos no se realizaron inmediatamente después de las precipitaciones. La diferencia de estructura entre posiciones pudo provocar un secamiento diferencial lo que, debido al tiempo transcurrido entre las precipitaciones y el muestreo, explicaría la similitud en los valores de humedad en ambas posiciones.

En Videla se observó una disminución del EPA desde el inicio de las mediciones hasta el 14/01/2018, fecha en que se produjo un incremento debido a las precipitaciones registradas (28 mm) en esa fecha. El EPA fue casi siempre inferior en las sendas de tránsito permanente, con excepción del momento en que se registró la precipitación. Los macroporos se destruyen en primer lugar cuando el suelo se compacta, por lo que además de disminuir el volumen de poros total también cambia la distribución del tamaño de poros (Richard et al., 2001). En general, la proporción de meso y microporos aumenta, que son las fracciones que retienen el agua en el suelo (Katou et al., 1987; Dexter, 2004). Esto explica que la humedad luego del evento de precipitación haya sido mayor en T2*STP y también el retardo en la disminución de la humedad del suelo que se produce en este tratamiento respecto de los otros, aunque al final el EPA es menor debido a la menor porosidad total.

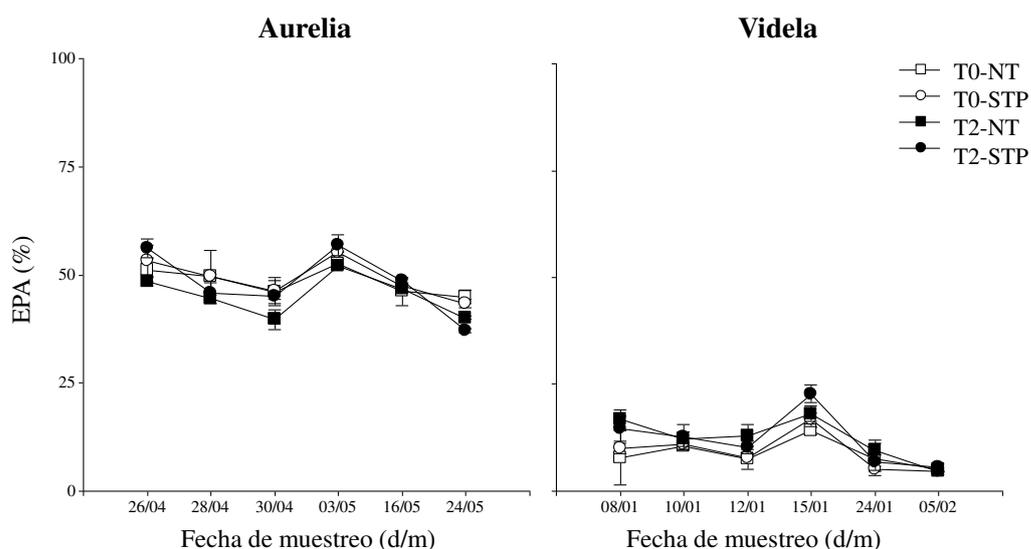


Fig.3.14. Evolución del espacio poroso del suelo con agua (EPA, %) durante los experimentos en Aurelia y Videla. Las barras representan el error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$; LSD Fisher).

Las emisiones de N_2O variaron entre 0,33 y 55,63 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ en Aurelia y desde 0,06 hasta 12,39 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ en Videla. En Aurelia, se observó un efecto significativo de las posiciones*fecha de muestreo ($p<0,05$). En este sitio, las STP presentaron las mayores emisiones en cuatro de las seis fechas de muestreo (Fig. 3.15.). En Videla, las emisiones de N_2O fueron bajas, el promedio fue de 3 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ y no se

diferenciaron entre tratamientos, posiciones y fechas de muestreo ni entre sus interacciones.

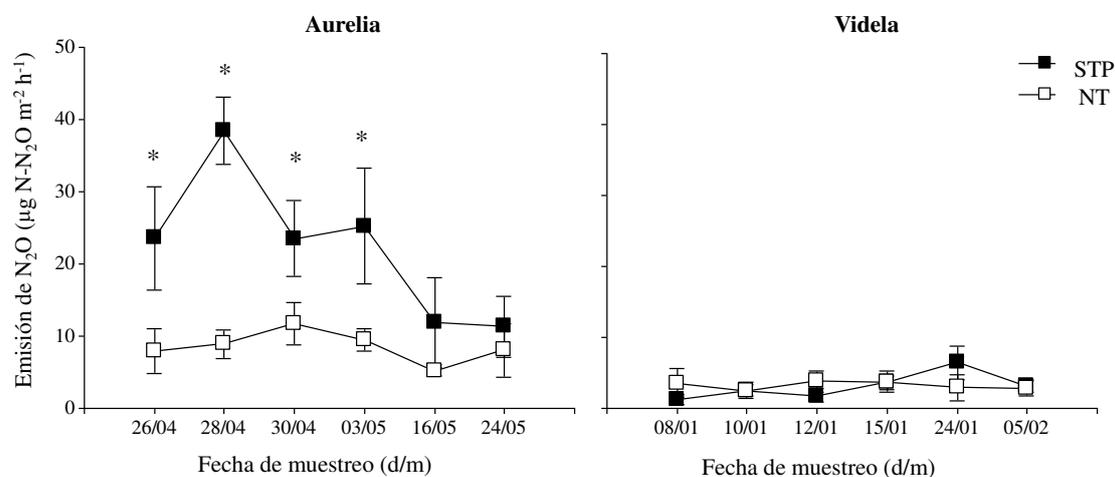


Fig.3.15. Emisiones de óxido nitroso ($\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$) en sendas de tránsito permanente y zonas libre de tránsito en función de las fechas de muestreo en cada sitio experimental. Los cuadrados indican el valor medio de emisiones en cada posición de muestreo. Las barras representan el error estándar. STP: sendas de tránsito permanente; NT: zona de cultivo sin tránsito. *: indica diferencias significativas entre posiciones de muestreo en cada fecha ($\alpha=0,05$; LSD Fisher).

La concentración de N inorgánico del suelo y el EPA están comúnmente asociados a las emisiones de N_2O (Álvarez et al., 2012; Cosentino et al., 2013) dado que las emisiones de óxido nitroso son producidas biológicamente en los suelos durante los procesos de nitrificación y desnitrificación (Smith & Arah, 1990). La nitrificación es la oxidación microbiana aeróbica del amonio en nitrato, donde el N_2O es un producto intermedio en la secuencia de las reacciones que pasa de las células microbianas al suelo y, en última instancia, a la atmósfera. La desnitrificación es la reducción microbiana anaeróbica del nitrato en gas de nitrógeno (N_2), siendo también el N_2O un producto intermedio en la secuencia de las reacciones en un medio reductor. Estos procesos pueden ocurrir simultáneamente en el mismo suelo debido a que entre las unidades estructurales puede haber buen flujo de oxígeno y, por lo tanto, ocurren reacciones aeróbicas, mientras que dentro de los agregados pueden existir micrositos en los que, por falta de oxígeno, ocurren reacciones anaeróbicas (Stevens et al., 1997). Estas situaciones varían con la compactación del suelo ya que dicho proceso afecta su estructura y, como resultado, el EPA (Ruser et al., 2006; Ball et al., 2008). La compactación incrementa el volumen de suelo vulnerable al proceso de desnitrificación,

especialmente a bajos potenciales mátricos, ya que el incremento de la densidad de suelo y la pérdida de macroporos en las zonas compactadas (STP) generan condiciones favorables para dicho proceso (Boone & Veen, 1994).

En Aurelia los resultados demuestran un incremento en las emisiones de N_2O en los suelos compactados por tránsito de maquinaria cuando el EPA estuvo próximo al 58% (Fig. 3.14 y Fig.3.15.). Las emisiones fueron moderadas y coinciden con los resultados reportados por Cosentino et al. (2013), ya que variaron en torno a $21,4 \pm 5,01 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$, siendo la temperatura media del suelo mayor a $14^\circ C$. Los resultados confirman que el estado de compactación alcanzado en las STP ejerce gran influencia sobre las emisiones de N_2O debido a que las emisiones de N_2O fueron diferentes entre posiciones de muestreo en cuatro de las seis fechas de muestreo (Fig.3.13 y Fig.3.15.).

Los suelos franco-limosos y limosos de la región pampeana llana se caracterizan por tener una baja tasa de infiltración (se produce encharcamiento) y reducida capacidad de drenaje debido a su textura y relieve (Sasal et al., 2006; Imhoff et al., 2010; Álvarez et al., 2014). Consecuentemente, en eventos de elevadas precipitaciones, estos suelos presentan alta proporción de espacio poroso con agua, lo que reduce la difusividad de los gases y la disponibilidad de oxígeno. Como consecuencia, durante el proceso de desnitrificación, la actividad de la enzima reductasa (paso de N_2O a N_2) se reduce, provocando una acumulación de N_2O y mayor emisión de este gas (Linn & Doran, 1984, Ball et al., 1999). Las emisiones de N_2O también pueden ser atribuidas a la nitrificación autotrófica. Bateman & Baggs (2005) estudiaron la contribución de los procesos de nitrificación/desnitrificación a las emisiones de N_2O del suelo con diferentes proporciones de EPA. Estos autores encontraron que la desnitrificación anaeróbica es responsable de las emisiones de N_2O cuando el EPA es cercano o mayor a 70%, la nitrificación autotrófica es el proceso dominante cuando el EPA varía entre 35-60% y la desnitrificación aeróbica es la responsable de las emisiones cuando el EPA es igual o menor al 20%. Por lo tanto, en Aurelia en las STP puede considerarse que las emisiones fueron resultado de los procesos de desnitrificación anaeróbica y nitrificación combinados.

Por otro lado, las bajas tasas de emisiones de N₂O en todas las fechas de muestreo en las áreas NT aún con similares temperaturas de suelo y EPA a las de la posición STP (18,2 y 18,1 °C en NT y STP; 46,8 y 48,5% de EPA en NT y STP, respectivamente) pueden atribuirse a la menor densidad de suelo, mayor macroporosidad y porosidad total hallada en NT que limitaron/evitaron la ocurrencia de desnitrificación anaeróbica.

En Videla, las emisiones de N₂O fueron bajas y no presentaron diferencias entre tratamientos y posiciones de muestreo. En este sitio, la concentración de nitratos fue mayor en NT en ambos tratamientos respecto de T2*STP, debido probablemente a condiciones favorables para el proceso de mineralización (elevada porosidad, elevada tasa de difusividad de oxígeno y elevadas temperaturas del suelo) (Lipiec & Stepniewski, 1995). Debido a la baja proporción de poros con agua (próximos a 11%) en todas las mediciones, puede considerarse que la desnitrificación aeróbica fue el proceso dominante en las transformaciones de nitrógeno responsable de las emisiones de N₂O (Bateman & Baggs, 2005). Al agrupar todos los datos de este sitio, es decir, teniendo en cuenta todas las fechas de muestreo, las emisiones de N₂O estuvieron asociadas al EPA y a la temperatura del suelo ($p < 0,01$; $R^2 = 0,31$). Resultados similares fueron obtenidos por Rochete et al. (2004) y Gregorutti et al. (2017). Estos resultados demuestran que mayores temperaturas y menores contenidos de humedad del suelo reducen la actividad de los microorganismos por lo que se producen bajas tasas de emisión de N₂O, independientemente del estado de compactación del suelo.

En general, se acepta que la adopción del TC permite reducir la superficie compactada al 10-15% (Chamen et al., 2015; Tullberg et al., 2018), mientras que al alinear el tránsito de la maquinaria en sólo una de las sendas de tránsito la superficie compactada se reduce al 20-40% en función de la maquinaria disponible. Similares resultados encontraron Gasso et al. (2013), Antille et al. (2015a) y Tullberg et al. (2018), quienes determinaron que realizar un manejo eficiente del tránsito dentro de los lotes agrícolas permite reducir las emisiones de N₂O del suelo. Los resultados de este estudio demuestran que alinear la maquinaria disponible al menos en una de las sendas de tránsito, como una primera aproximación a la adopción del TC, resulta una práctica útil para reducir las emisiones de N₂O al 50% en suelos Argiudoles de textura franco-

limosa, en condiciones de temperatura de suelo cercanas a 18°C y espacio poroso con agua próximo a 50%.

La adopción del sistema de TC produjo cambios en la calidad estructural del suelo en las STP y en las áreas NT. Estos cambios se reflejaron en modificaciones de la compactación (densidad del suelo), resistencia a la penetración, porosidad de aeración y retención de agua. Estas propiedades condicionan ambos parámetros evaluados: el IHO y las emisiones de N₂O. El IHO demostró que la calidad física del suelo en las STP y en NT, en los dos sitios de estudio, fue diferente. Las STP presentaron intervalos hídricos óptimos nulos o casi nulos para todo el rango de densidades medidas, principalmente por falta de aeración, por lo que es muy probable la formación de sitios anaeróbicos luego de eventos de precipitaciones, lo que concuerda con los valores más elevados de emisiones de N₂O. Por el contrario, en NT los intervalos hídricos óptimos mostraron mayor amplitud, por lo que en estas zonas es menos probable la formación de sitios anaeróbicos, lo que coincide con los menores valores de emisiones de N₂O. Los resultados que ambos indicadores reflejaron los cambios ocurridos en la calidad del suelo de forma análoga, lo que sugiere su interrelación. Estudios adicionales deberían ser realizados para verificar el grado de relación.

Conclusiones

El IHO fue un indicador eficiente para determinar la calidad física del suelo en las sendas de tránsito permanente y zonas de cultivo no transitadas. Los cambios producidos en la estructura del suelo por la compactación en las STP incrementaron marcadamente la resistencia a la penetración de las raíces y, también, redujeron la porosidad de aeración, por lo que los IHO en estas posiciones fueron nulos. Si bien la adopción del TC mejoró la calidad física del suelo en las zonas NT, por lo que los IHO tuvieron mayor amplitud, los resultados de este trabajo alertan acerca de la necesidad de aplicar en estas zonas prácticas de manejo que permitan incrementar la amplitud del IHO, de modo que la disponibilidad de agua para el desarrollo de los cultivos pueda ser aprovechada en todo el rango de agua útil con adecuado suministro de oxígeno y sin restricciones por elevada resistencia del suelo a la penetración de raíces. Por otra parte, la compactación del suelo también afectó la dinámica gaseosa del suelo. En condiciones

de espacio poroso con agua próximo a 50% y con temperaturas de suelo cercanas a 18°C se determinaron mayores tasas de emisión de N₂O en las STP respecto de las zonas NT. La adopción del TC en suelos Argiudoles de textura franco-limosa resultó una práctica de manejo eficiente para reducir la superficie compactada de los lotes agrícolas y, con ello, reducir las emisiones de N₂O del suelo al ambiente y mejorar la calidad física de los suelos en NT. Sin embargo, en condiciones de elevada temperatura del suelo y bajo contenido hídrico, las tasas de emisión de N₂O fueron bajas en ambas posiciones aunque los IHO fueron diferentes. Por ello es necesario continuar con las investigaciones para elucidar la magnitud de las emisiones de N₂O en diferentes condiciones de suelo y determinar el grado de relación entre ambos indicadores.

Capítulo IV

IMPACTO DEL PROCESO DE COMPACTACIÓN DEL SUELO SOBRE LOS CULTIVOS

Introducción

La región pampeana argentina es una de las zonas más productivas de sudamérica debido a la fertilidad física y química de los suelos y al clima favorable (Díaz-Zorita et al., 2002). El centro de la provincia de Santa Fe constituye su límite norte, y junto al sur de la provincia componen una de las regiones más importantes del país por su producción granaria ya que aportan el 16% de la producción nacional de trigo, soja, maíz y girasol (SIIA, 2019).

Sin embargo, los suelos en esta región presentan sus propiedades físicas, químicas y biológicas degradadas (Carrizo et al. 2011; Sasal et al., 2006). La degradación de los suelos es una temática de interés mundial ya que no sólo disminuye la capacidad productiva de los ecosistemas, sino que también afecta el clima global por alterar los balances de agua y energía, así como los ciclos de carbono, nitrógeno, azufre y otros elementos (Lal, 1990).

La compactación del suelo es la principal causa mundial de degradación física (Soane y Van Ouwerkerk, 1995; Hamza y Anderson, 2005; Horn et al., 2017) y afecta el crecimiento de las plantas de diversas formas (Letey, 1985; Lipiec y Hatano, 2003; Colombi y Keller, 2019). En primer lugar, incrementa la resistencia mecánica del suelo y produce la disminución de la tasa de elongación de raíces de los cultivos, lo que limita la profundidad de enraizamiento y la accesibilidad a los recursos disponibles (agua, aire y nutrientes) (Soane y Van Ouwerkerk, 1994; Colombi et al., 2018). Dicha accesibilidad depende principalmente del estado de agregación del suelo y aumenta con mayor proporción de estructura granular y de bloques subangulares, mientras que con estructuras laminares sólo entre el 10-20% de los sitios de intercambio son accesibles (Horn et al., 2018). Por otra parte, la compactación reduce la difusividad de los gases en

el suelo (Haas et al., 2016), lo que puede generar que en situaciones de suelo húmedo la concentración de oxígeno para las raíces sea escasa. Además, en suelos compactados se observa menor capacidad de infiltración de agua y por lo tanto una reducción del contenido de agua disponible para las plantas (Horn et al., 1995). Por lo tanto, el efecto de la compactación sobre los cultivos depende de las condiciones del suelo y del clima del lugar.

Diversos autores han determinado que la respuesta de los cultivos a la compactación en términos de rendimiento es variable, reportándose cambios de entre -9 a 21% dependiendo del grado de compactación (Chamen, 2006; Botta et al., 2007; Tullberg et al., 2007; Kingwell et al., 2011; Keller et al., 2017). Resulta difícil conocer el grado óptimo de compactación del suelo para la producción de cultivos, ya que ésta depende del cultivo, del suelo, de las condiciones climáticas que se presentan durante su desarrollo y de los mecanismos que actúan en la interacción suelo/planta (Soane y Van Ouwerkerk, 1994).

Generalmente, en experimentos a campo de larga duración se observa una gran reducción del rendimiento de los cultivos inmediatamente luego de un evento de compactación, aunque con el paso del tiempo puede ocurrir una cierta regeneración estructural por lo que sólo se observa una menor reducción de los rendimientos que se atribuye a la compactación subsuperficial generada durante el evento de compactación (Håkansson y Reeder, 1994; Radford et al., 2001). Botta et al. (2017) cuantificaron durante 3 estaciones de crecimiento los efectos del tránsito de cosechadoras con diferentes presiones en el área de contacto neumático/suelo y cargas por eje sobre el rendimiento de maíz y reportaron que, al incrementar estos factores de compactación, el rendimiento del cultivo disminuye.

Por otra parte, el efecto de la compactación sobre el crecimiento de las raíces de los cultivos es muy importante (Imhoff et al., 2010; Ramos et al., 2010; Lipiec et al., 2012). Lipiec et al. (2013) reportaron menor tasa de elongación (50 y 79% en cebada y triticale) y cambios en la anatomía y morfología de las raíces de diferentes cereales (trigo, triticale, centeno, cebada y maíz) al comparar su desarrollo entre suelo con/sin compactación. Por su parte, Nunes et al. (2015) observaron una mayor concentración de

raíces de maíz en el estrato superficial del suelo (0-70 mm) debido al deterioro físico del estrato subsuperficial en un Oxisol en siembra directa.

Diversas alternativas han sido propuestas para prevenir la compactación del suelo por el tránsito de la maquinaria (*i.e.* reducir la carga por eje y por neumático, reducir la presión de inflado de los neumáticos, incrementar la superficie de contacto suelo/neumático, realizar un manejo eficiente del tránsito de la maquinaria dentro de los lotes) (Arvidsson et al., 2002; Chamen et al., 2003, Hamza & Anderson, 2005). El principio de la prevención radica en evitar la deformación plástica irreversible del suelo que afecta de forma permanente el desarrollo de los cultivos (Alakukku et al., 2003).

El tránsito controlado de la maquinaria (TC) fue propuesto como una alternativa de manejo eficiente del tránsito dentro de los lotes agrícolas (Chamen et al., 2015). Numerosos autores han reportado rendimientos promedios mayores cuando se aplica TC (Tullberg et al., 2001; Hamza y Anderson, 2005; Gasso et al., 2013), dado que aunque existen sendas permanentes de tránsito compactadas (que pueden sembrarse o no) que ocupan aproximadamente el 15-20% de la superficie mientras, el resto del área (80-85%) permanece libre de tránsito, lo que favorece la recuperación de la estructura del suelo, disminuye la resistencia mecánica, beneficia la exploración radical y, como consecuencia, en dicha zona se incrementan los rendimientos de los cultivos.

En nuestro país la mayoría de los autores se han centrado en evaluar el efecto de distintas intensidades de tránsito, cargas por eje y presión de contacto neumático/suelo sobre diversas propiedades físicas de suelo (*i.e.* resistencia mecánica a la penetración de raíces, densidad, contenido de agua disponible), el rendimiento de cultivos y el peso seco de raíces en suelos de la Pampa Ondulada (Botta et al., 2004, 2006, 2013; Tolón-Becerra et al., 2011), pero el impacto de la distribución de la compactación generada por el uso del TC sobre el suelo y cultivos no ha sido evaluados en suelos planos Argiudoles de textura franco-limosa. Esta temática resulta importante para los sistemas agrícolas de la región pampeana ya que permitirá generar información del efecto de la adopción del TC sobre la productividad de la superficie agrícola.

El objetivo del presente capítulo fue evaluar el efecto de la distribución de la compactación del suelo, en las sendas de tránsito permanente y en áreas adyacentes (sin tránsito de maquinaria), generada al aplicar diversas intensidades de tránsito de la maquinaria agrícola sobre el comportamiento morfológico y productivo de diferentes cultivos. Se evaluó la siguiente hipótesis de trabajo:

La compactación del suelo se reduce desde el centro de la senda de tránsito hacia los laterales condicionando el rendimiento y el desarrollo del sistema radicular de los cultivos.

Materiales y Métodos

Los suelos utilizados en este estudio fueron dos Argiudoles típicos (Soil Survey Staff, 2014). Se encuentran localizados en el centro de la provincia de Santa Fe, uno en el departamento Castellanos, en la localidad de Aurelia ($31^{\circ}29'06.67''$ S y $61^{\circ}07'25.29''$ O) y en el departamento San Justo, en la localidad de Videla ($30^{\circ}54'41.46''$ S y $60^{\circ}37'35.26''$ O). La descripción de los suelos, clima, diseño y tratamientos experimentales se presentan en el Capítulo II de esta Tesis.

Características de los cultivos

En la Tabla 2.5. se presenta la fecha de siembra y cosecha mecánica de los cultivos en cada sitio experimental. La Tabla 4.1. muestra las características de los cultivares, la densidad de siembra, la fertilización y la fecha de muestreo de plantas para la determinación del rendimiento de cada cultivo.

Tabla 4.1. Características de los cultivos en cada sitio experimental.

Fecha de muestreo de plantas	13/05/2016	13/04/2017	06/04/2018	19/11/2018	29/04/2016	20/01/2017	19/12/2017	30/07/2018
	Aurelia				Videla			
	Maíz 2016	Soja 2016/2017	Soja 2017/2018	Trigo 2018	Soja 2015/2016	Maíz 2016/2017	Girasol 2017	Maíz 2018
Cultivar	Dk 7210	RA 550	Nidera A5009	ACA 360	RA 644	P 1780	Veloxx	P 2089
Fecha de siembra	07/01/2016	08/11/2016	08/11/2017	06/06/2018	03/12/2015	30/08/2016	17/08/2017	04/01/2018
Densidad de siembra	65000 semillas ha ⁻¹	70 kg ha ⁻¹	85 kg ha ⁻¹	110 kg ha ⁻¹	83 kg ha ⁻¹	77000 semillas ha ⁻¹	60000 semillas ha ⁻¹	60000 semillas ha ⁻¹
Distancia entre surcos (mm)	700	350	350	175	420	420	420	420
Fertilización (Fertilizante/ kg ha ⁻¹)	Urea / 100	Superfosfato triple de calcio/ 50	Superfosfato triple de calcio/ 50	Fosfato diamónico/ 50 + Urea/100	Fosfato monoamónico/ 90 + Boro 10% / 1 L/ha	Mezcla física 55-45% Urea-Fosfato diamónico/ 320	Mezcla física 45-55% Urea-Fosfato diamónico/ 250	Mezcla física 55-45% Urea-Fosfato diamónico/ 320

Determinaciones

Rendimiento de los cultivos

Los cultivos fueron cosechados de forma manual cuando alcanzaron el estado de madurez fisiológica. Se registró el número de plantas m^{-2} y se cosechó el equivalente a 2 m^2 de cada uno de ellos en surcos ubicados en diferentes posiciones relativas a las STP (Fig. 2.2). En esta figura, la línea gris punteada fina representa la posición I, localizada en el centro de la senda de tránsito permanente (STP). La línea gris llena representa la posición de muestreo II, que corresponde al surco del cultivo más próximo al borde de la STP (hacia la entre-senda) y por último la posición de muestreo III, que se encuentra representada por la línea de color gris punteada gruesa en la Fig.2.2 corresponde al surco de cultivo ubicado aproximadamente a 1,4 m de la posición I (entre-senda), en la zona libre de tránsito de la maquinaria (NT).

Las muestras obtenidas (n=27, por cultivo; n=216 en total), luego de su recolección, fueron colocadas en estufa de aire forzado a 55°C. Posteriormente se determinó el peso seco de los granos de los 2 m^2 cosechados y el peso de 1000 granos. Simultáneamente se determinó su contenido de humedad con humidímetro. Posteriormente los rendimientos se ajustaron en función del contenido de humedad comercial de cada cultivo.

Biomasa radicular

La biomasa de raíces fue determinada en el cultivo de girasol en el sitio Videla cuando las plantas alcanzaron el estado de madurez fisiológica. Para ello se recolectaron muestras de suelo con estructura no perturbada en cilindros de 70 mm de diámetro x 100 mm de altura en cuatro posiciones de muestreo (Fig.2.2). La posición 1 y la posición 3 se ubicaron a 20 mm de una planta de girasol escogida al azar sobre el mismo surco de cultivo. Las posiciones 2 y 4 se localizaron a 100 mm de distancia de las posiciones anteriores en el entre surco (Fig.2.2). Se utilizaron dos estrategias de muestreo para comprender el efecto de la compactación sobre la biomasa de raíces de

girasol: i) se extrajeron muestras de suelo en el estrato superficial (0-100 mm) en todos los tratamientos por triplicado para estudiar la distribución horizontal de las raíces (n=108) y ii) se colectaron muestras de suelo en el estrato subsuperficial (100-200 mm) en los tratamientos T0 y T2 por duplicado para estudiar la distribución vertical de las raíces (n=48). Luego de la recolección las muestras fueron envueltas en papel aluminio y colocadas en freezer (-4°C) hasta su procesamiento.

Posteriormente, en laboratorio cada muestra de suelo fue retirada del cilindro y colocada cuidadosamente sobre una bandeja de color blanco. Las raíces de los cultivos se separaron de las de malezas y fueron recolectadas a mano con la ayuda de pinzas histológicas, posteriormente fueron lavadas, se secaron con papel tissue y se colocaron en sobres de papel madera en estufa a 60 °C y se pesaron en balanza digital de precisión para determinar la masa seca de raíces (MSR) (Berhongaray et al., 2013b).

Para determinar la biomasa radicular del cultivo de girasol y evitar la influencia de las diferentes densidades de suelo en cada posición de muestreo, los datos de masa seca de raíces se transformaron en función de la masa de suelo equivalente (Berhongaray et al., 2013a). La biomasa radicular de las muestras que se recolectaron en la STP y en la zona NT, se promediaron (STP: 1 y 2; NT: 3 y 4) y las estimaciones de biomasa de raíces en una masa equivalente de suelo se expresó como MSR m⁻² en una masa de suelo equivalente de 1000 Mg ha⁻¹.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2013). Para minimizar errores se utilizó el análisis correspondiente a un diseño en parcelas divididas en bloques completamente aleatorizados. Los datos de cada sitio experimental se analizaron por separado. Cuando se encontraron efectos significativos, las medias de los tratamientos, posiciones de muestreo y su interacción fueron separadas mediante el Test LSD Fisher ($\alpha= 0,05$).

Resultados y discusión

Rendimiento de cultivos

Para facilitar la interpretación, los resultados de cada sitio experimental se presentan por separado respetando la cronología de los cultivos que se sembraron en cada uno de ellos. Al final de los resultados de rendimiento del sitio Videla se presentan los correspondientes a la biomasa radicular del cultivo de girasol 2017.

Aurelia

Desde la siembra hasta la madurez fisiológica del cultivo de maíz 2016 (enero/junio 2016) se registraron precipitaciones superiores a las normales (810 mm). Se detectaron diferencias significativas en el rendimiento en la interacción tratamiento*posición de muestreo ($p=0,03$). En la figura 4.1.a. se presenta la relación entre el rendimiento del cultivo, los tratamientos y las posiciones de muestreo. No se encontraron diferencias entre las distintas posiciones en el T0 ni entre las posiciones II y III en los tratamientos T1 y T2. Dichas posiciones de muestreo se localizaron en el surco de cultivo ubicado en el borde de la STP (II) y en la zona (III) de cultivo permanente no transitada (NT) (Fig 2.2). Los mayores rendimientos de maíz se encontraron en estas posiciones en todos los tratamientos, mientras que los menores se observaron en la posición I, ubicada en el centro de la STP en los tratamientos T1 y T2 (Fig. 4.1.a)). Estos resultados coinciden con los valores de compactación relativa (CR, %) obtenidos luego de la compactación (Fig. 2.3). En la zona (III) dichos valores fueron próximos a 83%, mientras que en la posición (I) fueron cercanos a 90% (Capítulo II). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Botta et al. (2017), quienes evaluaron durante tres estaciones de crecimiento el rendimiento del cultivo de maíz y encontraron diferencias significativas entre tratamientos. Estos autores concluyeron que el rendimiento del cultivo de maíz disminuyó con el incremento de la compactación.

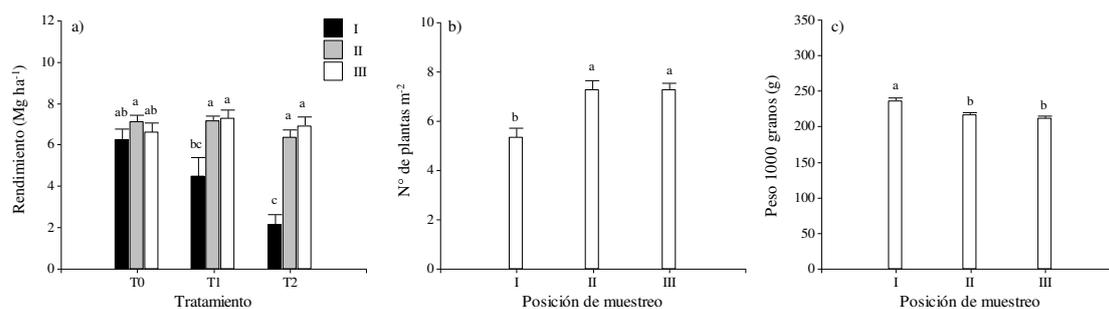


Fig.4.1. Rendimiento (Mg ha^{-1}), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de maíz 2016 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$).

Además, se encontraron diferencias significativas entre posiciones de muestreo en el número de plantas establecidas m^{-2} ($p=0,01$) y en el peso de 1000 granos ($p=0,01$) (Fig. 4.1. b y c). Independientemente de los tratamientos, la menor cantidad de plantas establecidas por m^{-2} se observó en la posición (I), mientras que las demás posiciones presentaron mayor cantidad de plantas m^{-2} aunque no se diferenciaron entre sí (Fig. 4.b). Por otra parte, el peso de 1000 granos presentó un comportamiento inverso. Se observó mayor peso de 1000 granos en la posición (I), que se diferenció de las demás posiciones (Fig. 4.1.c). Estos resultados demuestran que la compactación del suelo en las STP (independientemente de los distintos tratamientos) afectó el establecimiento de las plantas de maíz y que el número de plantas influyó en el peso de 1000 granos. Estos resultados concuerdan con Sangoi et al., 2001; Cayzac & Dillchneider-Loza, 2016).

En el cultivo de soja 2016/2017 se encontró interacción significativa entre las variables tratamiento y posición de muestreo en el rendimiento del cultivo y en la cantidad de plantas logradas m^{-2} ($p=0,01$ y $p=0,04$). No obstante, no se detectaron diferencias entre dichas variables y su interacción en el peso de 1000 semillas.

En el tratamiento T0 no se encontraron diferencias en el rendimiento entre las distintas posiciones (Fig. 4.2.a). El mayor valor fue obtenido en la posición (II) en el tratamiento T1 que no fue diferente de la posición III. Sin embargo, en este tratamiento el rendimiento en la posición (I) fue menor que en (II). Por otra parte, el menor rendimiento del cultivo se presentó en la posición (I) en el T2, pero no se observaron

diferencias entre las demás posiciones de muestreo. El rendimiento en T2 fue significativamente diferente del resto de los tratamientos y posiciones. Håkansson (2005) reportó que valores de CR de $85\pm 3\%$ son óptimos para el desarrollo de los cultivos. El rendimiento obtenido en la posición (I) en T2, evidencia que valores elevados de CR (93%, Fig 2.4. Capítulo II) son extremadamente limitantes para el crecimiento del cultivo de soja, lo que provocó una disminución del rendimiento de $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ respecto de las demás posiciones del mismo tratamiento. Esta disminución de rendimiento puede atribuirse al efecto de la compactación sobre la estructura en los primeros 200 mm de suelo, dado que allí se encuentra la mayor proporción de raíces y, por lo tanto, es el sitio donde se concentra la absorción de nutrientes y agua (Botta et al., 2007).

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Botta et al. (2004), quienes evaluaron diferentes intensidades de tránsito de un tractor sobre el rendimiento de soja y concluyeron que el rendimiento del cultivo disminuye al incrementar la intensidad de tránsito aún cuando no se detectaron diferencias significativas en la densidad del suelo entre las menores intensidades de tránsito.

En los tratamientos T0 y T1 no se observaron diferencias entre posiciones en el número de plantas establecidas m^{-2} , mientras que en T2, la posición (I) presentó la menor cantidad de plantas logradas (Fig. 4.2.b) debido a que la compactación generada en la STP en T2 produjo el desplazamiento del suelo hacia los bordes de las STP, lo que dificultó el establecimiento de las plantas.

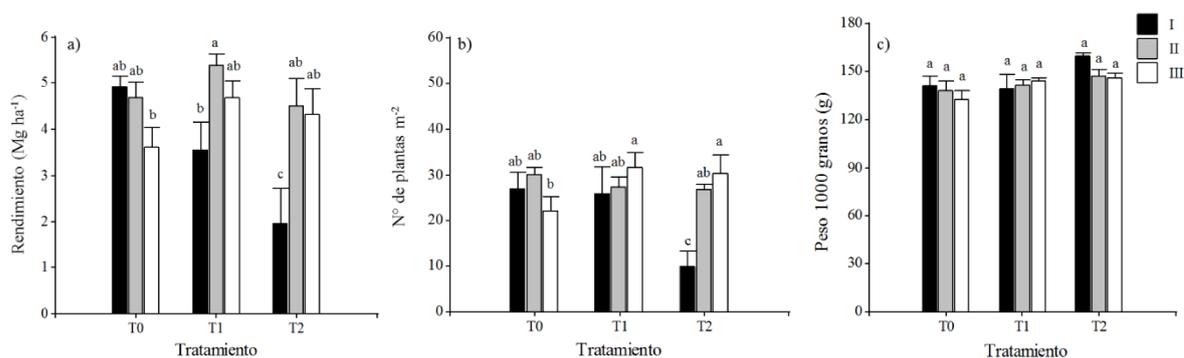


Fig.4.2. Rendimiento (Mg ha^{-1}), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de soja 2016/2017 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

En el cultivo de soja 2017/2018 sólo se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en el número de plantas establecidas m^{-2} ($p=0,01$). En la Fig.2.3.b se observa que los tratamientos T0 y T1 presentaron la mayor cantidad de plantas m^{-2} (próximas a 49 ± 5 plantas m^{-2}), mientras que T2 presentó la menor cantidad (41 ± 6 plantas m^{-2}). Este resultado es similar al cultivo de soja 2016/2017. Si bien se observaron diferencias en la CR entre posiciones de muestreo en el estrato subsuperficial (Fig. 2.5. Capítulo II), el rendimiento del cultivo y el peso de 1000 granos no presentaron diferencias entre las variables tratamiento, posición de muestreo y su interacción ($p>0,05$) (Fig.2.3.a y c). Estos resultados se atribuyen a que, durante el crecimiento del cultivo (noviembre 2017/abril 2018), las precipitaciones excedieron en 490 mm a las históricas, por lo que al mantenerse el suelo húmedo la resistencia a la penetración de las raíces fue baja (Mapfumo & Chanasyk, 1998; Kumar et al., 2012; Sivarajan et al., 2018) y favoreció su desarrollo y la absorción de nutrientes y agua.

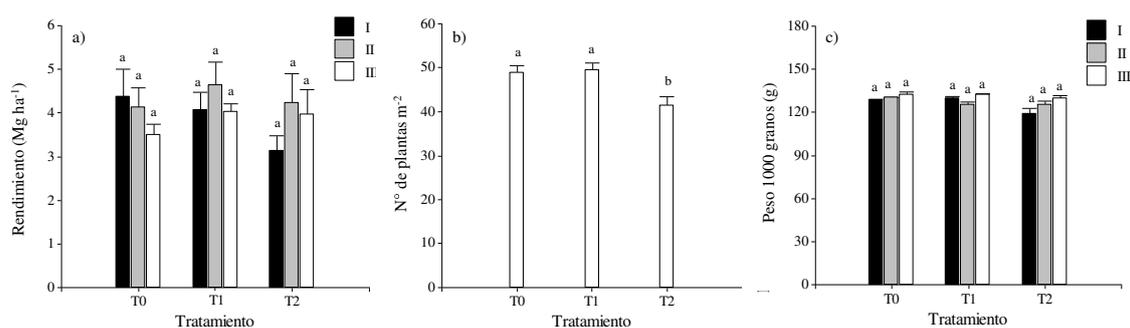


Fig.4.3. Rendimiento ($Mg\ ha^{-1}$), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de soja 2017/2018 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

En la Fig.4.4. se presentan los resultados obtenidos del rendimiento, número de espigas m^{-2} y peso de 1000 granos en el cultivo de trigo 2018. Sólo se observó efecto significativo de las posiciones de muestreo en el rendimiento ($p=0,01$). Los mayores rendimientos se presentaron en la posición (III) ($3,71\pm 0,61\ Mg\ ha^{-1}$). En esta posición se obtuvo un valor de CR de 83% en los primeros 100 mm de suelo y de 85% en el estrato subsuperficial (Fig.2.6. y Tabla 2.7; Capítulo II), por lo que el cultivo se desarrolló sin limitaciones. El menor rendimiento se obtuvo en la posición (II) ($2,34\pm 0,71\ Mg\ ha^{-1}$; CR=92%), mientras que la posición (I) no se diferenció de ninguna de las dos

posiciones de muestreo restantes (Fig 2.4.a.). La falta de diferencias significativas entre tratamientos en el rendimiento, concuerdan con los resultados de Radford et al. (2000), quienes evaluaron el efecto de diversas propiedades físicas de suelo y el rendimiento de trigo en suelo compactado (por tránsito de una cosechadora) y no compactado. Si bien estos autores encontraron diferencias en la densidad del suelo, la resistencia del suelo al cizallamiento, la resistencia a la penetración, la conductividad hidráulica y en el número de poros, no encontraron diferencias en el rendimiento de trigo. El número de espigas m^{-2} presentó un coeficiente de variación elevado ($CV=28\%$), lo que explica la falta de diferencias significativas entre las variables tratamiento, posición de muestreo y/o su interacción.

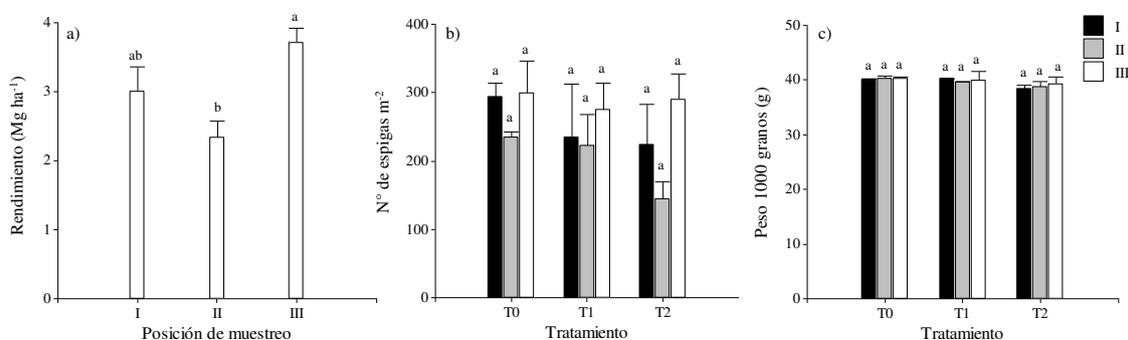


Fig.4.4. Rendimiento ($Mg\ ha^{-1}$), número de espigas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de trigo 2018 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

Videla

En el cultivo de soja 2015/2016 no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento y en el peso de 1000 granos entre tratamientos, posiciones de muestreo y su interacción ($p>0,05$; Fig. 4.5. a y b). Estos resultados concuerdan con los de Håkansson (2005) y se atribuyen a que la CR fue próxima a 85% en todos los tratamientos y posiciones de muestreo durante el desarrollo del cultivo (Fig. 2.8.I; Capítulo II) y a que durante el ciclo del cultivo (noviembre 2015/abril 2016) se registraron 1245 mm de precipitaciones, similares a las precipitaciones anuales históricas 1960-2015). El número de plantas establecidas m^{-2} varió entre tratamientos ($p=0,01$) y posiciones ($p=0,04$), pero no en su interacción. Al igual que para los cultivos de soja de Aurelia, el

establecimiento de las plantas estuvo afectado por la compactación en las STP. La profundidad de trabajo de todos los cuerpos de las sembradoras fue la misma, mientras que la profundidad de las sendas fue diferente entre los tratamientos (T2>T1>T0). Esto afectó la profundidad a la que se localizaron las semillas, que en algunos casos quedaron en la superficie o muy próximo a ella, afectando la emergencia de las plántulas. El tratamiento T0 presentó en promedio (entre las diferentes posiciones de muestreo) la mayor cantidad de plantas establecidas m^{-2} (40 ± 3 plantas m^{-2}), mientras que en los tratamientos T1 y T2 se observó una diferencia de 5 y 8 plantas m^{-2} en relación al T0, respectivamente (Fig 4.5 c.).

Por otra parte, al comparar la cantidad promedio de plantas establecidas por m^{-2} entre las diferentes posiciones de muestreo (independientemente de los tratamientos) se observó que el surco del cultivo ubicado en el borde de la STP presentó la menor cantidad de plantas establecidas (32 ± 7 plantas m^{-2}), mientras que en las posiciones (I) y (III) se observaron aproximadamente 38 ± 4 plantas m^{-2} (Fig 4.5 d.). La falta de diferencia en el peso de 1000 granos coincide con lo encontrado por Andrade (1995), quien determinó que este cultivo presenta una capacidad media para compensar un bajo número de granos (menor cantidad de plantas m^{-2}) con granos más pesados.

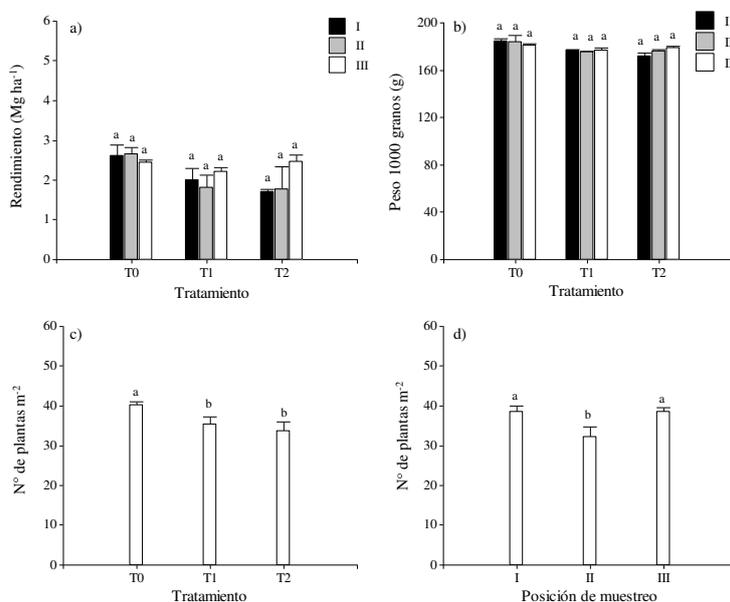


Fig.4.5. Rendimiento ($Mg\ ha^{-1}$), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de soja 2015/2016 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento.

Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$).

En el cultivo de maíz 2016/2017 no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Los valores de CR fueron próximos a 85% (Fig. 2.8.I.; Capítulo II). Esto sumado a las condiciones de humedad del suelo durante el desarrollo del cultivo de maíz, disminuyó la resistencia mecánica del suelo (Da Silva et al., 2004; Kumar et al., 2012), por lo que las raíces pudieron explorar y aprovechar los recursos sin restricciones. Por otro lado, se observó un efecto significativo de las posiciones de muestreo sobre el número de plantas establecidas m^{-2} ($p < 0,01$) (Fig. 4.6.b.). La posición (I), independientemente de los diferentes tratamientos presentó la mayor cantidad de plantas, mientras que en las posiciones (II) y (III) la cantidad fue similar (próxima a 8 plantas m^{-2}). En las variables rendimiento y peso de 1000 granos no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, posiciones de muestreo y su interacción ($p > 0,05$). El coeficiente de variación (CV) de dichas variables fue de 18 % y 14%, respectivamente.

Durante el ciclo del cultivo (agosto 2016/enero 2017) se registraron 861 mm de precipitación. Estas precipitaciones excedieron en 200 mm a las históricas para el mismo período de tiempo. Los resultados de este estudio coinciden con los de Ferreyra et al. (2001), quienes evaluaron el comportamiento del cultivo de maíz con diferentes condiciones climáticas (*i.e.* años neutro, niña y niño) y encontraron que la respuesta varió con el clima. En Pilar (provincia de Córdoba) encontraron un aumento significativo del rendimiento en años niño mientras que en Pergamino (provincia de Buenos Aires) los mayores rendimientos se obtuvieron en años húmedos (niño) y neutros.

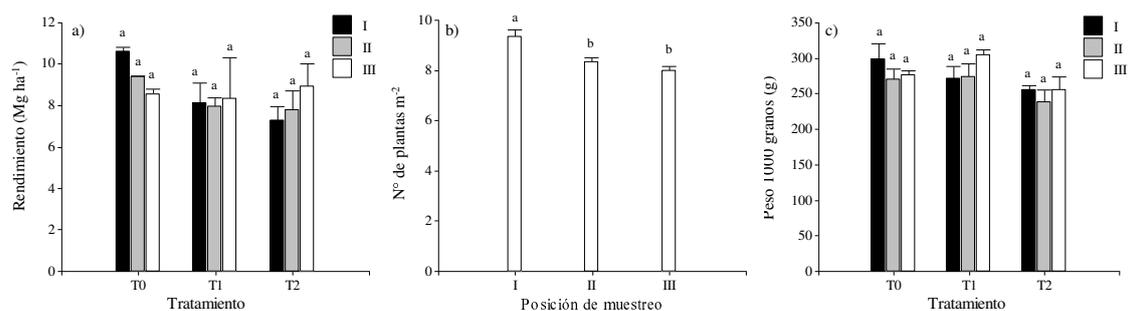


Fig.4.6. Rendimiento (Mg ha^{-1}), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de maíz 2016/2017 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

En el rendimiento del cultivo de girasol 2017, la interacción entre tratamiento y posición de muestreo fue significativa ($p=0,01$). En general, el rendimiento disminuyó con el incremento de la compactación. El mayor valor de CR durante el desarrollo del cultivo fue cercano a 95% y se obtuvo en T2 en el estrato subsuperficial. Por su parte, en la posición (III) se observó el menor valor de CR en la misma profundidad de muestreo (Fig. 2.8. II; Capítulo II). Coincidentemente, los mayores rendimientos fueron encontrados en la posición (III), que no difirió de la (II), independientemente de los distintos tratamientos (entre 3,3 y 3,8 Mg ha^{-1}) (Fig.4.7.a.). Por el contrario, en la posición (I) se obtuvo el menor rendimiento ($0,9\pm0,07 \text{ Mg ha}^{-1}$). Estas diferencias están asociadas con las diferencias en los valores de CR entre posiciones y tratamientos (Fig. 2.8. II; Capítulo II). Los resultados coinciden con los de Botta et al. (2006b), Mirleau-Thebaud et al. (2017) y Botta et al. (2018).

Con respecto al número de plantas establecidas m^{-2} , no se verificaron diferencias entre tratamientos, posiciones de muestreo y su interacción ($p>0,05$; $\text{CV}=28\%$), aunque se observó diferencias entre tratamientos y posiciones de muestreo en el peso de 1000 granos. En la Figura 4.7.c. se observa que en las posiciones (II) y (III) se encontraron los mayores pesos, y en la Figura 4.7.d. se observa que el mayor peso de 1000 granos se produjo en T2, mientras que en T0 se obtuvo el menor peso de 1000 granos. T1 no se diferenció de los otros tratamientos.

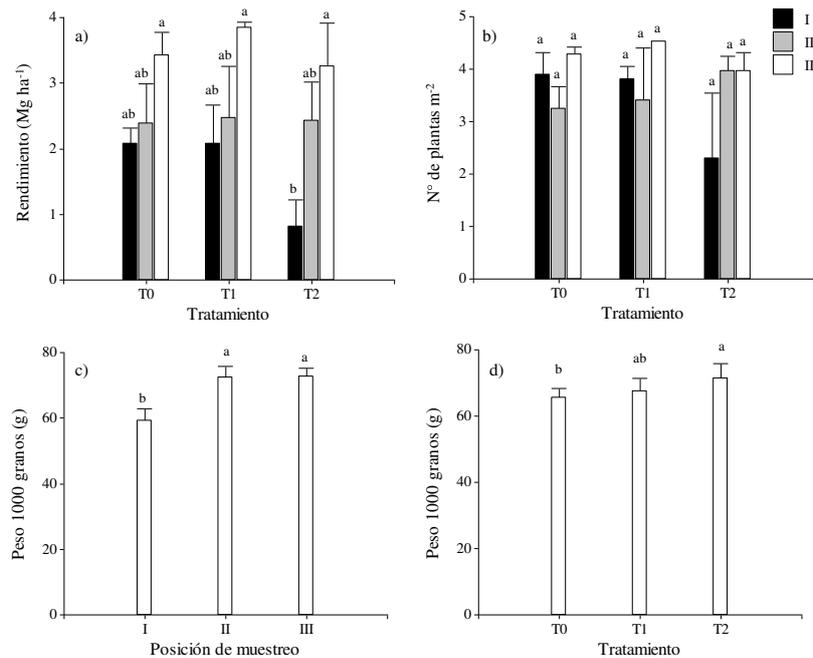


Fig.4.7. Rendimiento (Mg ha^{-1}), número de plantas m^{-2} y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de girasol 2017 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

Por último, en la figura 4.8. se presentan los resultados de rendimiento, número de plantas m^{-2} y peso de 1000 granos del cultivo de maíz 2018. Los rendimientos obtenidos fueron bajos ($<5 \text{ Mg ha}^{-1}$) y no presentaron diferencias estadísticas entre las variables tratamiento, posición de muestreo y su interacción ($p>0,05$) (Fig.4.8.a). Tampoco se observaron efectos significativos en el número de plantas establecidas m^{-2} ni en el peso de 1000 granos ($p>0,05$) (Figs. 4.8.b y c). Los coeficientes de variación de estas variables fueron menores a 17%. Estos resultados se deben al estrés hídrico ocurrido durante la mayor parte del período vegetativo del cultivo, ya el contenido hídrico gravimétrico a la siembra del cultivo fue de $0,12 \pm 0,04 \text{ g g}^{-1}$ y sólo se registraron precipitaciones totales de 91 mm durante los primeros tres meses de desarrollo del cultivo. Estas precipitaciones fueron menores a las históricas en 364 mm. En esta situación, el suelo presenta elevada resistencia mecánica (Imhoff et al., 2016), lo que restringe la exploración radicular y por lo tanto la accesibilidad a los recursos disponibles (Colombi et al., 2018).

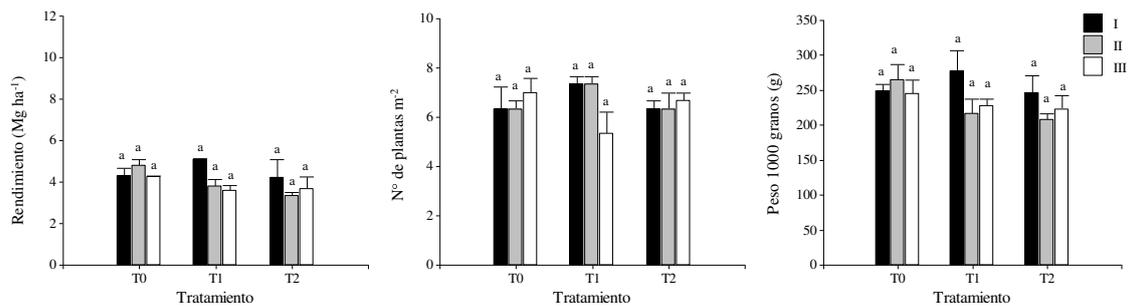


Fig.4.8. Rendimiento (Mg ha⁻¹), número de plantas m⁻² y peso de 1000 semillas (g) del cultivo de maíz 2018 en función de los tratamientos y posiciones de muestreo. I y II: centro y borde de la senda de tránsito permanente, III: zona de cultivo no transitada. T0: control; T1 y T2: sendas de tránsito permanente compactadas hasta 2 MPa y 4 MPa al inicio del experimento. Las barras representan valores medios y las líneas verticales el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

Biomasa radicular

En el cultivo de girasol 2017 no se detectaron diferencias en la biomasa radicular entre los distintos tratamientos ni en la interacción tratamiento*posición de muestreo en la profundidad 0-100 mm ($p>0,05$), sólo se detectaron diferencias significativas entre posiciones de muestreo ($p<0,01$). En la figura 4.9. se presenta la biomasa radicular de girasol en relación a las posiciones de muestreo (STP: posiciones de muestreo 1 y 2; NT: posiciones de muestreo 3 y 4). En promedio, la biomasa de raíces fue 56% menor en la STP que en la NT.

Las raíces crecen fácilmente a través de los poros de mayor tamaño del suelo. Sin embargo, éstas tienen que agrandar o crear nuevos poros cuando éstos son muy pequeños. En este caso, las raíces deben mover las partículas del suelo y para ello necesitan superar la fuerza que opone la matriz del suelo. De lo contrario, su crecimiento se reduce o detiene (Vepraskas, 1994).

La compactación genera alta resistencia del suelo y baja porosidad debido a que los macroporos del suelo se destruyen y, en consecuencia, parte de ellos se transforman en meso/microporos. Esto implica que el espacio poroso se vuelva más homogéneo, con predominio de poros pequeños, por lo que las raíces necesitan gastar energía para agrandar los poros del suelo para poder desarrollarse. Esta condición física inadecuada

explica el menor valor promedio de la biomasa radicular y la menor variabilidad encontrada en el STP (Fig. 4.9.).

Los resultados de diversos estudios demuestran que cuando se presenta alta resistencia de suelo las plantas desarrollan pequeña biomasa de raíces (Botta et al., 2013; Botta et al., 2018). En el presente estudio, el rendimiento de girasol también disminuyó con el aumento de CR en la STP (Fig.4.7).

Por otro lado, en la NT la mayor variabilidad se atribuye al efecto de la labranza realizada al comienzo del experimento y a que luego dicha área permaneció sin tránsito. Esta situación favoreció la formación de nuevos poros, fisuras y grietas con la sucesión de cultivos en el tiempo, permitiendo que las raíces del girasol puedan desarrollarse mejor, explicando el elevado valor promedio de biomasa radicular obtenido en NT.

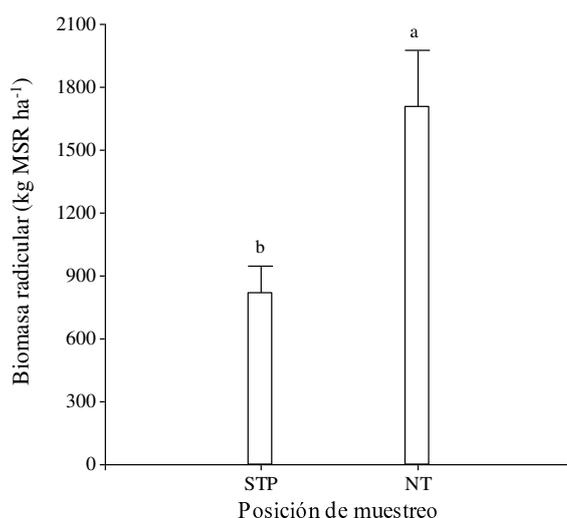


Fig.4.9. Biomasa radicular (equivalente masa de raíces en una masa de suelo de 1000 Mg ha⁻¹) por posiciones de muestreo. STP: senda de tránsito permanente. NT: zona de cultivo sin tránsito. Las barras representan el promedio por posición y las líneas verticales el intervalo de confianza del 95%. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (LSD Fisher; $\alpha=0,05$).

En la figura 4.10. se presenta un esquema de la distribución de la biomasa radicular. El patrón de crecimiento de las raíces fue diferente entre posiciones de muestreo. La biomasa disminuyó con el incremento de la distancia al surco del cultivo (posición 2 respecto de 1, y 4 respecto de 3). Sin embargo, la mayor disminución se observó en las posiciones de muestreo ubicadas en la NT (posiciones 3 y 4).

La mayor proporción de biomasa se observó en la posición 3(NT), en el estrato superficial del suelo (0-100 mm). En esta posición se obtuvo 1595 kg MSR ha⁻¹ mientras que en la misma posición en la STP (posición 1) sólo se obtuvo 611 kg MSR ha⁻¹.

En la STP (posiciones 1 y 2) no sólo se observó una menor proporción de raíces (0-200 mm), sino que las mismas se encontraron concentradas principalmente en el estrato superficial (86%, 0-100 mm), mientras que en la NT el 21% de las raíces exploraron el estrato subsuperficial (100-200 mm). Estos resultados indican que cuando los valores CR superan 90% (en las STP), las plantas reducen el crecimiento de la raíz primaria en dirección vertical y aumentan el desarrollo horizontal de las otras raíces (Fig.4.10.).

Goodman y Ennos (1999) también indicaron que a medida que aumenta la resistencia del suelo, aumenta el ángulo de desviación y el grosor de las raíces del girasol. Además, mencionaron que las raíces se concentran en la capa superior y disminuyen la profundidad de enraizamiento. Tal comportamiento es resultado de la compensación del sistema radicular del cultivo para maximizar las posibilidades de acceso al agua y nutrientes en el volumen de suelo disponible (Unger & Kaspar, 1994; Lipiec et al., 2003, Mirleau-Thebaud et al., 2017). Por otra parte, los resultados obtenidos coinciden con otros experimentos realizados en suelos limosos, donde el 86% de las raíces de cebada se encontraron en el estrato superficial del suelo (0-100 mm) en la capa compactada y el 68% en la capa superior sin compactación (Lipiec et al., 2003).

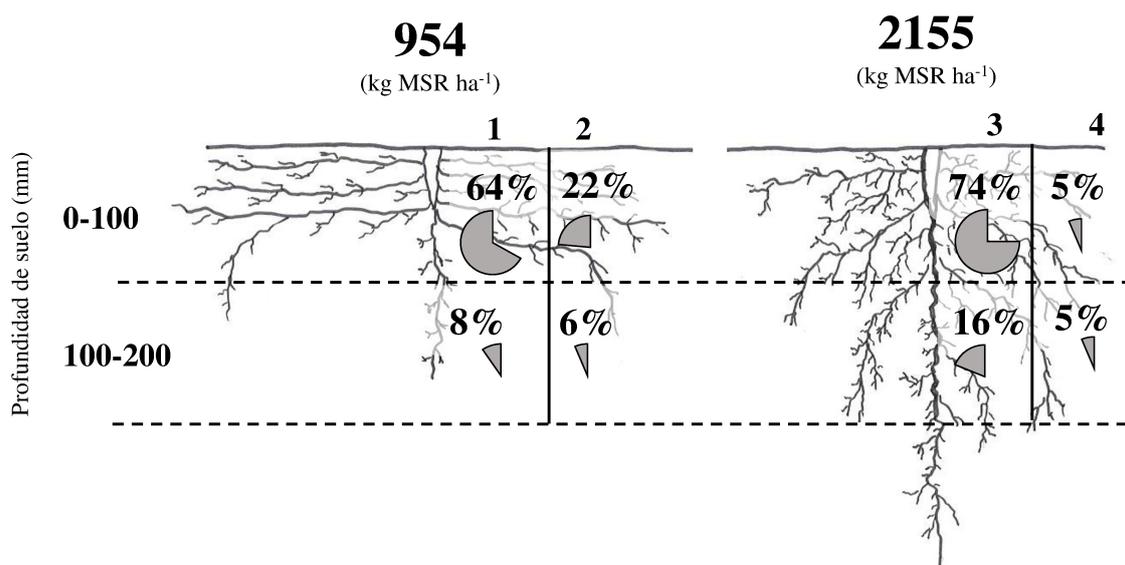


Fig.4.10. Esquema de la distribución de la biomasa de raíces en la profundidad de suelo 0-100 mm y de 100-200 mm. MSR: masa seca de raíces. 1 y 2 posiciones de muestreo en la senda de tránsito permanente; 3 y 4: posiciones de muestreo en la zona de cultivo no transitada.

En general se observó que la respuesta de los cultivos a las distintas intensidades de tránsito en las diferentes posiciones de muestreo dependió del tipo de cultivo, del clima durante su desarrollo (principalmente precipitaciones) y del grado de CR. Generalmente, los rendimientos disminuyeron con el incremento de la compactación del suelo y en función de la distribución tridimensional de la misma (i.e. en forma vertical y hacia los laterales de las sendas de tránsito permanente), la que depende del estrés aplicado al suelo por la maquinaria agrícola y de las características propias de los suelos franco-limosos de la región pampeana Argentina.

El rendimiento del surco de cultivo ubicado en los bordes de las sendas de tránsito permanente presentó un comportamiento variable, aunque generalmente fue similar al de los surcos ubicados en la zona de cultivo no transitada en condiciones de clima normal. Sin embargo, la presencia de condiciones climáticas extremas (excesos hídricos o sequía) afectaron los rendimientos de los cultivos en todas las posiciones y tratamientos debido a que la respuesta de los cultivos a la compactación del suelo depende de su contenido de humedad, que ésta afecta la facilidad de deformación de la matriz del suelo y, como consecuencia, la habilidad para crecer y acceder a los recursos (nutrientes, aire, agua).

Los resultados indican que la transmisión horizontal de la compactación del suelo desde el centro de la senda de tránsito permanente hasta el borde puede afectar negativamente la calidad de la estructura del suelo y, como consecuencia, puede reducir el rendimiento de los cultivos en suelos similares a los estudiados. En estos casos, una alternativa de prevención consiste en mantener la CR en el borde de la senda de tránsito permanente por debajo del umbral crítico ($85\pm 3\%$) que causa la reducción del rendimiento.

La compactación generada por el tránsito de la maquinaria en las sendas de tránsito permanente reduce la cantidad de raíces y afecta la distribución de la biomasa radicular del cultivo de girasol. En dichas sendas de tránsito las raíces se concentran en el estrato superficial del suelo mientras que en las zonas libres de tránsito las raíces exploran mayor volumen de suelo en profundidad por lo que la accesibilidad a los diferentes recursos (agua, aire y nutrientes) es mayor, y como consecuencia, el rendimiento del cultivo en esta zona es mayor al de las sendas de tránsito permanente. Teniendo en cuenta las maquinarias disponibles en cada sitio, la alineación del tránsito a una senda permitió reducir la superficie compactada por tránsito a 39% en Aurelia y a 25% en Videla. Por lo tanto, el área en la que el suelo comenzó a recuperar su calidad física y en la que se presentaron los mayores rendimientos de los cultivos en años normales fue notablemente mayor que la destinada al tránsito de la maquinaria.

Conclusión

Los resultados de este trabajo demuestran que la compactación afecta tanto el desarrollo aéreo como de las raíces de los cultivos y que el efecto depende de la interacción grado de compactación-clima-cultivo. Dado que la compactación relativa, en general, disminuyó desde el centro de la senda permanente hacia la zona libre de tránsito, el rendimiento de los cultivos en general siguió ese mismo patrón. También la biomasa y distribución del sistema radicular fue alterada. Por lo tanto, realizar un manejo eficiente del tránsito de las maquinarias dentro de los lotes agrícolas, alineando al menos el paso de toda la maquinaria en una senda de tránsito, resulta una práctica útil para incrementar la recuperación de la calidad del suelo y los rendimientos. Esta

práctica constituye una alternativa eficiente de bajo costo para iniciar el camino hacia la adopción del tránsito controlado.

DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES Y POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los principales suelos destinados a la producción de cultivos agrícolas extensivos en Argentina son Argiudoles y Hapludoles. En la provincia de Santa Fe, los suelos Argiudoles de textura franco-limosa son vulnerables a la degradación física y escasamente resilientes (Sasal et al., 2006; Taboada et al., 2008). Como resultado del uso intensivo de las últimas décadas, estos suelos presentan sus propiedades químicas y físicas degradadas (Díaz-Zorita et al., 2002; Álvarez & Steinbach, 2009; Ghiberto et al., 2015).

La siembra directa fue propuesta como una alternativa de recuperación de los suelos por evitar procesos de degradación asociados a labranzas (Reicosky & Saxton, 2005). Esta práctica permitió expandir la frontera agrícola e impulsó al desarrollo de maquinaria agrícola de mayor tamaño, peso y capacidad de carga (Botta et al., 2006; Colombi & Keller, 2019). Como consecuencia el suelo queda expuesto a presiones mayores que pueden aumentar la compactación del suelo (Keller et al., 2019).

El proceso de compactación altera la estructura del suelo por lo que modifica diversas propiedades físicas (densidad aparente, resistencia a la penetración, porosidad total, distribución del tamaño de poros y su continuidad, permeabilidad al aire, conductividad hidráulica) (Flowers & Lal, 1998; Botta et al., 2004; Botta et al., 2006; Botta et al., 2007) y consecuentemente afecta la emisión de GEI, el crecimiento de las raíces y la producción de los cultivos (Botta et al., 2004; Botta et al., 2006; Botta et al., 2010; Imhoff et al., 2010b; Imvinkelried et al., 2010, Tolón-Becerra et al., 2011, Cosentino et al., 2013).

Una alternativa para reducir la superficie compactada consiste en realizar un manejo eficiente del tránsito de las maquinarias dentro de los lotes (Hamza & Anderson, 2005; Jorajuría & Draghi, 2000). El tránsito controlado de la maquinaria agrícola es una

práctica que fue propuesta a los fines de reducir la superficie que se compacta, dado que establece sendas de tránsito permanente y zonas de cultivo libre de tránsito dentro de los lotes agrícolas (Chamen, 2005). De esta manera sólo se compacta el 10-20% de la superficie, mientras en el resto se mantienen o mejoran las propiedades físicas del suelo (McPhee et al., 2015; Antille et al., 2015b).

Si bien existen trabajos internacionales donde los autores han evaluado los beneficios de adoptar el tránsito controlado de la maquinaria en el suelo y en la productividad de los cultivos, en nuestro país es escasa la información, probablemente debido a que las máquinas agrícolas poseen diferentes anchos de trocha y anchos de trabajo, lo que dificulta su implementación. Hasta el presente no se han realizado estudios detallados relacionados al patrón de distribución de la compactación desde el centro de la senda hacia las áreas aledañas ni sus efectos sobre el suelo y rendimiento de los cultivos.

Una primera aproximación a la adopción del TC consiste en alinear el tránsito de las maquinarias en una de las sendas de tránsito permanente, lo que permite reducir la superficie compactada de los lotes agrícolas al 30-40% (GRDC, 2004). En este trabajo, el análisis de diversas propiedades físicas permitió identificar la forma en la que se transmite la compactación causada por el uso del tránsito controlado de la maquinaria en las sendas de tránsito permanente y en las zonas adyacentes y su relación con el rendimiento de diversos cultivos agrícolas en suelos Argiudoles de textura franco-limosa de Argentina.

Los resultados del grado de compactación alcanzado en el suelo en las sendas de tránsito permanente y zonas aledañas al aplicar diversas intensidades de tránsito, mostraron que existe una distribución tridimensional del estrés aplicado; la compactación del suelo disminuyó desde el centro de las sendas de tránsito permanente hacia las zonas adyacentes no transitadas y también fue mayor en profundidad (100-200 mm) que en superficie (0-100 mm). Por otro lado, la compactación se transmitió diferencialmente a las zonas adyacentes, en los dos sitios a través del tiempo, obteniéndose resultados diferentes. Además, al final del estudio, en general, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos (intensidad de tránsito creciente

en las sendas: T0, T1 y T2) en el estrato superficial, mientras que en el estrato subsuperficial el T2 presentó los mayores valores de CR. Los resultados permitieron concluir que la compactación se transmite tridimensionalmente, pudiendo llegar a extenderse fuera de la senda de tránsito permanente, y que la transmisión de la compactación en suelos franco limosos depende de factores internos, como el contenido de materia orgánica, textura y estructura del suelo, y de factores externos, como las características de las maquinarias utilizadas, tipo de neumáticos y de la presión de inflado de los mismos (Horn & Rostek, 2000; Imhoff et al., 2016; Riggert et al., 2019; Seehusen et al., 2019). Esto permite aceptar parcialmente la hipótesis a) de esta tesis que propone que *“el grado de compactación del suelo depende de la intensidad de tránsito acumulada y decrece desde el centro de las sendas de tránsito permanente hacia las áreas adyacentes, por lo que la transmisión horizontal del estrés se limita a dicha senda de tránsito sin afectar las zonas aledañas”*.

La compactación del suelo por el tránsito de maquinaria es un proceso que altera la distribución de poros y, por lo tanto, condiciona el movimiento de agua y aire en el suelo y afecta los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el ambiente edáfico (Da Silva & Kay, 2004; Dexter et al., 2008). Los resultados obtenidos al evaluar el intervalo hídrico óptimo en las sendas de tránsito permanentes y zonas libre de tránsito indican que con la compactación aumenta la densidad del suelo y que valores de densidad del suelo más elevados causan un incremento de la curva de resistencia a la penetración y una disminución de la curva de porosidad de aireación (Da Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Wilson et al., 2013), mientras que el contenido hídrico a capacidad de campo y en punto de marchitez permanente se mantuvieron constantes. Estos resultados coinciden con los hallados por Zou et al. (2001), Imhoff et al. (2006), Imhoff et al. (2016) y Fernández et al. (2017). En las sendas de tránsito permanente se observaron valores de densidad de suelo más elevados e intervalos hídricos óptimos muy estrechos o nulos. Consecuentemente, el ambiente edáfico presenta elevadas restricciones para el desarrollo de las raíces y por lo tanto para el crecimiento de los cultivos, aún en condiciones de humedad próximas a capacidad de campo. Por otra parte, en las zonas de cultivo sin tránsito se observaron intervalos hídricos óptimos más amplios, lo que indica que la adopción del TC mejoró la calidad física del suelo para el desarrollo de los cultivos.

La compactación en las sendas de tránsito permanente alteró el sistema poroso del suelo, lo que se reflejó en los cambios de densidad del suelo, porosidad de aeración y retención de agua, afectando el intervalo hídrico óptimo y las emisiones de N₂O del suelo. A menor intervalo óptimo le correspondió los mayores valores de emisiones. En condiciones de espacio poroso del suelo con agua próximo a 50% y con temperaturas de suelo cercanas a 18°C se obtuvieron las mayores tasas de emisión de N₂O en las sendas de tránsito permanente. Por lo tanto, la adopción del TC, al disminuir la superficie compactada de los lotes agrícolas, es una práctica de manejo eficiente para inducir la regeneración de la estructura que se refleja en un mayor intervalo hídrico y reducir las emisiones de N₂O desde el suelo a la atmósfera. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Gasso et al. (2013), Antille et al. (2015a) y Tullberg et al. (2018). Los resultados proporcionan evidencias suficiente para aceptar la hipótesis b) de esta tesis que propone que *“el grado de compactación del suelo en las sendas de tránsito permanente y áreas adyacentes determina la magnitud del deterioro de la calidad estructural del suelo lo que resulta en la disminución del intervalo hídrico óptimo y el aumento de las tasas de emisión de óxido nitroso”*.

Por otra parte, diversas investigaciones previas documentaron el efecto de aplicar distintas intensidades de tránsito, cargas por eje y presión de contacto neumático/suelo sobre el rendimiento de cultivos y el peso seco de raíces (Botta et al., 2004, 2006, 2013; Tolón- Becerra et al., 2011). Sin embargo, en nuestro país, no existe información acerca del impacto de la transmisión de la compactación con el uso del TC sobre el desarrollo radicular y el rendimiento de diferentes cultivos agrícolas. La respuesta de los cultivos a las diferentes intensidades de tránsito aplicadas en las sendas de tránsito permanentes y zonas aledañas varió con el tipo de cultivo, el clima durante su desarrollo y con el grado de compactación relativa. En general, los menores rendimientos se observaron en las sendas de tránsito permanente, mientras que los mayores se obtuvieron en las zonas de cultivo libre de tránsito. Un hallazgo de esta tesis es que demuestra que la línea de cultivo ubicada en el borde de las sendas de tránsito permanente presentó una respuesta variable a la transmisión lateral de la compactación, variando principalmente con el cultivo y las condiciones climáticas durante su desarrollo. Además, el grado de compactación alcanzado en las sendas de tránsito permanente afectó la cantidad y la distribución de la biomasa radicular del cultivo de girasol, que prácticamente limitó el crecimiento radicular al estrato superficial (0-100

mm). Como consecuencia, la accesibilidad a los recursos disponibles para el cultivo (agua, aire y nutrientes) fue limitada y su rendimiento menor al logrado en la zona libre de tránsito. Los resultados permiten aceptar la hipótesis c) que sostiene que *“la compactación del suelo se reduce desde el centro de la senda de tránsito hacia los laterales condicionando el rendimiento y el desarrollo del sistema radicular de los cultivos”*.

El análisis conjunto de la información permite deducir que la adopción del tránsito controlado fue, en general, una práctica con resultados positivos ya que, si bien en las sendas de tránsito permanente se incrementa la compactación con los consiguientes efectos negativos, en las zonas libre de tránsito el suelo fue mejorando gradualmente su calidad estructural. Esto se manifestó en mejores condiciones físicas del suelo para lograr una mayor producción de los cultivos en un marco de mayor sustentabilidad de los sistemas. Por otra parte, a diferencia de lo que muestran estudios realizados en otros países (Australia, Inglaterra), que indican que la compactación queda confinada a las sendas de tránsito permanente, esta información proporciona nuevas evidencias acerca de que existe una transmisión tridimensional de la compactación que puede alcanzar las zonas aledañas a las sendas de tránsito permanente y afectar, dependiendo del grado de compactación alcanzado, el desarrollo de los cultivos. Las características intrínsecas de los suelos de la Pampa Llana Santafesina, especialmente su reducida resiliencia que resulta del efecto combinado de la presencia de minerales no expansivos, la pérdida de materia orgánica del suelo y elevado porcentaje de limo, condicionan la respuesta del suelo a la aplicación de cualquier estrés. Por lo tanto, para la aplicación del sistema de tránsito controlado es esencial considerar estas características distintivas de los suelos. Resulta necesario mantener los valores de compactación relativa en las sendas de tránsito permanente por debajo del umbral crítico que afecta el crecimiento de los cultivos, para evitar que la transmisión de la compactación a las zonas aledañas alcance valores que afecten el rendimiento de los cultivos en dichas zonas. Para lograrlo será necesario controlar las características de la maquinaria (peso, tipo de neumático, presión de inflado) y la humedad del suelo en el momento que se transita. Con la aplicación de estas medidas se considera posible implementar el tránsito controlado de la maquinaria de forma exitosa, tanto para los productores que lograrán mayores rendimientos, como para el ambiente que será beneficiado por la recuperación de los suelos (mayor captación de carbono) y la disminución de las emisiones de N₂O.

A partir de los estudios realizados en esta tesis se conciben las siguientes líneas potenciales de investigación:

1- Identificar prácticas de manejo que permitan intensificar los sistemas agrícolas y, simultáneamente, mejoren la calidad estructural del suelo en las zonas de cultivo libres de tránsito.

2- Estudiar las curvas de compresión y determinar la presión de precompresión (máxima compactación aceptable por aplicación de un estrés) de los suelos en las sendas de tránsito permanente para establecer las condiciones más adecuadas de transitabilidad de la maquinaria sin que se afecte la calidad del suelo en las zonas aledañas a dichas sendas. De esta forma se podrá lograr buenas condiciones físicas del suelo en la mayor superficie posible de los lotes.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Alakukku, L.; Weisskopf, P.; Chamen, W.C.T.; Tijink, F.G.J.; Van Der Linden, J.P.; Pires, S.; Sommerf, C.; Spoor, G. (2003). Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: A Review Part 1. Machine/Soil Interactions. *Soil Till. Res.*, 73: 145-160.

Álvarez, C.R.; Taboada, M.A.; Gutierrez-Boem, F.H.; Bono, A.; Fernandez, P.L.; Prystupa, P. (2008). Topsoil Properties as Affected by Tillage Systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am.*, 73(4): 1242-1250.

Álvarez, C.R.; Costantini, A.O.; Bono, A.; Taboada, M.A.; Gutiérrez Boem, F.H.; Fernández, P.L.; Prystupa, P. (2011). Distribution and vertical stratification of carbon and nitrogen in soil under different managements in the pampean region of Argentina. *R. Bras. Ci. Solo.*, 35: 1985-1994.

Álvarez, C.R.; Fernandez, P.L.; Taboada, M.A. (2012). Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos de la región pampeana. *Ci. Suelo.*, 30(2): 173-178.

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

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

Álvarez, C.; Costantini, A.; Álvarez, C.R.; Alves, B.J.R.; Jantalia, C.P.; Martelloto, E.E.; Urquiaga, S. (2012). Soil nitrous oxide emissions under different management practices in the semiarid region of the Argentinian Pampas. *Nutri. Cycl. Agroecosyst.*, 94: 209-220.

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

Antille, D.L.; Chamen, W.C.T.; Tullberg, J.N.; Lal, R. (2015a). The potential of controlled traffic farming to mitigate greenhouse gas emissions and enhance carbon sequestration in arable land: a critical review. *Trans. ASABE*, 58(3): 707-731.

Antille, D.L.; Imhoff, S.C.; Alesso, C.A.; Chamen, W.C.T.; Tullberg, J.N. (2015b). Potential to Increase Productivity and Sustainability in Argentinean Agriculture with Controlled Traffic Farming: A Short Discussion. *Acta Tech. Agric.*, 3: 83-87.

Ansorge, D.; Godwin, R.J. (2007). The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction, Part 1: single axle-studies. *Biosyst. Eng.*, 98: 115–126.

Ansorge, D.; Godwin, R.J. (2008). The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction, Part 2: multi-axle machine studies. *Biosyst. Eng.*, 99:338-347.

Aragón, A.; García, M.G.; Nico, A.I.; Filgueira, R.R. (1996). Compactabilidad de suelos; influencia de la capacidad de retención de agua y variables conexas. IV Congreso Argentino y II Internacional de Ingeniería Rural, Neuquén, Argentina. Memorias 2, 707-712 pp.

Aragón, A.; García, M.G.; Filgueira, R.R.; Pachepsky, Ya., A. (2000). Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: The relationship with organic carbon and water content. *Soil Till. Res.*, 56: 197-204.

Arvidsson, J.; Trautner, A.; Keller, T. (2002). Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. Pagliai, M., Jones, R. (Eds.). Catena Verlag, Reiskirchen. *Adv. Geoecol.*, 35: 331-338.

ASTM, (1982). Standard test methods for moisture relations using a 5.5 lb (2.5 kg) hammer and 12 inch (304.8 mm) drop. En: American Society for Testing Materials (Ed.). *ASTM Standards in Building Codes*. Am Soc Test Mater., Philadelphia. 836-842 pp.

Ball, B.C.; Scott, A.; Parker, J.P. (1999). Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil Till. Res.*, 53 (1): 29-39.

Ball, B.C.; Crichton, I.; Horgan, G.W. (2008). Dynamics of upward and downward N₂O and CO₂ fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence. *Soil Till. Res.*, 101: 20-30.

Ball, B.C. (2013). Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation. *Eur. J. Soil Sci.*, 64(3): 357-373.

Bateman, E. J.; Baggs, E. (2005). Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biol. Fertil. Soils.*, 41: 379-388.

Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use Manag.*, 25: 335-345.

Berisso, F.E.; Schjøning, P.; Keller, T.; Lamandé, M.; Etana, A.; De Jonge, L.W.; Iversen, B.V.; Arvidsson, J.; Forkman, J. (2012). Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and transport in a loamy soil. *Soil Till. Res.*, 122: 42-51.

Berli, M.; Kirby, J.M.; Springman, S.M.; Schulin, R. (2003). Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked construction machinery under various moisture conditions. *Soil Till. Res.*, 73: 57-66.

Berhongaray, G.; Álvarez, R.; De Paepe, J.; Caride, C.; Cantet, R. (2013a). Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma*. 192: 97-110.

Berhongaray, G.; King, J.S.; Janssens, I.A.; Ceulemans, R. (2013b). An optimized fine root sampling methodology balancing accuracy and time investment. *Plant Soil.*, 366: 351-361.

- Bessou, C.; Mary, B.; L´eonard, J.; Roussel, M.; Gr´ehan, E.; Gabrielle, B. (2010). Modelling soil compaction impacts on nitrous oxide emissions in arable fields. *Eur. J. Soil Sci.*, 61: 348-363.
- Beutler, A.N.; Centuri´on, J.F.; Da Silva, A.P. (2005). Soil Resistance to Penetration and Least Limiting Water Range for Soybean Yield in a Haplustox from Brazil. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 48: 863-871.
- Blake, G.R.; Hartge, H.H. (1986). Bulk density. En: Klute, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods. Part 1.* 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI. 363-375 pp.
- Boone, F.R.; Veen, B.W. (1994). Crop responses to soil compaction. En: *Soil Compaction in Crop Production.* Soane, B.D.; Van Ouwerkerk, C. (Eds.). Elsevier, Amsterdam. 237-264 pp.
- Botta, G.F.; Jorajur´ıa, D.; Draghi, L.M. (2002). Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *J. of Terram.*, 39: 47-54.
- Botta, G.F.; Jorajur´ıa, D.; Balbuena, R.; Rosatto, H. (2004). Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max L.*) yields. *Soil Till. Res.*, 78: 53-58.
- Botta, G.F.; Jorajur´ıa, D.; Rosatto, H.; Ferrero, C. (2006a). Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Till. Res.*, 86: 9-14.
- Botta, G. F.; Jorajuria, D.; Balbuena, R.; Ressia, J.; Ferrero, C.; Rosatto, H.; Tourn, M. (2006b). Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus L.*) yields. *Soil Till. Res.*, 91: 164–172.
- Botta, G.F.; Pozzolo, O.; Bomben, M.; Rosatto, H.; Rivero, D.; Ressia, M.; Tourn, M.; Soza, E.; Vazquez, J. (2007). Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max L.*): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil Till. Res.*, 96: 145-154.
- Botta, G.F.; Rivero, D.; Tourn, M.; Bellora-Melcon, F.; Pozzolo, O.; Nardon, G.; Balbuena, R.; Tol´on-Becerra, A.; Rosatto, H.; Stadler, S. (2008). Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. *Soil Till. Res.*, 101: 44-51.
- Botta, G.F.; Tol´on-Becerra, A.; Bellora Tourn, F. (2009). Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil Till. Res.*, 103: 381-386.
- Botta, G.F.; Tol´on-Becerra, A.; Lastra-Bravo, X.; Tourn, M. (2010). Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. *Soil Till. Res.*, 110:167-174.

- Botta, G.F.; Tolón-Becerra, A.; Lastra-Bravo, X.; Tourn, M.; Balbuena, R.; Rivero, D. (2013). Continuous application of direct sowing: Traffic effect on subsoil compaction and maize (*Zea mays* L.) yields in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.*, 134: 111-120.
- Botta, G.F.; Tolón-Becerra, A.; Rivero, D.; Laureda, D.; Ramírez-Roman, M.; Lastra-Bravo, X.; Agnes, D.; Flores-Parra, I.M.; Pelizzari F., Martiren, V. (2016). Compaction produced by combine harvest traffic: Effect on soil and soybean (*Glycine max* l.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas. *Eur. J. of Agron.*, 74:155-163.
- Botta, G.F.; Tolón-Becerra, A.; Bienvenido, F.; Rivero, E.R.D.; Laureda, D.A.; Contessotto, E.E.; Fonterosa, R.A.; Agnes, D.W. (2017). Traffic of harvester combines: effect on maize yields (*Zea Mays* L.) and soil compaction under direct sowing system. *Rev. FCA UNCUYO.*, 50 (1): 85-100.
- Botta, G.F.; Tolón-Becerra, A.; Bienvenido, F.; Rivero, D.; Laureda, D.A.; Ezquerra-Canalejo, A.; Contessotto, E.E. (2018). Sunflower (*Helianthus annuus* L.) harvest: tractor and chaser bin traffic effects on soil compaction and crop yields. *Land Degrad Dev.*, 29: 4252-4261.
- Bradford, J.M.; Peterson, G.A. (2010). Conservation Tillage. En: *Handbook of Soil Science*. M.E. Summer, (Ed.). Grs Press, Washington. 247-270 pp.
- Busscher, W.J. (1990). Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a commonwater content. *Transaction ASAE.*, 33:519-524.
- Buttarelli, M. (2008). Crecimiento y desarrollo de la parte aérea del cultivo de soja en suelos limosos compactados diferencialmente. Tesis. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Litoral. Esperanza, Santa Fe. Argentina
- Camp, C.R.; Gill, W.R. (1969). The effect of drying on soil strength parameters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33:641-644.
- Campbell, D.J.; O'Sullivan, M.F. (1991). The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction, and tillage. En: *Soil Analysis: Physical Methods*. Smith, K.A.; Mullins, C.E. (Eds.). Marcel Defier, New York. 399-429 pp.
- Carrizo, M.E.; Pilatti, M.A.; Alesso, C.A.; Imhoff, S. (2011). Atributos químicos de suelos argiudoles cultivados y no cultivados del departamento las colonias (santa fe). *Ci. Suelo.*, 29(2): 173-179.
- Carrizo, M.E.; Alesso, C.A.; Soares Franco, H.H.; Bernabé Ferreira, C.J.; Imhoff, S. (2018). Tensile strength of mollisols of contrasting texture under influence of plant growth and crop residues addition. *Geoderma*. 329 (1): 1-10.
- Carter, M.R. (1990). Relative measures of soil bulk density to characterize soil compaction in tillage studies on fine loamy sands. *Can. J. Soil Sci.*, 70: 425-443.
- Cayzac, J. D.; Dillchneider-Loza, A. (2016). Análisis de rendimientos de los diferentes híbridos de maíz a distintas densidades y fechas de siembra en la región semiárida

pampeana. Trabajo final de Graduación. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de la Pampa.

Cecagno, D.; Andrade, S.E.V.G.; Anghinoni, I.; Kunrath, T.R.; Martins, A.P.; Reichert, J.M.; Gubiani, P.I.; Balerini, F.; Fink, J.R.; Carvalho, P.C.F. (2016). Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Till. Res.*, 156: 54- 62.

Chamen, W.C.T. (2003). Controlled traffic farming – its history, global context and future prospects. In *Proceedings of the 16th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organisation, Brisbane, Australia*, 289-294 pp.

Chamen, W.C.T. (2005). Controlled-traffic Farming as a Complementary Practice to No-tillage. En: Baker, C.J.; Saxton, K.E. (Eds.). *No-tillage Seeding in Conservation Agriculture 2nd ed.* Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 236-254 pp.

Chamen, W.C.T. (2006). Controlled traffic farming on a field scale in the UK. En: *Soil Management for sustainability*. Horn, R.; Fleige, H.; Peth, S.; Peng, X. (Eds.). *Adv. Geocol.*, 38: 251-260 pp.

Chamen, W.C.T. (2015a). Controlled traffic farming from worldwide research to adoption in Europe and its future prospects. *Acta Tech. Agric.*, 3: 64-73.

Chamen, W.C.T.; Moxey, A.P.; Towers, W.; Balana, B.; Hallett, P.B. (2015b). Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil Till. Res.*, 146: 10-25.

Chen, G.; Weil R.R.; Hill, R.L. (2014). Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Till. Res.*, 136: 61-69.

Colombi, T.; Torres, L.C.; Walter, A.; Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth - a vicious circle. *Sci. Tot. Environ.*, 626: 1026–1035.

Colombi, T.; Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction – a plant eco-physiological perspective. *Soil Till. Res.*, 191: 156-161.

Cosentino, V.R.N.; Figueiro Aureggi, S.; Taboada, M.A. (2013). Hierarchy of factors driving N₂O emissions in non-tilled soils under different crops. *Eur. J. Soil Sci.*, 64: 550-550.

Czarnes, S.; Dexter, A.R.; Bartoli, F. (2000). Wetting and drying cycles in the maize rhizosphere under controlled conditions. *Mechanics of the root-adhering soil*. *Plant Soil.*, 221 (2): 253-271.

Dalal, R.C.; Wang, W.; Robertson, G.P.; Parton W.J. (2003). Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Austr. J. Soil Res.*, 41 (2):165-195.

- Danfors, B. (1994). Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil Till. Res.*, 29 (2-3): 135-144.
- Da Silva A.P.; Kay, B.; Perfect, E. (1994). Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1775-1781.
- Da Silva, A.P.; Kay, B.D.; Perfect, E. (1997). Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil Till. Res.*, 44: 81-93.
- Da Silva, A.P.; Kay, B.D. (2004). Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. *Soil Till. Res.*, 79:167-174.
- De Souza, G. S.; De Souza, Z.; De Silva, M.; Barboza, R.; Barbosa, R.S.; Araújo Silva, F. (2014). Controle de tráfico e seu efeito na qualidade física do solo e no cultivo da cana-de-açúcar. *Rev.Bras. Ci. Solo.*, 38(1): 135-146.
- Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 120: 201-214.
- Dexter, A.R.; Czcz, E.A.; Richard, G.; Reszkowska, A. (2008). A user friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore space in soil. *Geoderma*. 143:243-253.
- 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): 1-18.
- Ding, G.; Novak, J.M.; Amarasiriwardena, D.; Hunt, P. G.; Xing, B. (2002). Soil Organic Matter characteristics as affected by tillage management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 421-429.
- Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo C.W. (2013). *InfoStat, versión 2013*, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Draghi, L.; Jorajuria, D.; Sarena, D.; Bailleres, M.; Melani, E.; Castillo, J.M.; Cerisola, C.; Palancar, T. (2015). Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agroci. Uruguay*. 19 (2): 59-67.
- Ekwue, E.I.; Stone, R.J. (1995). Organic Matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 38: 357-365.
- Eriksson, J.; Håkansson, I.; Danfors, B. (1974). The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. *Swedish Inst. Agric. Eng.*, Sidney. 101 pp.
- Fernández, R.; Quiroga, A.; Lobartini, C.; Noellemeyer, E. (2017). Determinación del intervalo hídrico óptimo en ustoles de la región semiárida pampeana. *Ci. Suelo.*, 35 (2): 215-227.

- Ferreras, L.; Magra, G.; Besson, P.; Kovalevski, E.; García, F. (2007). Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ci. Suelo.*, 25(2): 159-172.
- Ferreira, R.A.; Podestá, G.P.; Messina, C.D.; Letson, D.; Dardanelli, J.; Guevara, E.; Meira, S. (2001). A linked-modeling framework to estimate maize production risk associated with ENSO-related climate variability in Argentina. *Agric. Forest. Met.*, 107: 177-192.
- Flowers, M.; Lal, R. (1998). Axle load and tillage effect on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Till. Res.*, 48: 21–35.
- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons Inc., New York, 517 pp.
- Gasso, V.; Sørensen, C.A.G.; Oudshoorn, F.W.; Green, O. (2013). Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts. *Eur. J. Agron.*, 48: 66-73.
- Gasso, V.; Oudshoorn, F.; Sorensen, C.A.; Pedersen, H.H. (2014). An environmental life cycle assessment of controlled traffic farming. *J. Cleaner Prod.*, 73:175-182.
- Gee, G.W.; Bauder, J.W. (1986). Particle size distribution. En: Klute, A. (Ed.). *Method of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI. 383-411 pp.
- Ghiberto, P.J.; Pilatti, M.A; Imhoff, S.; Orellana, J.A. (2007). Hydraulic conductivity of milisolls irrigated with sodio-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentina). *Agric. Water Manag.*, 88:192-200.
- Ghiberto, P.; Imhoff, S.; Libardi, P.L.; Da Silva, A.P.; Tormena, C.A.; Pilatti, M.A. (2015). Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. *Sci. Agricola.*, 72 (2):167-174.
- Gibbs, H.K.; Salmon, J.M. (2015). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*. 57: 12-21.
- Goodman, A.M.; Ennos, A.R. (1999). The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root system of sunflower and maize. *Ann Bot.*, 83: 293-302.
- Gregorich, E.G.; McLaughlin, N.B.; Lapen, D.R.; Ma, B.L.; Rochette, P. (2014). Soil Compaction, Both an Environmental and Agronomic Culprit: Increased Nitrous Oxide Emissions and Reduced Plant Nitrogen Uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 78(6): 1913-1923.
- Gregorutti, V.C.; Caviglia, O.P. (2017). Nitrous oxide emission after the addition of organic residues on soil surface. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 246: 234-242.
- GRDC - Grain research and development corporation. (2004). *Tramline farming system- Technical Manual*. Bulletin 4607. Dep. of Agric. Gov. of Western Australia. 91 pp.

- Haas, C.; Holthusen, D.; Mordhorst, A.; Lipiec, J.; Horn, R. (2016). Elastic and plastic soil deformation and its influence on emission of greenhouse gases. *Int. Agrophys.*, 30: 173-184.
- Håkansson, I. (1988). A method for characterizing the state of compactness of an arable soil. En: Drescher, J.; Horn, R.; de Boodt, M. (Eds.). *Impact of water and external forces on soil structure*. Catena: Supplement II, Catena Verlag, Cremlingen, Germany, 101-105 pp.
- Håkansson, I.; Reeder, R.C. (1994). Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil Till. Res.*, 29: 277-304.
- Håkansson, I.; Voorhees, M.W. (1998). Soil compaction. En: *Methods for assessment soil degradation*. Lal, R.; Blum, W.H.; Valentine, C.; Steward, B.A. (Eds.). Boca Raton: CRS Press. 169-179 pp.
- Håkansson, I. 2005. Machinery-Induced compaction of arable soils. Incidence, consequences, counter-measures. Reports from the division of soil management, N° 109, 153 pp.
- Hamza, M.A.; Anderson, W.K. (2005). Soil compaction in cropping systems. *Soil Till. Res.*, 82: 121-145.
- Hartge, K.; Horn, R. (2016). Mechanical and hydraulic forces in soils. En: Horton, R.; Horn, R.; Bachmann, J.; Peth, S. (Eds.). *Essential Soil Physics, An Introduction to Soil Processes, Functions, Structure, and Mechanics*. 1st English ed., Schweizerbart Sci. Publ., Stuttgart, Germany, 48-83 pp.
- He, C.; Finlayson, S.A.; Drew, M.C.; Jordan, W.R.; Morgan, P.W. (1996). Ethylene biosynthesis during aerenchyma formation in roots of maize subjected to mechanical impedance and hypoxia. *Plant Physiol.*, 112:1679-1685.
- 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. *Ci. Suelo.*, 24 (2): 109-114.
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, New York, 413 pp.
- Horn, R.; Dexter, A.R. (1988). Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil Till. Res.*, 13 (3): 253-266.
- Horn, R.; Johnson, C.; Semmel, H.; Schafer, R.; Lebert, M. (1992). Stress measurements in undisturbed unsaturated soils with a stress state transducer (SST)-theory and first results. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 155: 269-274.
- Horn, R.; Lebert M. (1994). Soil compactability and compressibility. En: *Soil compaction in crop production*. Soane, B.D.; Van Ouwerkerk, C. (Eds.). *Dev. Agric. Eng.*, 11: 45-69 pp.

- Horn, R.; Domzal, H.; Slowihka-Jurkiewicz, A.; Van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, 35: 23-36.
- Horn, R.; Baumgartl, T. (1999). Dynamic properties in structures soils. En: *Handbook os soil science*. Summer, M. (Ed.). CRC Press, Boca Raton. 19-46 pp.
- Horn, R.; Rostek J. (2000). Subsoil compaction processes- State of knowledge. En: *Subsoil compaction: distribution, processes and consequences*. Horn, R.; Van den Akker, J.J.H.; Arvidsson, J. (Eds.). *Adv. Geoecol.*, Reiskirchen, Catena Verl. Germany. 32: 44-54 pp.
- Horn, R.; Fleige, H.; Zimmermann, I.; Peng, X. (2017). Soil physical compaction and erosion as a threat to food production and human health. En: Singh, B.R., McLaughlin, M.J., Brevik, E.C. (Eds.). *The Nexus of Soils, Plants, Animals and Human Health*. Schweizerbart Science Publisher, Stuttgart, 42-49 pp.
- Horn, R.; Fleige, H.; Lal, R.; Zimmermann, I. (2018). Soil health and functions as a basic requirement for advancing the DG's. En: Lal, R., Horn, R., Kosaki, T. (Eds.). *Soils and Sustainable Development Goals. GeoEcology Essay*, Catena Soil Sciences, Stuttgart, 52-60 pp.
- Imhoff, S.; Da Silva, A.P.; Dias Junior, M.S.; Tormena, C.A. (2001). Quantificação das pressões crítica para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo.*, 25:11-18.
- Imhoff, S.; Da Silva, P.A.; Fallow, D. (2004). Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 17-24.
- Imhoff, S.; Gay, J.P.; Grioni, A. y Ghiberto; P.J. (2006). Calidad física de Argiudoles de Santa Fe determinada por medio del Intervalo Hídrico Óptimo. En: *XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Salta y Jujuy, Argentina. Formato CD-ROM.
- Imhoff, S.; Ghiberto, P.; Grioni, A.; Gay, J.P. (2010a). Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the flat Pampas of Argentina. *Geoderma*. 158: 95-108.
- Imhoff, S.; Kay, B.D.; Da Silva A.P.; Hajabbasi, M.A. (2010b). Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil Till. Res.*, 106: 303-310.
- Imhoff, S.; Da Silva, A.P.; Ghiberto, P.J.; Tormena, C.A.; Pilatti, M.A.; Libardi, P.L. (2016). Physical quality indicators and mechanical behavior of agricultural soils of Argentina. *Plos One*. 1-21.
- Imvinkelried, H.; Imhoff S.; Buttarelli, M. (2010). Análisis del crecimiento y respuesta del rendimiento del cultivo de soja a la compactación del suelo. En: *Acta de resúmenes XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Rosario.

Imvinkelried, H.O.; Pietrobón, M.; Dellaferrera, I.; Imhoff, S. (2019). Efecto de la descompactación del suelo sobre las propiedades físicas y el rendimiento de trigo y soja. *Ci. Suelo.*, 37 (1): 1-10.

IPCC. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.

IRAM-SAGPyA. (2007). *Calidad ambiental. Calidad del suelo. Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 2 - Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla sulfocrómica en suelos.* N° 29571-2, 14 pp.

Jorajuría, D.; Draghi, L. (1997). The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. *J. Agric. Eng. Res.*, 66: 261-265.

Jorajuría, D.; Draghi, L. (2000). Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte I: Influencia del peso y del número de pasadas. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 4: 445-452.

Katja, A.; Kuhwald, M.; Brunotte, J.; Duttmann, R. (2019). FiTraM: A model for automated spatial analyses of wheel load, soil stress and wheel pass frequency at field scale. *Bios. Eng.*, 180: 108-120.

Katou, H.; Miyaji, K.; Kubota, T. (1987). Susceptibility of undisturbed soils to compression as evaluated from the changes in the soil water characteristic curves. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33 (4): 539-554.

Kay, B.D.; Hajabbasib, M.A.; Yingc, J.; Tollenaarc, M. (2006). Optimum versus non-limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate of development of maize (*Zea mays* L.). *Soil Till. Res.*, 88: 42-54.

Keller, T.; Lamand, M.; Peth, S.; Berli, M.; Delenne, J.Y.; Baumgarten, W.; Rabbel, W.; Radjai, F.; Rajchenbach, J.; Selvadurai, A.P.S.; Or, D. (2013). An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. *Soil Till. Res.*, 128: 61-80.

Keller, T.; Berli, M.; Ruiz, S.; Lamandé, M.; Arvidsson, J.; Schjønning, P.; Selvadurai, A. P. S. (2014). Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil Till. Res.*, 140: 106-117.

Keller, T.; Colombi, T.; Ruiz, S.; Manalili, M.P.; Rek, J.; Stadelmann, V.; Wunderli, H.; Breitenstein, D.; Reiser, R.; Oberholzer, H.R.; Schymanski, S.; Romero-Ruiz, A.; Linde, N.; Weisskopf, P.; Walter, A.; Or, D. (2017). Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. *Vadose Zone J.* 16.

Keller, T.; Sandin, M.; Colombi, T.; Horn, R.; Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil Till. Res.*, (en prensa).

Kingwell, R.; Fuchsbichler, A. (2011). The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. *Agric. Syst.*, 104: 513-521.

- Kirby, J.M. (1999). Soil stress measurement: Part 1, transducer in a uniform stress field. *J. Agric. Eng. Res.*, 72: 151-160.
- Klute, A. (1986). Water retention: Laboratory Methods. En: *Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Methods*. En: Klute, A. (Ed.). Am. Soc. Agron. Madison, Estados Unidos. 635-660 pp.
- Kumar, A.; Chen, Y.; Sadek, M.A.A.; Rahman, S. (2012). Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. *Agric. Eng. Int.*, 14 (1): 26-37.
- Koolen, A.J.; Kuipers, H. (1983). *Agricultural soil mechanics*. Berlin, Springer-Verlag. 241pp.
- Koolen, A.J. (1994). Mechanics of soil compaction. En: Soane, B.D.; Van Ouwerkerk, C. (Eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, 23-44 pp.
- Kroulík, M.; Kumhála, F.; Hula, J.; Honzík, I. (2009). The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. *Soil Till. Res.*, 105: 171–175.
- Lal R. (1990). Soil Erosion and land degradation: The Global Risks. En: Lal R.; Stewart B.A. (Eds.) *Advances in Soil Science*, Springer, New York, NY. 11: 129-172 pp.
- Lal, R. (1993). Soil degradation, soil quality and soil resilience. *Soil Till. Res.*, 29: 1-8.
- Lapen, D.R.; Topp, G.C.; Gregorich, E.G.; Curnoe, W.E. (2004). Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170.
- Larson, W.E., Gupta, S.C., Useche, R.A. (1980). Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 450-457.
- Leão, T.P.; Da Silva, A.P.; Macedo, M.C.M.; Imhoff, S.; Euclides, V.P.B. (2006). Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Till. Res.*, 88:279-285.
- Leirós, M.C.; Trasar-Cepeda, C.; Seoane, S.; Gil-Sotres, F. (1999). Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biol. Biochem.*, 31:327-335.
- Letey, J. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1: 277-294.
- Li, Y.X.; Tullberg, J.N.; Freebairn, D.M. (2007). Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. *Soil Till. Res.*, 97: 282–292.
- Linn, D.M.; Doran, J. W. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 1267–1272.

- Lipiec, J.; Stepniewski, W. (1995). Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil Till. Res.*, 35:37-52.
- Lipiec, J.; Hatano, R. (2003a). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*. 116: 107-123.
- Lipiec, J.; Medvedev, V.V.; Birkas, M.; Dumitru, E.; Lyndina, T.E.; Rousseva, S.; Fulajtar, E. (2003b). Effect of soil compaction on root growth and crop yield in central and eastern Europe. *Int Agrophys.*, 17: 61-70.
- Lipiec, J.; Horn, R.; Pietrusiewicz, J.; Siczek, A. (2012). Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil Till. Res.*, 121: 74-81.
- Mapfumo, E.; Chanasyk, D.S. (1998). Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance–density–moisture relations of three disturbed soils from Alberta. *Soil Till. Res.*, 46 (3): 193–202.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G., Swift, M.J. (1997). Agricultural intensification and Ecosystem Properties. *Science*. 277, 504-508.
- Materechera, S.A.; Kirby, J.M.; Alston, A.M.; Dexter, A.R. (1994). Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant Soil.*, 160 (1): 57-66.
- Mchugh, A.D.; Tullberg, J.N.; Freebairn, D.M. (2009). Controlled traffic farming restores soil structure. *Soil Till. Res.*, 104:164-172.
- McPhee, J.E.; Aird, P.L.; Hardie, M.A.; Corkrey, S.R. (2015). The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. *Soil Till. Res.*, 149: 33-45.
- Micucci, F.G.; Taboada, M.A. (2006). Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.*, 86: 152-162.
- Mirleau-Thebaud, V.; Dayde, J.; Scheiner, J.D. (2017). The influence of soil compaction and conservation tillage on sunflower's (*Helianthus annuus* L.) below ground system. *FYTON*. 86: 53-67.
- Mosconi, F.; Priano, L.; Hein, N.; Moscatelli, G.; Salazar, J.; Gutierrez, T.; Caceres, L. (1981). Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe. Tomo 1. INTA-MAG. 247 pp.
- Mosier, A.R.; Kroeze, C.; Nevison, C.; Oenema, O.; Seitzinger, S.; Van Cleemput, O. (1998). Closing the global atmospheric N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr. Cycl. Agroecos.*, 52: 225-248.
- Mossadeghi-Björklund, M.; Arvidsson, J.; Keller, T.; Koestel, J.; Lamandé, M.; Larsbo, M.; Jarvis, N. (2016). Effects of subsoil compaction on hydraulic properties and preferential flow in a Swedish clay soil. *Soil and Till Res.*, 156: 91–98.

- Novelli, L.E.; Caviglia, O.P.; Wilson, M.G.; Sasal, M.C. (2013). Land use intensity and cropping sequence effects of aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*. 195: 260-267.
- Nunes, R. N.; Denardin J. E.; Pauletto, E. A.; Faganello, A.; Spinelli Pinto, F. (2015). Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil Till. Res.*, 148: 119-126.
- Oertel, C.; Matschullat, J.; Zurba, K.; Zimmermann, F.; Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils- A review. *Geochem.*, 76: 327-352.
- Osunbitan, J.A.; Oyedele, D.J.; Adekalu, K.O. (2005). Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil Till. Res.*, 82:57-64.
- Parkin, T.; Mosier, A.; Smith, J.; Venterea, R.; Johnson, J.; Reicosky, D.; Doyle, G.; McCarty, G.; Baker, J. (2003). USDA-ARS GRACEnet Chamber-Based Trace Gas Flux Measurement Protocol. USDA-ARS, Washington DC. 28.
- Pecorari, C.; Andriulo, A.; Ausilio, A. (1993). Aptitud fisicomecánica de los suelos para el laboreo. II. Efectos de la textura y de la materia orgánica sobre la densidad aparente máxima de algunos suelos de la región pampeana Argentina. Informe Técnico INTA N°. 281, 16 pp.
- Pilatti, M.A.; Imhoff, S. Ghiberto; P.J.; Marano, R.P. (2006). Changes in some physical properties of Molisoll induced by supplemental irrigation. *Geoderma*. 33:431-443.
- Prather, M.; Derwent, R.; Ehhalt, D.; Fraser, P.; Sanhueza, E.; Zhou, X. (1995). Other trace gases and atmospheric chemistry. En: *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Bruce, J.; Lee, H.; Callender, B.A.; Haites, E. (Eds.). Cambridge. University Press, Cambridge. 73-126 pp.
- Proctor, E.R. (1933). Design and construction of rolled earth dams. *Eng. News Record*, 3, 245-284, 286-289, 348-351, 372-376.
- Radford, B.; Bridge, B.; Davis, R.; McGarry, D.; Pillai, U.; Rickman, J.; Yule, D. (2000). Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. *Soil Till. Res.*, 54(3-4): 155-170.
- Radford, B.J.; Yule, D.F.; McGarry, D.; Playford, C. (2001). Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil Till. Res.*, 61:157-166.
- Ramos, J.C.; Imhoff, S.; Pilatti, M.A.; Vegetti, A.C. (2010). Morphological characteristics of soybean root apices as indicators of soil compaction. *Sci. Agric.*, 67: 707-712.
- Ravishankara, A.R.; Daniel, J.S.; Portmann, R.W. (2009). Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. *Science*, 326 (5949), 123–125.

- Reeve, R.C. (1953). A method for determining the stability of soil structure based upon air and water permeability measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 17: 324-329
- Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Akiyoshi Sanches Suziki, L.E.; Horn, R. (2010). II Mecanica do solo. En: Física do solo. Quirijn de Jong van L. (Ed.). Soc. Brasileira de Ciencia do Solo. Vicosa, Mina Gerais. 30-98 pp.
- Reicosky, D.C.; Saxton, K.E. (2005). The Benefits of No-tillage. En: Baker, C.J.; Saxton, K.E. (Eds.). *No-tillage Seeding in Conservation Agriculture* 2nd ed. Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 11-20 pp.
- Revelli, G.R.; Gagliardi, R.C.; Sbodio, O.A.; Tercero, E.J. (2010). Propiedades físicoquímicas en suelos predominantes del noroeste de Santa Fe y sur de Santiago del Estero, argentina. *Ci. Suelo.*, 28(2): 123-130.
- Richard, G.; Cousin, I.; Sillon, J.F.; Bruand, A.; Guérif, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.*, 52: 49-58.
- Riggert, R.; Fleige, H.; Horn, R. (2019). An assessment scheme for soil degradation caused by forestry machinery on skid trails in Germany. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, (en prensa).
- Rochette, P.; Angers, D.A.; Bélanger, G.; Chantigny, M.H.; Prévost, D.; Lévesque, G.; (2004). Emissions of N₂O from alfalfa and soybean crops in Eastern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 493-506.
- Ruser, R.; Flessa, H.; Russow, R.; Schmidt, G.; Buegger, F.; Munch, J.C. (2006). Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biol. Biochem.*, 38(2), 263-274.
- SAMLA. (2004). Recopilación de técnicas de laboratorio. Formato CD-ROM. ISBN 987-9184-40-8.
- Sangoi, L. (2001). Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. *Ci. Rural.*, 31(1): 159-168.
- Sasal, M.C.; Andriulo, A.E.; Taboada, M.A. (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Till. Res.*, 87 (1): 9-18.
- Seehusen, T.; Riggert, R.; Fleige, H.; Horn, R.; Riley, H. (2019). Soil compaction and stress propagation after different wheeling intensities on a silt soil in South-East Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B. Soil Plant Sci.*, 69: 343-355.
- SIIA (Sistema Integrado de Información Agropecuaria). (2015). (Acceso 23 de octubre de 2019) <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes>.
- Sivarajan, S.; Maharlooei, M.; Bajwa, S. G.; Nowatzki, J. (2018). Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil Till. Res.*, 175: 234–243.

- Smith, K.A.; Arah, J.R.M. (1990). Losses of nitrogen by denitrification and emissions of nitrogen oxides from soils. En: *The Fertiliser Society Proceedings*, London. 299 pp.
- Smith, K.A.; Conen, F. (2004). Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. *Soil Use Manag.*, 20: 255-263.
- Smith, K.A.; Ball, T.; Conen, F.; Dobbie, K.E.; Massheder, J.; Rey, A. (2018). Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *Eur. J. Soil Sci.*, 69 (1): 10-20.
- Soane, B.D.; Campbell, D.J.; Herkes, S.M. (1972). The characterization of some Scottish arable topsoils by agricultural and engineering methods. *J. Soil Sci.*, 23: 94-104.
- Soane, B.D.; Blackwell, P.S.; Dickson, J.W.; Painter, D.J. (1981). Compaction by agricultural vehicles: a review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil Till. Res.*, 1: 207-237.
- Soane, B.D. (1990). The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil Till. Res.*, 16:179-201.
- Soane B.D.; van Ouwerkerk C. (1994). Soil compaction problems in world agriculture. En: *Soil Compaction in Crop Production*. Soane, B.D.; Van Ouwerkerk, C. (Eds). Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1-21 pp.
- Soane, B.D.; Van Ouwerkerk, C. (1995). Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil Till. Res.*, 35: 5-22.
- Soane, B.D.; Ball, B.C.; Arvidsson, J.; Basch, G.; Moreno, F.; Roger Estrade, J. (2012). No-till in northern and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Till. Res.*, 118: 66-87.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA, National Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Steel, R.G.D.; Torrie, J.H. (1997). *Bioestadística: Principios y Procedimientos*. McGraw- Hill, México. 622 pp.
- Stevens, R.J.; Laughlin, R.J.; Burns, L.C.; Arah, J.R.M.; Hood, R.C. (1997). Measuring the contributions of nitrification and denitrification to the flux of nitrous oxide from soil. *Soil Biol. and Bioch.*, 29 (2):139-151.
- Strudley, M.W.; Green, T.R.; Ascough, J.C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Till. Res.*, 99: 4-48.
- 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. *J. Soil Sci.*, 173: 130-142.

- Thomas, G.W.; Haszler, G.R.; Blevins, R.L. (1996). The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the Proctor test. *Soil Sci.*, 161: 502-508.
- Tisdall, J.M.; Cockroft, B.; Uren, N.C. (1978). The stability of soil aggregates as affected by organic materials, microbial activity and physical disruption. *Aust. J. Soil Res.*, 16: 9-27.
- Tolón-Becerra, A.; Tourn, M.; Botta, G.F.; Lastra-Bravo, X. (2011). Effects of different tillage regimes on soil compaction, maize (*Zea mays* L.) seedling emergence and yields in the eastern Argentinean Pampas region. *Soil Till. Res.*, 117: 184-190.
- Tormena, C.A.; Da Silva, A.P.; Libardi, P.L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo.*, 22:573-581.
- Tullberg, J. (2001). Controlled traffic for sustainable cropping. En: Proceedings of the 10th Australian Agronomy Conference, Hobart, Tasmania, 10 pp.
- Tullberg, J.N.; Yule, D.F.; Mc Garry, D. (2007). Controlled traffic farming- From research to adoption in Australia. *Soil Till. Res.*, 97: 272-281.
- Tullberg, J.N.; Antille, D.L.; Bluett, C.; Eberhar, J.; Scheer, C. (2018). Controlled traffic farming effects on soil emissions of nitrous oxide and methane. *Soil Till. Res.*, 176: 18-25.
- Unger, P.W.; Kaspar, T.C. (1994). Soil compaction and root growth: a review. *Agron. J.* 86:759-766.
- Ussiri, D.; Lal, R., (2013). Global nitrogen cycle. Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation. 29-62 pp.
- Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.*, 44:892-898.
- Vepraskas, M.J. (1984). Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1220-1225.
- Vepraskas, M.J.(1994). Plants response mechanisms to soil compaction. En: Wilkinson, R.E. (Ed.), *Plant Environment Interactions*. Marcel Dekker Inc., New York, 263-287 pp.
- Wilson, M.G.; Sasal, M.C.; Caviglia, O.P. (2013). Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma*. 192: 354-361.
- Zhang, H.; Hartge, K.H.; Ringe, H. (1997). Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 239-245.
- Zou, C.; Sands, R.; Buchan, G.; Hudson, I. (2000). Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soil. *Aust. J. Soil Res.*, 38:947- 958.

Zou, C.; Penfold, C.; Sands, R.; Misra, R.K.; Hudson, I. (2001). Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiate pine seedlings. *Plant Soil.*, 236:105-115.

PUBLICACIÓN DERIVADA DE ESTA TESIS

Masola, M.J.; Alesso, C.A.; Carrizo, M.E.; Berhongaray, G.; Botta, G.F.; Horn, R.; Imhoff, S. (2020). Advantages of the one-wheeled tramline for multiple machinery widths method on sunflower (*Helianthus annus L.*) and maize (*Zea mays L.*) responses in the Argentinean Flat Pampas. *Soil Till. Res.*, 196:104462.