



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16

Universidad Nacional de La Plata

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Influencia del tráfico en la calidad física del suelo sobre dos sistemas de labranza

Modalidad: Trabajo de investigación

Ing. Agr. Franco Angel Rossi

DNI: 34544470

e-mail: francoangelrossi@hotmail.com

Teléfono: 2323-582277

Director: Dr. Luis Alberto Lozano

Co-Director: Dr. Telmo Palancar

Tesis para optar por el grado académico de Magister Scientiae en Mecanización

Agrícola

Fecha de entrega: 22 de marzo de 2023

17 Índice

18	1	RESUMEN	2
19	2	INTRODUCCIÓN	3
20	3	HIPÓTESIS	10
21	4	OBJETIVOS	10
22	5	MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
23	5.1	Descripción general del experimento, tratamientos y condiciones climáticas.....	11
24	5.2	Parámetros físicos e hidráulicos del suelo	15
25	5.2.1	Indicadores estáticos de calidad física de suelo. Densidad aparente, porosidad total y distribución de tamaño de poros.	15
26			
27	5.2.2	Indicadores dinámicos de calidad física de suelo. Conductividad hidráulica, porosidad efectiva e índice de conectividad	17
28			
29	5.2.3	Humedad de suelo y resistencia a la penetración	25
30	5.3	Análisis estadístico	26
31	6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
32	6.1	Indicadores estáticos de calidad física de suelo. Densidad aparente, porosidad total y distribución de tamaño de poros.	27
33			
34	6.2	Indicadores dinámicos de calidad física de suelo. Conductividad hidráulica, porosidad efectiva e índice de conectividad.....	30
35			
36	6.3	Humedad del suelo y resistencia a la penetración	35
37	6.4	Rendimiento del cultivo	41
38	6.5	Consideraciones finales.....	43
39	7	CONCLUSIONES	44
40	8	BIBLIOGRAFÍA	45
41	9	ANEXO	53
42	9.1	Anexo I:.....	53
43	9.2	Anexo II:.....	53
44	9.3	Anexo III:.....	54
45	9.4	Anexo IV:	54
46			

47 1 RESUMEN

48 La calidad física del suelo puede ser evaluada mediante indicadores estáticos, dinámicos y
49 mecánicos. Los objetivos de esta tesis fueron i) Determinar propiedades del sistema poroso
50 y propiedades hidráulicas del suelo en diferentes momentos del ciclo del cultivo,
51 comparando un sistema de labranza convencional (LC) con el sistema de siembra directa
52 (SD). ii) Evaluar el efecto del tráfico agrícola sobre indicadores de calidad física del suelo
53 en dos sistemas de labranza. iii) Analizar la capacidad de los parámetros resistencia a la
54 penetración (RR) y densidad aparente (DAP), en comparación con infiltración y movimiento
55 del agua en el suelo, para predecir cambios en la calidad física de suelos. Sobre un cultivo
56 de soja sembrado en Chascomús bajo SD y LC, se midió DAP, porosidad total,
57 conductividad hidráulica, porosidad efectiva, distribución de tamaño de poros, índice de
58 conectividad, humedad de suelo, RR y rendimiento del cultivo, en tres momentos diferentes,
59 previo a la siembra, posterior a la siembra y posterior a la cosecha. Se midió en lugares
60 donde hubo huella de la última labor realizada (CH) y en lugares donde no hubo pisada de
61 ningún neumático de la última labor realizada (SH). Se encontró que las propiedades del
62 suelo sufren variaciones temporales generadas por el tráfico agrícola en ambos sistemas
63 de labranza. En LC se dieron las mayores magnitudes de respuesta, como así también en
64 los lugares donde hubo pisada del neumático. No hubo diferencia en el rendimiento del
65 cultivo, a pesar de las diferencias de la calidad física del suelo detectada por los diferentes
66 indicadores evaluados. Se concluyó que la cosecha es la labor que mayor efecto negativo
67 tiene sobre los parámetros físicos, y que tanto la labranza convencional como la siembra
68 directa generan condiciones físicas del suelo que limitan el rendimiento de los cultivos.

69 **Palabras claves:** infiltración, resistencia a la penetración, densidad aparente, porosidad.

70 **2 INTRODUCCIÓN**

71 La superficie agrícola de Argentina aumentó más del 70 % desde la campaña 1989-1990
72 hasta la campaña 2016-2017, superando los 36 millones de hectáreas. La siembra directa
73 (SD) fue incorporada en Argentina a fines de la década de 1970 abarcando solo un 0,4 %
74 de la superficie agrícola y tuvo un aumento considerable y sostenido en el tiempo, llegando
75 al 91 % de la superficie agrícola al final del período mencionado anteriormente (AAPRESID,
76 2018).

77 El sistema bajo SD tiene, generalmente, menor intensidad de tráfico que los sistemas de
78 labranza convencional (LC) pero esto no disminuyó el peso ejercido por la máquina sobre
79 el suelo (Botta et al., 2009). La relación peso/potencia de los tractores ha bajado en los
80 últimos años, pero el peso total se ha incrementado significativamente en búsqueda de
81 equipos más económicos en sus prestaciones al reducir los costos operativos y permitir
82 agrandar la superficie cultivada (Botta et al., 2004; Botta et al., 2006). El aumento de este
83 parámetro influye en las características físicas de los suelos que se transitan.

84 Evaluar la calidad física del suelo en los primeros centímetros de profundidad es
85 fundamental para determinar diferentes procesos relacionados con el rendimiento del
86 cultivo (Reynolds et al., 2002). Las propiedades físicas del suelo determinan la capacidad
87 para suministrar agua y aire a las plantas, las químicas determinan la capacidad de
88 suministrar nutrientes y juntas actúan sobre la extensión de las raíces y el volumen de suelo
89 que sirve como reservorio de agua y nutrientes (Ibañez & Botta, 2003). El deterioro de las
90 propiedades físicas del suelo no se visualiza fácilmente desde la superficie (Hamza &
91 Anderson, 2005). La calidad física del suelo usualmente fue estudiada evaluando el
92 contenido de carbono orgánico, la densidad aparente y los parámetros de la curva de

93 retención hídrica (Dexter, 2004; Reynolds et al., 2002). También se pueden utilizar
94 indicadores dinámicos para cuantificar la infiltración y el movimiento del agua en el suelo
95 (Iovino et al., 2016; Reichert et al., 2016). Según Cassel & Nelson (1985) los parámetros
96 físicos más utilizados para determinar la compactación del suelo son la resistencia a la
97 penetración (RR), la densidad aparente y la profundidad de huella, siendo los que más
98 directamente se relacionan con la limitación del crecimiento radical y con una baja aireación.
99 La conductividad hidráulica permite estimar la degradación del suelo (Soracco et al., 2010;
100 Villarreal et al., 2017) debido a que un suelo degradado posee una estructura con menor
101 macroporosidad y conectividad de la porosidad, limitando la entrada, redistribución y
102 contenido del agua del suelo, lo cual se refleja en los valores de conductividad hidráulica.
103 Los parámetros conductividad hidráulica, macro y mesoporosidad conductoras de agua
104 permiten comprender el comportamiento físico del suelo y ayudan a predecir el rendimiento
105 de los cultivos (Strudley et al., 2008). A su vez, el volumen y la continuidad de los poros
106 afectan la infiltración del agua en el suelo (Hillel, 1998). Es importante tener en cuenta la
107 configuración del sistema poroso al momento de predecir el movimiento del agua en el
108 suelo, para ello debe considerarse tanto la cantidad de poros como su conectividad. Las
109 propiedades de la red de macroporos, es decir su volumen y continuidad, tienen un gran
110 impacto en la infiltración del agua en el suelo (Hillel, 1998). Diversos autores demostraron
111 que una mayor macroporosidad no necesariamente aumenta la entrada de agua al suelo
112 (Lozano et al., 2013; Soracco et al., 2011; Soracco et al., 2012; Villarreal et al., 2017). Según
113 Villarreal et al. (2017) la porosidad total, la densidad aparente y la macroporosidad, en
114 general, no son capaces de explicar el efecto de las labranzas en el suelo, presentando
115 valores similares al momento de medirlos. Por ello, recomiendan incluir variables hidráulicas

116 capaces de describir la conectividad del sistema poroso. Lo mencionado anteriormente
117 permite suponer que las variables más utilizadas para analizar el efecto de la compactación
118 (i.e. resistencia a la penetración y densidad aparente) no son capaces de explicar algunos
119 cambios en la calidad física del suelo.

120 La porosidad libre al aire en la zona radical en suelos franco arenosos a franco arcillosos
121 debe ser mayor a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (10%) para no limitar el crecimiento de los cultivos (Reynolds
122 et al., 2009). En cuanto al agua disponible para las plantas, valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$
123 son escasos para el crecimiento y la funcionalidad de la raíz, entre $0,10$ y $0,15 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ limitan
124 el crecimiento y la funcionalidad de la raíz, y por encima de $0,15 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ son valores
125 apropiados. La conductividad hidráulica saturada posee un rango óptimo requerido para el
126 movimiento del agua que va desde $1,8$ hasta 18 cmh^{-1} , por debajo del rango mencionado el
127 movimiento del agua es muy lento (NRCS, 2003 citado por Pulido-Moncada, 2015). Acerca
128 de la densidad aparente, Voorhees (1983) sostiene que valores mayores a $1,5 \text{ Mg.m}^{-3}$
129 producen reducción del crecimiento radical. Es importante destacar que estos valores
130 óptimos dependen del tipo de suelo y cultivo considerado, aunque pueden servir de
131 referencia.

132 La tendencia de la producción agropecuaria fue evolucionando hacia rotaciones cada vez
133 más cortas y a la utilización de máquinas cada vez más pesadas. Esto ocasiona un aumento
134 del peso que debe soportar el suelo y, por ende, disminuye la calidad física del mismo. El
135 efecto es más marcado cuando el contenido de materia orgánica es bajo y el tráfico se
136 efectúa con suelo húmedo (Hamza & Anderson, 2005). Encontrándose una relación inversa
137 entre la humedad del suelo y su capacidad portante (Sanchez-Girón et al., 1998). Por tal
138 motivo, puede compararse la RR entre distintos tratamientos siempre y cuando se garantice

139 una humedad constante (Jorajuría, 2005). Las propiedades físicas son afectadas por la
140 compactación producida por la maquinaria agrícola, disminuyendo el rendimiento de los
141 cultivos (Servadio et al., 2005). La presión de contacto ejercida sobre el suelo es
142 responsable de la compactación superficial mientras que, la compactación subsuperficial,
143 depende del peso total del vehículo, independientemente de la presión que ejerce el
144 neumático (Smith & Dickson, 1990). Botta et al. (2002) indican que debido a la
145 compactación se produce en el suelo una merma del espacio poroso, principalmente de los
146 macroporos. Esto trae aparejado una menor aireación a nivel de las raíces y una mayor
147 impedancia para el desarrollo de éstas. Algunos autores afirman que la compactación del
148 suelo ha sido, durante mucho tiempo, la causante de reducciones en el crecimiento de
149 raíces y en el rendimiento de muchos cultivos (Botta et al., 2004; Jorajuría et al., 1997).
150 Aumentos de la RR en los primeros 20 cm de profundidad son señalados como críticos para
151 el desarrollo radical cuando exceden valores de 2 MPa (Botta et al., 2012). Por otro lado,
152 Threadgill (1982) indica que valores por encima de 1,5 MPa disminuyen el desarrollo radical
153 mientras que desde 2,1 a 2,5 MPa pueden detener su crecimiento. El valor que limita al
154 desarrollo radical está influenciado por la textura del suelo, su macroporosidad y, también,
155 por la especie vegetal (Pabin et al., 1998). Según Ren et al. (2022), la compactación
156 moderada del suelo podría promover la acumulación de agua superficial y el flujo
157 preferencial de la misma.

158 Los sistemas de labranza modifican las propiedades del suelo (Jorajuría, 2001). La SD
159 produce una mayor estabilidad estructural (Alvarez & Steinbach, 2009; Chagas et al., 1995;
160 Lal, 1997; Steinbach & Alvarez, 2007), aumenta la densidad aparente y disminuye la
161 porosidad total en los primeros centímetros del suelo, en comparación con suelos labrados

162 (Alvarez & Steinbach, 2009; Steinbach & Alvarez 2007; Strudley et al., 2008). En cuanto a
163 la macroporosidad, algunos autores encontraron valores más altos en SD, en comparación
164 con los encontrados en LC (Coquet et al., 2005; Moret & Arrúe, 2007), mientras que otros
165 encontraron valores menores bajo SD que bajo LC (Sasal et al., 2006; Soracco et al., 2018;
166 Villarreal et al., 2017). Algunos autores demostraron que la macroporosidad generada con
167 la labranza no persiste hasta la cosecha del cultivo en suelos franco limosos (Alvarez et al.,
168 2009; Soracco et al., 2010). Según Soracco et al. (2018) la labranza aumenta la
169 macroporosidad efectiva en comparación con suelos bajo SD, pero este efecto no se
170 mantiene hasta el final de la cosecha. Los valores de conductividad hidráulica disminuyen
171 bajo SD en comparación con suelos labrados (Alvarez et al., 2009; Lozano et al., 2016;
172 Sasal et al., 2006,). Un comportamiento con similar tendencia fue encontrado, por diferentes
173 autores, para la tasa de infiltración en suelos limosos (Alvarez et al., 2009; Lozano et al.,
174 2014; Sasal et al., 2006; Soracco et al., 2010). Wahl et al. (2004) mencionan que, en la
175 mayoría de los casos, los suelos bajo labranzas reducidas presentan mayor cantidad de
176 macroporos, con una mejor conectividad vertical en comparación con suelos bajo LC. Estos
177 autores se lo atribuyen a una mayor abundancia de lombrices y al menor disturbio de los
178 primeros centímetros del suelo bajo este sistema de manejo.

179 La labranza produce reducción en la resistencia mecánica del suelo, pero el tráfico vuelve
180 a compactarlo hasta valores similares a los iniciales (Yavuzcan et al., 2002). Según
181 Håkansson et al. (1988) el tráfico sobre un suelo labrado produce una sobrecompactación
182 en comparación con un suelo no labrado. Esto se debe a que la labranza destruye la
183 estructura del suelo. Dichos autores afirman que la densidad aparente y la profundidad de
184 la huella aumenta considerablemente luego de la primera pasada del rodado. Las siguientes

185 pasadas producen efectos de menor magnitud. En el cultivo de soja (*Glicine max* L.)
186 sembrada bajo SD se reportó que a medida que aumenta el número de pasadas de la
187 maquinaria, mayores son los incrementos de densidad aparente y resistencia a la
188 penetración en todo el perfil del suelo. Por ello, al aumentar el número de pasadas menores
189 son los rendimientos del cultivo (Botta et al., 2004).

190 Numerosos estudios relacionan el impacto de la compactación inducida por el tráfico y los
191 diferentes sistemas productivos (Botta et al., 2009; Botta et al., 2012; Tolon-Becerra et al.,
192 2011). En un estudio realizado por Draghi et al. (2015), en la Chacra Experimental Integrada
193 Chascomús (INTA-MAA), se encontró que la magnitud de la compactación inducida por el
194 tráfico de la maquinaria agrícola es inferior en sistemas de labranza bajo SD en
195 comparación con sistemas de LC. También se reportó que la máxima compactación en
196 sistemas de SD se da con mayor contenido de humedad que en LC (alrededor de 22 y 30
197 %, respectivamente). Otros estudios indican que luego de la cosecha del cultivo, se obtiene
198 la mayor compactación en el centro de la huella de la cosechadora, al comparar con la zona
199 libre de huellas (Hidalgo et al., 2010; Richmond & Rillo, 2006). Estos autores encontraron
200 valores de densificación superiores a los críticos (por encima de 1,5 Mg.m⁻³ y 2 MPa para
201 densidad aparente y resistencia a la penetración, respectivamente) entre los 15 y 25 cm de
202 profundidad, en los lugares donde había huella de la cosechadora.

203 Considerando la importancia que poseen los diferentes parámetros que determinan la
204 calidad física del suelo, en cuanto al crecimiento y desarrollo del cultivo, es importante
205 conocer en qué momento del ciclo del cultivo se produce el mayor deterioro de dicha
206 calidad, ya que los efectos sobre el rendimiento no serán los mismos si se deteriora el suelo
207 al principio del ciclo o al final del mismo. Por otro lado, también es importante conocer como

208 es el efecto de los eventos de tráfico en distintos sistemas de labranza, y si el efecto
209 negativo se da sobre el volumen de poros o sobre la dinámica hídrica, teniendo esto
210 diferentes implicancias para los cultivos.

211 **3 HIPÓTESIS**

- 212 1. Las propiedades del sistema poroso y las propiedades hidráulicas del suelo sufren
213 variaciones temporales, desde la siembra hasta la cosecha del cultivo, tanto en un
214 sistema con labranza como en siembra directa. Las variaciones temporales son
215 mayores en el sistema con labranza.
- 216 2. Tanto en sistemas de labranza como en siembra directa, el tráfico agrícola modifica
217 el sistema poroso y las propiedades hidráulicas del suelo, disminuyendo la calidad
218 física del mismo. Las mayores modificaciones se dan en los sistemas con labranza.
- 219 3. La cosecha es la operación que tiene el mayor efecto negativo sobre la calidad física
220 del suelo.
- 221 4. Existen indicadores de calidad física del suelo, que son más aptos que la densidad
222 aparente y la resistencia a la penetración para detectar efectos del tráfico.

223 **4 OBJETIVOS**

- 224 1. Determinar propiedades del sistema poroso y propiedades hidráulicas del suelo en
225 diferentes momentos del ciclo del cultivo, comparando un sistema de labranza con
226 el sistema de siembra directa.
- 227 2. Evaluar el efecto del tráfico agrícola sobre el suelo, a través de indicadores de
228 calidad física en dos sistemas de labranza.
- 229 3. Analizar la capacidad de los parámetros resistencia a la penetración y densidad
230 aparente, en comparación con infiltración y movimiento del agua en el suelo, para
231 predecir cambios en la calidad física de suelos.

232 **5 MATERIALES Y MÉTODOS**

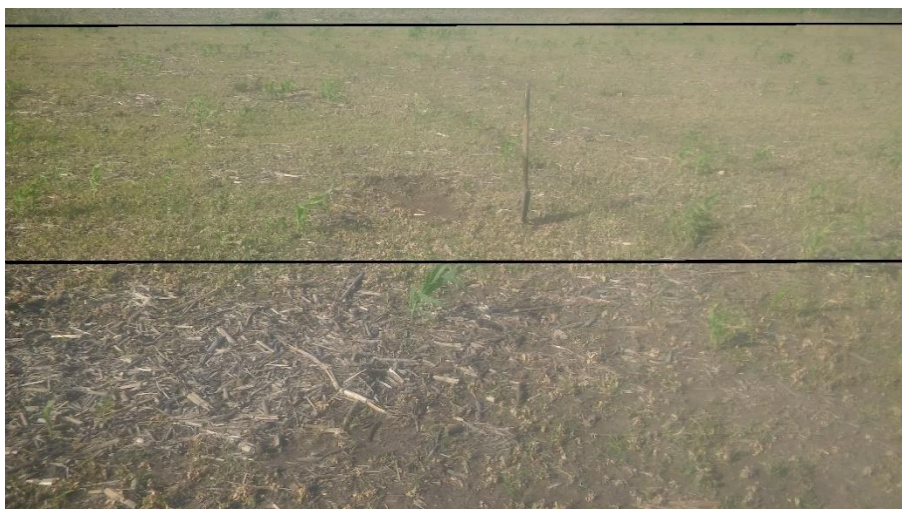
233 **5.1 Descripción general del experimento, tratamientos y condiciones**
234 **climáticas.**

235 Las mediciones fueron realizadas en la Chacra Experimental Integrada Chascomús (MDA-
236 INTA) (Ministerio de Desarrollo Agrario PBA-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria)
237 ubicada en la localidad de Chascomús, Buenos Aires, Argentina (35° 44' 37.61" latitud Sur,
238 58° 3' 10.22" longitud Oeste). El clima es templado, con precipitación anual promedio de
239 946 mm. El suelo es un Argiudol abruptico, fino, illitico, térmico con un horizonte superficial
240 A, de textura franca (25 % de arcilla, 41,5 % de limo y 33,5 % de arena) (Soil Survey Staff,
241 2006).

242 Las mediciones y muestreos se realizaron en un ensayo, que comenzó en el año 2000, en
243 el cual se evalúan parcelas adyacentes de labranza convencional (LC) y siembra directa
244 (SD).

245 Se trata de un diseño experimental en bloques completos al azar con dos tratamientos (LC
246 y SD) y tres repeticiones. La LC consistió en una pasada con rastra de discos (0,2 m de
247 profundidad). Posteriormente, se realizó un refinado con dos pasadas de rastra de dientes.

248 Los cultivos han sido principalmente maíz, eventualmente soja, y en invierno se sembró,
249 algunos años, trébol como cultivo de cobertura. En los últimos 4 años previos al muestreo
250 se sembró maíz. El ensayo consta de parcelas adyacentes de 30 m de ancho por 50 m de
251 largo por tratamiento, ubicados en la misma posición del paisaje (Figura 1). Se realizó el
252 seguimiento de un cultivo de soja (Roundup ready) de primera entre los meses de
253 noviembre de 2019 y julio de 2020. En la tabla 1 se detallan las labores realizadas en dicho
254 periodo.



Parcela de labranza convencional

Parcela de siembra directa

255

256 Figura 1: Parcelas del ensayo.

257 Tabla 1: Labores realizadas durante el periodo de estudio.

Fecha	Labor*	Observaciones
20/9/2019	Pulverización (LC y SD)	Pulverizador de arrastre de 2000 l y 18 m de botalón. 2,5 l.ha ⁻¹ de Glifosato full + 0,6 l.ha ⁻¹ de 2,4D + 0,2 l.ha ⁻¹ de Lontrel.
22/10/2019	Labranza (LC)	Tractor Deutz con tracción asistida de 104,40 KW (rodado trasero 18,4-34), rastra de discos de 40 platos de 70 kg cada uno. Dos pasadas de rastra de dientes.
27/11/2019	Siembra (LC y SD)	Sembradora Bertini 10000. Enganchada a un tractor Deutz con tracción asistida de 104,40 KW (rodado trasero 18,4-34).

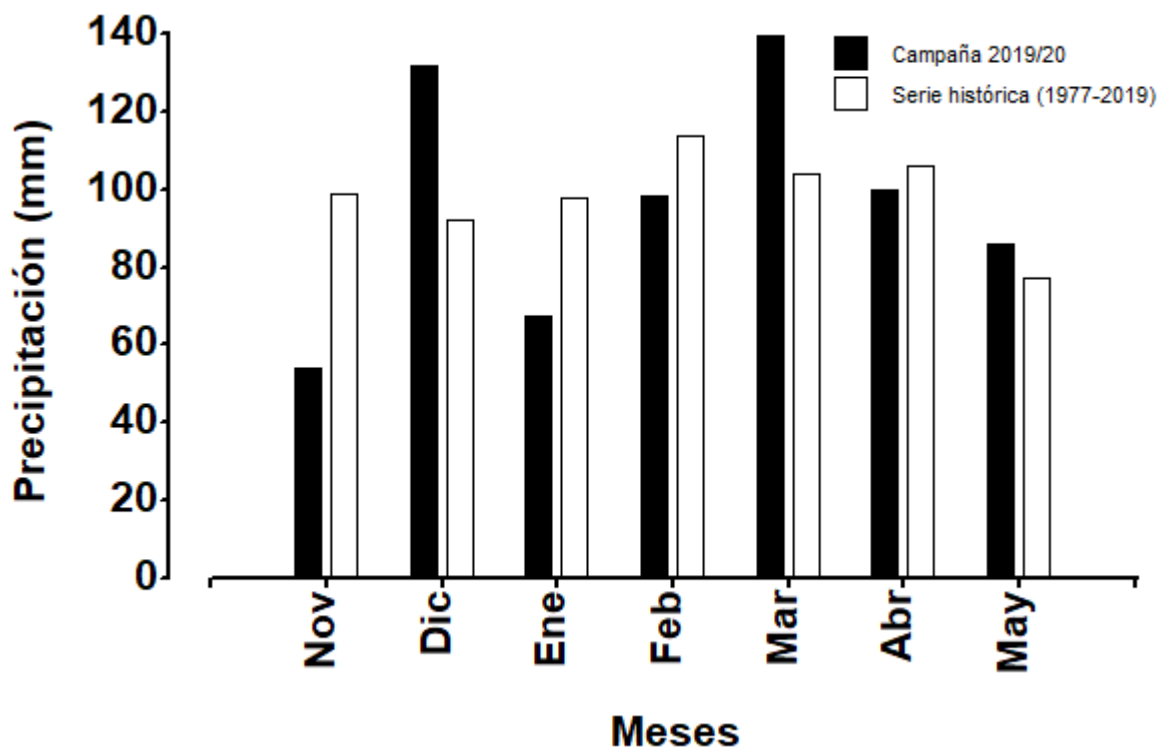
		73 kg.ha ⁻¹ de soja + 77 kg.ha ⁻¹ de fosfato monoamónico.
4/01/2020	Pulverización (LC y SD)	Pulverizador de arrastre de 2000 l y 18 m de botalón. 1,5 kg.ha ⁻¹ Roundup® Ultramax.
5/03/2020	Pulverización (LC y SD)	Pulverizador de arrastre de 2000 l y 18 m de botalón. Insecticida contra araña.
14/05/2020	Cosecha (LC y SD)	Vassalli 1500 (rodado delantero 24,5-32, rodado trasero 13,6-24).

258 *Entre paréntesis se indica sobre que tratamiento se realizó cada labor, labranza
259 convencional (LC) o siembra directa (SD).

260 Se consideraron tres momentos diferentes, a lo largo del ciclo del cultivo, para realizar las
261 mediciones. En primer lugar, previo a la siembra (Pre-S), el día 21 de noviembre de 2019.
262 En segundo lugar, luego de la siembra (Post-S), el día 6 de diciembre de 2019. Y, por último,
263 luego de la cosecha (Post-C), el día 26 de mayo de 2020. Se realizaron mediciones en
264 diferentes condiciones de tráfico en cada parcela. Por un lado, se midió en lugares donde
265 haya huella de la última labor realizada (CH) (en Post-S se consideró la huella del rodado
266 trasero del tractor que llevaba la sembradora, en Post-C se consideró la huella del rodado
267 delantero de la cosechadora) y, por otro lado, en lugares donde no haya pisado ningún
268 neumático de la última labor realizada (SH). Una vez alcanzada la madurez fisiológica del
269 cultivo se determinó el rendimiento obtenido, mediante la cosecha manual de 20 metros
270 lineales de la parte central de cada parcela, la humedad de cosecha fue determinada
271 mediante el uso de un humidímetro al momento de la cosecha.

272 Las condiciones climáticas de precipitación y temperatura se muestran en las figuras 2 y 3.

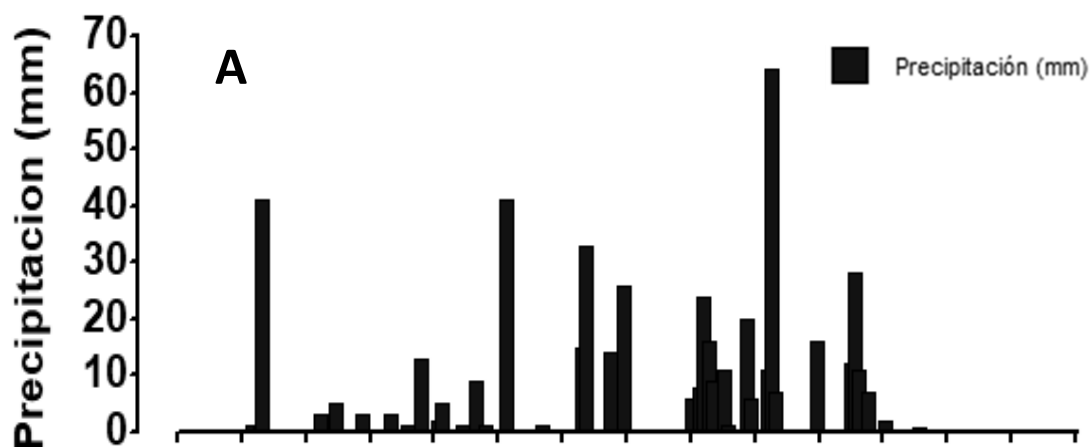
273

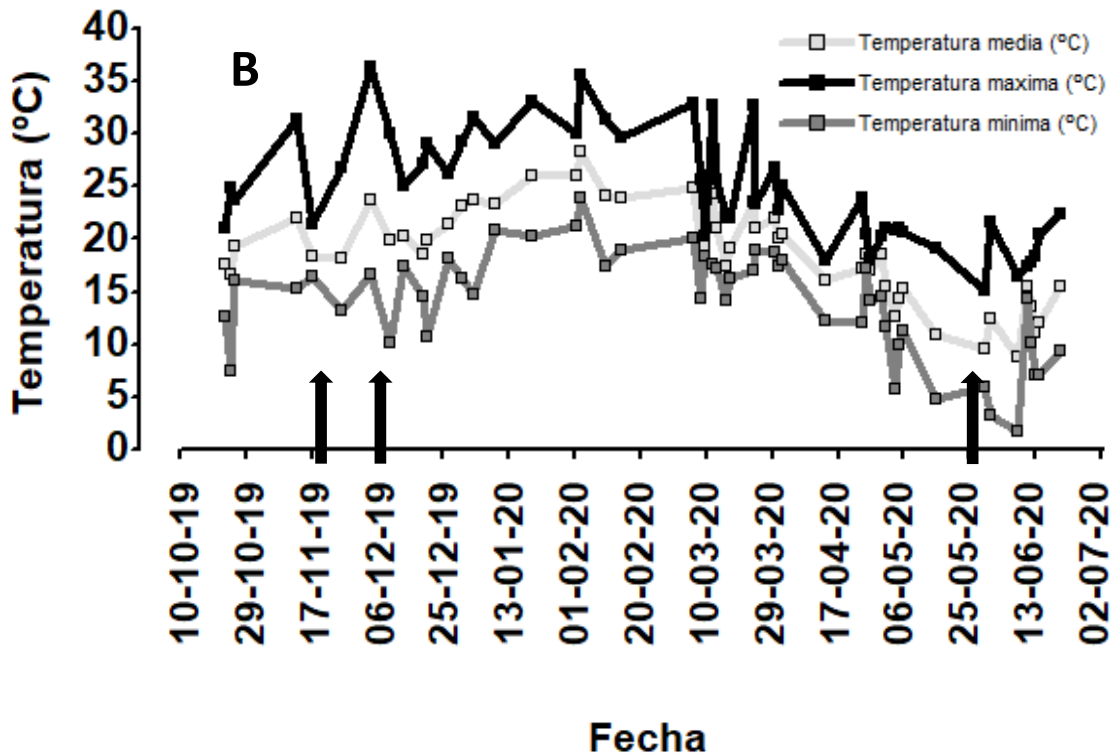


274

275 Figura 2: Precipitaciones ocurridas durante los meses de noviembre y mayo de la campaña
276 2019/2020 y de la serie histórica del período 1977/2019, en Chascomús. Fuente:
277 elaboración propia con datos de INTA EAR Chascomús y <http://sig.inta.gob.ar/#/>.

278





279

280 Figura 3: Precipitaciones (A) y temperatura mínima, media y máxima (B) durante el ciclo del
 281 cultivo de soja de la campaña 2019/2020, en Chascomús. Las flechas indican los momentos
 282 en los cuales se realizaron las mediciones. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos
 283 de <http://siga.inta.gob.ar/#/>.

284 **5.2 Parámetros físicos e hidráulicos del suelo**

285 Se midieron diferentes parámetros físicos e hidráulicos del suelo, en cada tratamiento,
 286 durante los momentos mencionados previamente. Dichos parámetros son los siguientes:

287 *5.2.1 Indicadores estáticos de calidad física de suelo. Densidad aparente, porosidad*
 288 *total y distribución de tamaño de poros*

289 Para determinar densidad aparente (DAP, Mg.m⁻³), porosidad total (PT) y distribución de
 290 tamaño de poros se realizaron cinco repeticiones, por momento de muestreo, para cada
 291 tratamiento y condición de tráfico. La densidad aparente se determinó extrayendo muestras
 292 de suelo, en los primeros 10 cm de profundidad del perfil, con cilindros de acero inoxidable

293 de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura (volumen, 98 cm³) (Figura 4). Dicha DAP fue calculada
294 a través del cociente entre la masa seca de suelo obtenida dentro del cilindro y el volumen
295 del cilindro (Hillel, 1998):

$$DAP = \frac{m}{V_t} \quad (1)$$

296 Donde m es la masa seca en estufa a 105°C durante 48 horas y V_t es el volumen de la
297 muestra.



298

299 Figura 4: Cilindros metálicos utilizados para determinar la densidad aparente.

300 Con el valor de DAP se calculó la porosidad total, a través de la relación entre la DAP y la
301 densidad real del suelo (D_{real}), este último valor es de 2,34 Mg.m⁻³ para el suelo del sitio
302 del ensayo, determinado según picnometría (Villarreal et al., 2017):

$$PT = 1 - \left(\frac{DAP}{D_{real}} \right) \quad (2)$$

Para determinar la distribución de tamaño de poros se midió la curva de retención
hídrica en mesa de tensión para valores de altura de presión de agua (h) (entre 0 y

1 m) y en olla de presión (entre 3 m y 1500 m). Los datos se ajustaron a la ecuación de van Genuchten (1980):

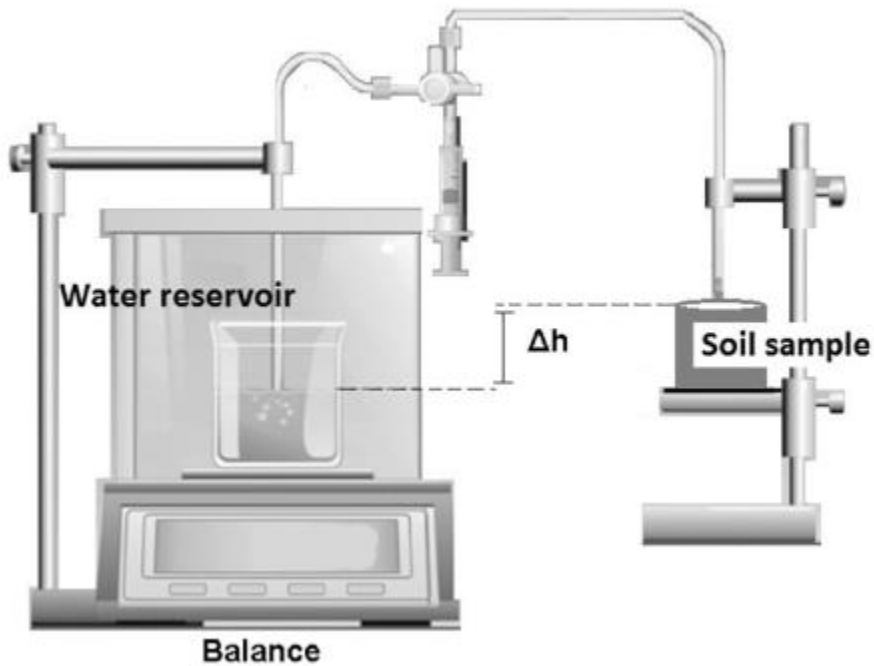
$$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (3)$$

Donde θ_r y θ_s representan el contenido de agua residual y saturado, respectivamente [L^3L^{-3}], y α [L^{-1}], n , y m ($= 1 - 1/n$) son parámetros empíricos (parámetros de VG). Los datos obtenidos se ajustaron utilizando el código RETC (van Genuchten et al., 1991). A partir de los datos de retención hídrica se calcularon la fracción correspondiente a la macroporosidad (θ_{ma} , diámetro > 60 mm), mesoporosidad (θ_{me} , 30 mm < diámetro < 60 mm) y microporosidad (θ_{mi} , diámetro < 30 mm) como la relación entre la masa de agua retenida en esos poros y el volumen de la muestra.

303 *5.2.2 Indicadores dinámicos de calidad física de suelo. Conductividad hidráulica,*
304 *porosidad efectiva e índice de conectividad*

305 Se determinó la infiltración a campo utilizando el infiltrómetro de disco a tensión (Perroux &
306 White, 1988). Este método fue utilizado realizando cuatro repeticiones, para cada
307 tratamiento, sólo en los momentos de Pre-S y Post-S, no se realizó en Post-C debido a que
308 no se pudo acceder con los infiltrómetros de disco al sitio del ensayo por la cuarentena
309 obligatoria durante la pandemia por covid-19. Para obtener valores de conductividad
310 hidráulica de todos los momentos de muestreo para cada tratamiento, se determinó la
311 infiltración mediante un mini-infiltrómetro (Soracco et al., 2019). Ambos métodos fueron
312 utilizados para determinar la infiltración bajo diferentes tensiones en muestras de suelo sin
313 disturbar. En el caso del método mediante el mini-infiltrómetro se extrajeron muestras con
314 cilindros de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura (volumen, 98 cm³). El dispositivo consta de
315 un tubo con un disco de 1 cm de radio, con una membrana del mismo material que el

316 infiltrómetro de disco de tensión comercial (Perroux y White, 1988) unida a su base. Este
317 tubo estaba conectado a un depósito de agua colocado en una balanza analítica ($\pm 0,001$
318 g), conectada a una computadora (Figura 5). Cada muestra de suelo se puso en contacto
319 directamente con el disco de tensión. Se realizaron mediciones de infiltración a - 6 cm, - 3
320 cm y 0 cm de altura de presión de agua, aplicada en este orden y en la misma muestra.
321 Cada determinación, en cada tensión, tomó aproximadamente 5 minutos para alcanzar el
322 estado estacionario y la masa de agua que infiltraba el suelo se registró como la variación
323 de masa en la balanza analítica a cada segundo. La infiltración acumulada se determinó
324 como la relación entre el volumen de infiltración y la superficie del disco. La temperatura
325 durante los experimentos osciló entre 20 y 24 °C. En los ensayos de infiltración a campo
326 tomó aproximadamente 1 hora para alcanzar el estado estacionario a cada tensión. La
327 conductividad hidráulica ($K, \text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$), en las diferentes tensiones, se determinó a partir de
328 los valores de infiltración acumulada de agua mediante el método de cargas múltiples
329 (Ankeny et al., 1991).



330

331 Figura 5: Configuración experimental del dispositivo para medir infiltración en laboratorio
 332 (extraído de Soracco et al., 2019).

333 El método de Ankeny es el procedimiento para analizar los datos del infiltrómetro basado
 334 en la solución analítica de Wooding (1968), para infiltración no confinada desde un disco
 335 en el estado estacionario, dada por:

$$Q = \pi R^2 K + 4R\Phi \quad (4)$$

336 donde Q es la tasa de infiltración por unidad de área en el estado estacionario [L^3T^{-1}], R es
 337 el radio del disco [L], K es la conductividad hidráulica [LT^{-1}], y ϕ es el potencial de flujo
 338 mátrico [L^2T^{-1}] (Gardner et al., 1958) para la superficie de infiltración con condición de
 339 contorno superior igual a potencial de agua del suelo cero:

$$\Phi(0) = \int_{h_1}^0 K(h)dh \quad (5)$$

340 Donde h_1 [L] es el potencial agua del suelo de referencia.

341 La ecuación 5 se puede reescribir para una condición de contorno de infiltración, h , general,
342 donde:

$$\Phi(h) = \int_{h_1}^h K(h)dh \quad (6)$$

343 Si se ajusta la ecuación 4 para mostrar la dependencia de K y de ϕ con el potencial de
344 contorno en la superficie, h , resulta en un flujo Q que es dependiente del potencial de
345 contorno en la superficie. En este estudio se usó la aproximación de Ankeny et al. (1991),
346 que requiere el conocimiento de las tasas de flujo en estado estacionario $Q(h_1)$ y $Q(h_2)$, a
347 dos tensiones, h_1 y h_2 , obtenidas con el mismo infiltrómetro. La medición de los flujos $Q(h_1)$
348 y $Q(h_2)$ a dos potenciales (h_1 y h_2) resulta en las siguientes dos ecuaciones con cuatro
349 incógnitas:

$$Q(h_1) = \pi R^2 K(h_1) + 4R\phi(h_1) \quad (7)$$

$$Q(h_2) = \pi R^2 K(h_2) + 4R\phi(h_2) \quad (8)$$

350 Se puede obtener una tercera ecuación asumiendo una relación $K(h)/\phi(h)$ constante en el
351 rango de presión que va de h_1 a h_2 (Ankeny et al., 1991):

$$A = \frac{K(h)}{\Phi(h)} = \text{constante}[L^{-1}] \quad (9)$$

352 Entonces las ecuaciones 7 y 8 pueden escribirse como:

$$Q(h_1) = \left[\pi R^2 + \frac{4R}{A} \right] K(h_1) \quad (10)$$

$$Q(h_2) = \left[\pi R^2 + \frac{4R}{A} \right] K(h_2) \quad (11)$$

353 Las ecuaciones 10 y 11 contienen ahora solo 3 incógnitas. Analizando la figura 6 (adaptada
354 de Elrick et al., 1988, en Ankeny et al., 1991) se puede llegar a una aproximación numérica

355 para una solución. En la figura 6 $\Phi(h_1)$ es toda el área rayada bajo la curva, y $\Phi(h_2)$ es el
356 área doblemente rayada. La diferencia entre $\Phi(h_1)$ y $\Phi(h_2)$ es aproximadamente:

$$\Phi(h_1) - \Phi(h_2) = \frac{\Delta h [K(h_1) + K(h_2)]}{2} \quad (12)$$

357 Donde $\Delta h = h_2 - h_1$. Sustituyendo la ecuación 9 en la ecuación 12 da:

$$\frac{[K(h_1) - K(h_2)]}{A} = \frac{\Delta h [K(h_1) + K(h_2)]}{2} \quad (13)$$

358 Entonces, las ecuaciones 10, 11 y 13 con tres incógnitas ($K(h_1)$, $K(h_2)$ y A) pueden
359 resolverse simultáneamente obteniéndose las conductividades hidráulicas para pares de
360 tasas de infiltración no confinadas tomadas a diferentes tensiones. En nuestro caso se
361 resolvieron las tres ecuaciones usando tensiones de 0 y 3, y de 3 y 6 cm. Un par de tasas
362 resulta en estimaciones de $K(h)$ para cada tensión involucrada y de un valor de la constante
363 A . A partir de dos pares de tasas, obtenemos dos estimaciones de la constante A , y cuatro
364 estimaciones de conductividades hidráulicas. Definimos como la mejor estimación de $K(h)$
365 al promedio aritmético de las estimaciones disponibles, donde $K(h_1)$ es la conductividad
366 hidráulica a la tensión h_1 calculada a partir del par de tasas (h_1, h_2). Las siguientes
367 ecuaciones muestran específicamente como se estimaron $K(0)$, $K(3)$ y $K(6)$:

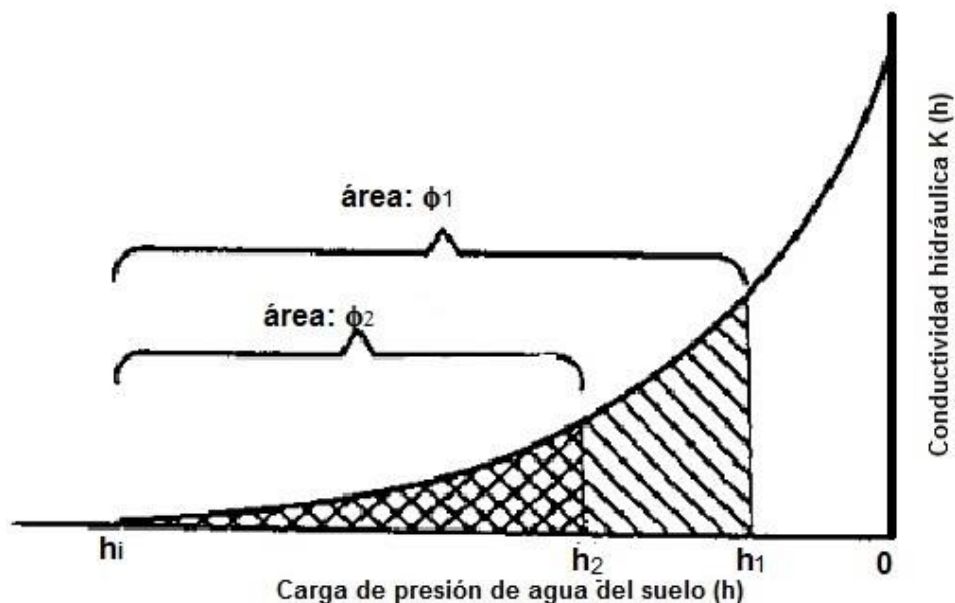
$$K(0) = K(0)_{(0,3)} \quad (14)$$

$$K(3) = \frac{[K(3)_{(0,3)} + K(3)_{(3,6)}]}{2} \quad (15)$$

$$K(6) = K(6)_{(3,6)} \quad (16)$$

368 Hay dos aproximaciones posibles para obtener K de esta forma. Una es calcular un solo
369 valor de A a través de todo el rango de presión. Esta aproximación asume una relación
370 exponencial entre K y h en todo el rango de presión y resulta en una sola ecuación para el

371 cálculo, lo cual simplifica la obtención de los valores de K. Sin embargo, en esta tesis se
 372 opta por una aproximación por partes, ya que no siempre A permanece constante en suelos
 373 estructurados a medida que la carga de presión decrece (Lozano, 2014).



374

375 Figura 6. Relación entre la conductividad hidráulica (K) y la carga de presión del agua del
 376 suelo (h). Adaptado de Ankeny et al. (1991).

377 La porosidad efectiva se determinó partiendo de la ecuación de ascenso capilar, la cual
 378 permite calcular el radio de poro máximo lleno de agua, r [L], en función de h [L]:

$$r = \frac{2\sigma \cos(\alpha)}{\rho gh} \quad (17)$$

379 Donde σ es la tensión superficial del agua [MT^{-2}], α es el ángulo de contacto entre el agua
 380 y la pared del poro (se asume igual a cero), ρ es la densidad del agua [ML^{-3}], y g es la
 381 aceleración debida a la gravedad [LT^{-2}]. Se asume que los poros con radio equivalente
 382 menor al calculado con la ecuación 17 están llenos de agua y son los únicos responsables

383 de todo el flujo bajo un gradiente de presión. De acuerdo con la ley de Poiseuille, la tasa de
384 flujo a través de un poro está dada por:

$$Q_i = \frac{\pi r^4 \rho g \Delta L}{8 \eta \Delta Z} \quad (18)$$

385 Donde $Q_i(r)$ es la tasa de flujo [$L^3 T^{-1}$] como función del radio de poro r [L], y η es la viscosidad
386 del agua [$ML^{-1} T^{-1}$]. $\Delta L/\Delta z$ se considera igual a 1 debido a que se asume el estado
387 estacionario donde el gradiente es unitario. La tasa de flujo total a través de poros con radio
388 r (r como función de h) ($Q_t(r)$) para un área transversal de suelo A [L^2] es:

$$Q_t(r) = K(h)A \quad (19)$$

389 y,

$$Q_t(r) = n(r)Q_i(r) \quad (20)$$

390 donde $n(r)$ es el número de poros efectivos para un tamaño de poro r dado, responsables
391 de $Q_t(r)$. La sustitución de las ecuaciones 18 y 19, dentro de la ecuación 20 resulta en:

$$K(h)A = \frac{n(r)(\pi r^4 \rho g)}{8 \eta} \quad (21)$$

392 Considerando $N(r)$, el número de poros efectivos por unidad de área transversal [L^2], para
393 un tamaño de poro r dado por:

$$N(r) = \frac{n(r)}{A} \quad (22)$$

394 resulta en:

$$N(r) = \frac{8 \eta K(h)}{\pi r^4 \rho g} \quad (23)$$

395 La porosidad efectiva $\varepsilon(r)$ asociada con cada tamaño de poro es igual al número de poros
396 efectivos por unidad de área multiplicado por el área transversal de un poro de ese tamaño:

$$\varepsilon(r) = N(r)\pi r^2 \quad (24)$$

397 El número de poros efectivos por unidad de área, ΔN , entre los radios a y b ($a \leq b$)
 398 (asumiendo radios de poro igual al mínimo radio de poro en el rango), se define como la
 399 diferencia del flujo total de agua o conductividad hidráulica ΔK (a, b) entre dos cargas de
 400 presión correspondientes a los radios de poros, (Watson y Luxmoore, 1986):

$$\Delta N(a, b) = \frac{8\eta\Delta K(a, b)}{\pi\rho g a^4} \quad (25)$$

401 Entonces, la porosidad efectiva debida a poros en este rango, $\varepsilon(a, b)$, puede ser calculada
 402 como:

$$\varepsilon(a, b) = \Delta N(a, b)\pi a^2 = \frac{8\eta\Delta K(a, b)}{\rho g a^2} \quad (26)$$

403 Como a es el radio equivalente de poro menor en el rango, $\varepsilon(a, b)$ es una estimación de la
 404 porosidad efectiva máxima, ya que (a) aparece en el denominador de la ecuación 26. En la
 405 ecuación 26 se asume implícitamente un gradiente hidráulico unitario, y estado estacionario
 406 (Wahl et al., 2004).

407 Definimos macroporosidad efectiva (ε_{ma}) como aquellos poros que drenan a tensiones
 408 mayores a 3 cm ($r > 0.5$ mm), y mesoporosidad efectiva (ε_{me}) como aquellos poros que
 409 drenan a tensiones entre 3 y 6 cm ($0.5 \text{ mm} > r > 0.25$ mm) (Watson & Luxmoore, 1986;
 410 Lozano, 2014).

411 Se determinó el índice de conectividad de poros (C_w) de la porosidad total según Lozano
 412 et al. (2013), mediante la relación entre la conductividad hidráulica saturada y la porosidad
 413 total.

$$C_w = \frac{K_0}{PT} \quad (27)$$

414 5.2.3 *Humedad de suelo y resistencia a la penetración*

415 La humedad del suelo fue determinada extrayendo muestras de suelo a diferentes
416 profundidades, en estratos de 10 cm, hasta los 30 cm para los momentos evaluados. El
417 contenido de agua del suelo fue calculado mediante el método tradicional por medio del
418 secado de cada muestra de suelo en horno de secado con circulación de aire y temperatura
419 regulable capaz de mantenerse en 110 ± 5 °C. Donde la humedad es la relación expresada
420 en porcentaje entre la masa de agua existente en una determinada masa de suelo y la masa
421 de las partículas sólidas:

$$H = \left(\frac{mh}{ms} \right) * 100 \quad (28)$$

422 donde H es el contenido de humedad del suelo [%], mh es la masa de agua contenida en
423 el suelo [g] y ms es la masa del suelo seco [g].

424 La resistencia a la penetración (RR) fue medida con un penetrómetro FieldScout SC 900
425 con grabación de datos (Figura 7). El cono cumple con las medidas según el estándar de
426 ASAE S 313. Se realizaron 30 repeticiones por momento de muestreo, para cada
427 tratamiento y situación de huella o no huella. Cada medición fue realizada hasta los 40 cm
428 de profundidad, con intervalos de 2,5 cm.



429

430 Figura 7: FieldScout SC 900 utilizado para medir resistencia a la penetración.

431 **5.3 Análisis estadístico**

432 Para determinar los efectos de los factores sistema de labranza (SD y LC), tráfico (SH y
433 CH) y momento de muestreo (Pre-S, Post-S y Post-C) sobre las variables estudiadas se
434 realizaron ANOVAs factoriales. Se tuvo en cuenta la interacción entre factores. Cuando
435 hubo efectos significativos de algunos de los factores, o sus interacciones, se utilizó el test
436 LSD para comparar las medias (Sokal & Rohlf, 1995). Como la distribución de K no es
437 normal, se utilizaron los logaritmos. En todos los casos se mostraron las medias aritméticas.
438 La comparación de medias se realizó con el test LSD Fisher ($p=0,05$). Se utilizó el software
439 estadístico InfoStat.

440 **6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

441 **6.1 Indicadores estáticos de calidad física de suelo. Densidad aparente,** 442 **porosidad total y distribución de tamaño de poros.**

443 Los valores medios de DAP y PT para cada momento de muestreo, sistema de labranza y
444 condición de tráfico se muestran en la tabla 2. En ambos parámetros se encontró interacción
445 significativa entre los tres factores, momento*labranza*tráfico. Se hizo un nuevo ANOVA
446 unifactorial, donde el nuevo factor fue la combinación de los tres factores mencionados,
447 encontrándose efecto significativo del mismo. Se hizo un test de medias LSD Fisher. Los
448 menores valores de DAP se encontraron en Pre-S y Post-S del cultivo bajo LC y en la
449 condición de tráfico de SH. Aumentó a sus valores máximos en la Post-C, intensificándose
450 cuando se midió en la huella y más aún cuando se utilizó la tecnología de SD, llegando a
451 un valor de $1,47 \text{ Mg.m}^{-3}$ (30 % más que el valor mínimo medido), el cual se acerca a los $1,5$
452 Mg.m^{-3} citados por Voorhees, (1983) como límite máximo a partir del cual se reduce el
453 crecimiento radical. La PT tuvo una variación entre su valor máximo y mínimo de alrededor
454 del 29 %. Los mayores valores de DAP y menores de PT, dentro de cada momento de
455 muestreo, se midieron cuando se realizó SD en comparación con LC. Esto está en
456 concordancia con lo encontrado por Alvarez & Steinbach (2009), Lozano (2014), Steinbach
457 & Alvarez (2007) y Strudley et al. (2008). Las mayores variaciones de estos parámetros se
458 dieron en LC, tal como indican Alvarez & Steinbach (2009), Chagas et al. (1995), Lal (1997)
459 y Steinbach & Alvarez (2007). Los resultados obtenidos también indican que la labranza
460 destruye la estructura del suelo y que la primera pasada de un neumático agrícola produce
461 mayor densificación en el suelo bajo LC, en comparación con la SD, tal como fue reportado
462 por Håkansson et al. (1988). También se observó que la mayor densificación se obtuvo

463 donde hubo pisada de la huella de la cosechadora, al igual que lo encontrado en ensayos
 464 previos (Hidalgo et al., 2010; Richmond & Rillo, 2006). Explicado por la presión ejercido
 465 mediante el peso de la cosechadora sobre la superficie del suelo y el contenido de humedad
 466 que se observó en Post-C (Tabla 8), debido a las precipitaciones ocurridas días previos a
 467 la cosecha (Figura 3).

468 Tabla 2: Valores medios de densidad aparente (DAP) y porosidad total (PT) para diferentes
 469 momentos de medición (previo a la siembra, Pre-S; luego de la siembra, Post-S y luego de
 470 la cosecha, Post-C), sistemas de labranza (siembra directa, SD y labranza convencional,
 471 LC) y condición de tráfico (donde haya tráfico de la última labor realizada, CH y donde no
 472 haya pisado ningún neumático de la última labor realizada, SH) sobre un cultivo de soja
 473 sembrado en Chascomús.

Momento	Labranza	Tráfico	DAP (Mg.m⁻³)	PT (m³.m⁻³)
Pre-S	SD	SH	1,25bc	0,53de
	LC	SH	1,13a	0,57f
Post-S	SD	CH	1,22b	0,54e
		SH	1,25bc	0,53de
	LC	CH	1,24b	0,53e
Post-C	SD	SH	1,13a	0,57f
		CH	1,47f	0,44a
	LC	SH	1,30cd	0,51cd
		CH	1,41ef	0,47ab
		SH	1,35de	0,49bc

474 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 475 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).

476 La tabla 3 muestra los resultados de macroporosidad, mesoporosidad y microporosidad
 477 obtenidos en mesa de tensión, para cada momento de muestreo, sistema de labranza y
 478 condición de tráfico. La macroporosidad tuvo interacción estadísticamente significativa
 479 momentos*labranza*tráfico. A lo largo del ciclo del cultivo estudiado, la LC tuvo mayores
 480 valores de macroporosidad que la SD incluso después de la cosecha en el suelo SH. Sin
 481 embargo, cuando se estudia el efecto del tráfico, luego de la siembra, la macroporosidad
 482 en LC fue un 50% superior en SH al compararlo con CH (0,16 y 0,08 m³.m⁻³,

483 respectivamente). La mayor macroporosidad inicial se pierde rápidamente, mientras que en
484 SD sólo se reduce después de la cosecha.

485 Los menores valores se obtuvieron en Post-C y CH, independientemente del sistema de
486 labranza utilizado, lo cual indica que la pisada de la cosechadora produce un efecto
487 considerable en la disminución de la macroporosidad del suelo. Los valores más elevados
488 se obtuvieron en Pre-S LC y en Post-S LC SH, debido al laboreo del suelo sin pisada
489 posterior de un neumático. Estos resultados muestran que la LC, en comparación con SD,
490 aumenta la macroporosidad al igual que lo encontrado por Sasal et al. (2006); Soracco et
491 al. (2018) y Villarreal et al. (2017). También indican que el tráfico produce una merma del
492 espacio poroso (Botta et al 2002). En Post-C SD CH se encontraron los valores más bajos
493 de macroporosidad y de PT, mostrando que el suelo bajo este sistema de labranza es
494 susceptible a ser compactado. Debido a la falta de labranza, sumado a su textura limosa,
495 sin procesos de congelamiento ni arcillas expansibles, es fundamental prestar atención a
496 las condiciones en las cuales se realizan las labores agrícolas, sobre todo a la presión
497 ejercida mediante los neumáticos sobre el suelo y a la humedad del mismo.

498 Los valores de mesoporosidad no mostraron efecto del tráfico, pero sí de la interacción
499 momento*labranza, donde el menor valor de mesoporosidad se encontró en Pre-S SD. En
500 las demás combinaciones realizadas no se obtuvieron diferencias significativas. Por otra
501 parte, los valores de microporosidad no reflejan diferencias al momento de medición, pero
502 si en la interacción labranza*tráfico, ya que es diferente en LC CH que en LC SH. Donde se
503 registró el menor valor para esta última condición.

504 Tabla 3: Valores medios macroporosidad, mesoporosidad y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} y
505 θ_{mi} , respectivamente) para diferentes momentos de medición (previo a la siembra, Pre-S;

506 luego de la siembra, Post-S y luego de la cosecha, Post-C), sistemas de labranza (siembra
 507 directa, SD y labranza convencional, LC) y condición de tráfico (donde haya tráfico de la
 508 última labor realizada, CH y donde no haya pisado ningún neumático de la última labor
 509 realizada SH) sobre un cultivo de soja sembrado en Chascomús.

Momento	Labranza	Tráfico	θ_{ma} (m ³ .m ⁻³)	θ_{me} (m ³ .m ⁻³)	θ_{mi} (m ³ .m ⁻³)
Pre-S	SD	SH	0,10cd	0,03a	0,40ab
	LC	SH	0,17f	0,033b	0,37a
Post-S	SD	CH	0,14ef	0,039b	0,36ab
		SH	0,12de	0,033b	0,38ab
	LC	CH	0,08bc	0,034b	0,42b
		SH	0,16f	0,033b	0,38a
Post-C	SD	CH	0,05a	0,030b	0,36ab
		SH	0,09bcd	0,042b	0,37ab
	LC	CH	0,07ab	0,03ab	0,36b
		SH	0,11d	0,03ab	0,35a

510 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 511 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).

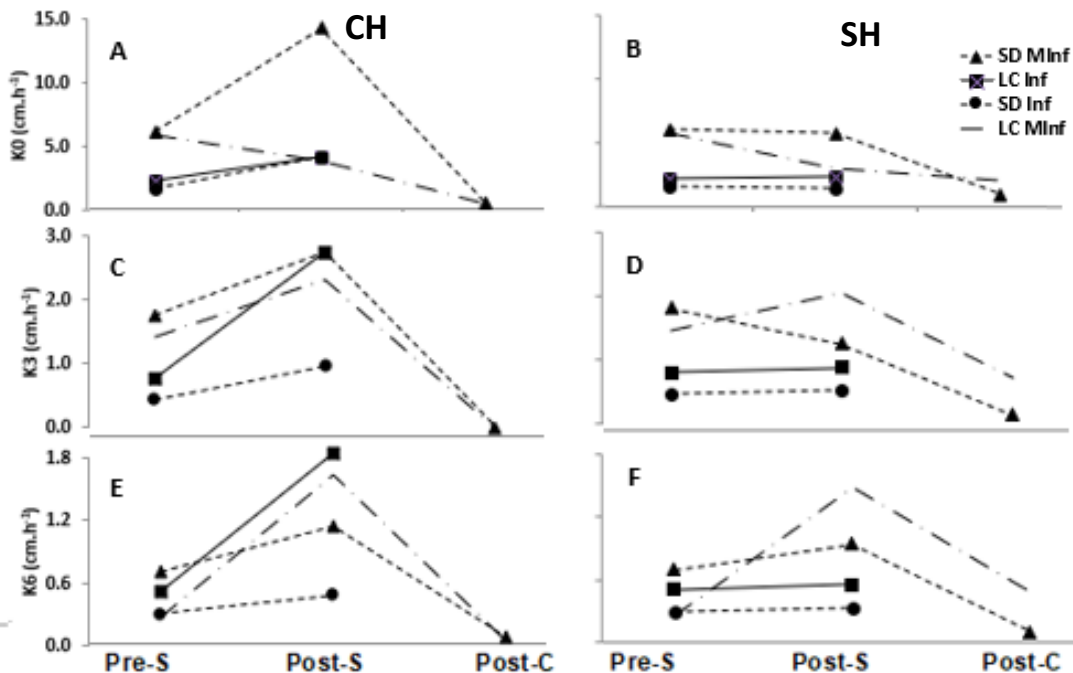
512 Los resultados presentados en esta sección corroboran las tres primeras hipótesis
 513 planteadas, en cuanto a las propiedades del sistema poroso del suelo.

514 **6.2 Indicadores dinámicos de calidad física de suelo. Conductividad** 515 **hidráulica, porosidad efectiva e índice de conectividad**

516 La figura 8 muestra los valores de K0, K3 y K6 determinados mediante infiltrómetro de disco
 517 y mini-infiltrómetro para cada momento de muestreo (en Post-C, solo se midió con mini-
 518 infiltrómetro), sistema de labranza y condición de tráfico. Al comparar ambos métodos de
 519 medición entre sí, se puede observar que los valores de las diferentes conductividades
 520 hidráulicas tienen similar tendencia a lo largo del tiempo, con excepción del momento Post-
 521 S CH y SH de K0, ya que los valores tienen un comportamiento errático en cuanto a su
 522 tendencia al paso del tiempo desde Pre-S a Post-S. Ambos métodos muestran aumentos
 523 de las diferentes conductividades hidráulicas en los lugares donde hubo tráfico de la
 524 sembradora en comparación con los lugares donde no hubo tráfico, lo cual coincide con lo

525 dicho por Ren et al. (2022) sobre la promoción de acumulación y flujo de agua en el suelo
526 expuesto a una compactación moderada.

527



528

529 Figura 8: Conductividad hidráulica (K) a 0 cm, - 3 cm y - 6 cm de tensión de entrega de agua
530 (gráfico A y B; C y D; E y F para K0, K3 y K6, respectivamente), determinada mediante
531 infiltrómetro de disco (Inf) y mini-infiltrómetro (MInf) en dos sistemas de labranza (siembra
532 directa, SD y labranza convencional, LC) para diferentes momentos de medición (previo a
533 la siembra, Pre-S; luego de la siembra, Post-S y luego de la cosecha, Post-C. En este último
534 solo se utilizó el MInf), y condición de tráfico (donde haya tráfico de la última labor realizada
535 (CH) (A, C y E) y donde no haya pisado ningún neumático de la última labor realizada (SH)
536 (B, D y F).

537 Debido a que la tendencia de los valores de conductividad hidráulica tiene comportamientos
538 similares en los dos métodos de medición utilizados, y que no se pudo realizar mediciones
539 con el infiltrómetro de disco a campo en el momento Post-C, sólo se presentarán los
540 resultados obtenidos con el mini-infiltrómetro en la tabla 4. La K0 tuvo interacción
541 significativa momento*labranza*tráfico, los menores valores fueron observados en lugares

542 donde hubo tráfico de la cosechadora. Dichos valores están por debajo del valor mínimo
 543 del rango óptimo de conductividad hidráulica saturada (entre 1,8 y 18 cm.h⁻¹) (NRCS, 2003
 544 citado por Pulido-Moncada, 2015). El resultado de K0 más elevado se observó en donde
 545 hubo tráfico de siembra dentro de la parcela de SD, este valor está dentro del rango óptimo
 546 mencionado. En Pre-S y Post-C no hubo diferencia estadísticamente significativa entre los
 547 sistemas de labranza, mientras que en Post-S se obtuvieron mayores valores de K0 para
 548 SD que para LC. Esto último no coincide con lo reportado por Alvarez et al. (2009), Lozano
 549 et al. (2016), Sasal et al. (2006) y Soracco et al. (2010). Probablemente explicado por el
 550 largo período transcurrido entre el momento de laboreo de las parcelas de LC, lo cual puede
 551 visualizarse en la figura 1, por el desarrollo de especies vegetales y el suelo sin aspecto de
 552 haber sido laboreado.

553 En K3 sólo se encontró efecto del factor fecha, donde los menores valores fueron en Post-
 554 C, lo que indicaría que el tiempo es el factor más importante para definir esta variable. Por
 555 otro lado, en K6 se obtuvo diferencias significativas en la interacción labranza*fecha, no se
 556 puede generar ningún patrón de respuesta debido al comportamiento errático de los valores
 557 medidos de esta variable.

558 Tabla 4: Valores medios de conductividad hidráulica (K) a 0 cm, - 3 cm y - 6 cm de altura
 559 de presión de agua para diferentes momentos de medición (previo a la siembra, Pre-S;
 560 luego de la siembra, Post-S y luego de la cosecha, Post-C), sistemas de labranza (siembra
 561 directa, SD y labranza convencional, LC) y condición de tráfico (donde haya tráfico de la
 562 última labor realizada, CH y donde no haya pisado ningún neumático de la última labor
 563 realizada SH) sobre un cultivo de soja sembrado en Chascomús.

Momento	Labranza	Tráfico	K0 (cm.h ⁻¹)	K3 (cm.h ⁻¹)	K6 (cm.h ⁻¹)
Pre-S	SD	SH	5,78e	1,82b	0,67bc
	LC	SH	5,57e	1,50b	0,26ab
Post-S	SD	CH	13,56f	2,78b	1,08cd
		SH	5,43e	1,29b	0,90cd
	LC	CH	3,57d	2,35b	1,43d
		SH	2,76cd	2,05b	1,56d

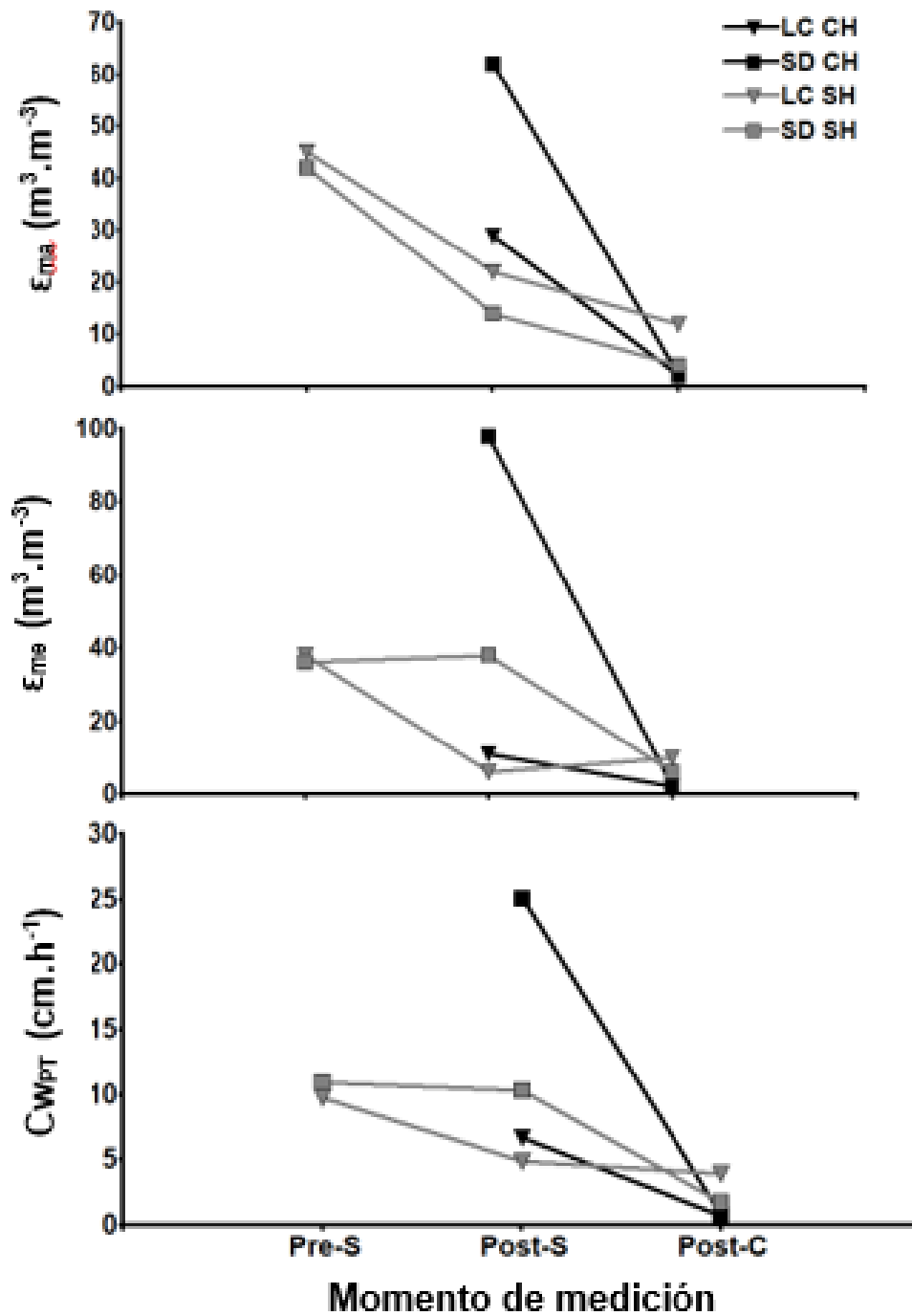
Post-C	SD	CH	0,34a	0,14a	0,07a
		SH	0,90ab	0,22a	0,10a
	LC	CH	0,31a	0,08a	0,03ab
		SH	1,90bc	0,79a	0,47ab

564 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
565 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).

566 Los valores de macroporosidad efectiva, mesoporosidad efectiva y conectividad de poros
567 totales para ambos tratamientos, a lo largo del ciclo del cultivo y para cada condición de
568 tráfico se muestran en la figura 9. Cuando no se consideró el tráfico, la macroporosidad
569 efectiva sólo se reduce significativamente después de la cosecha, mostrando la SD siempre
570 valores menores que la LC (Anexo I). Similar tendencia fue reportada por Soracco et al.
571 (2018), quienes encontraron valores de macroporosidad efectiva más elevados para LC,
572 luego del laboreo de suelo, que para SD. Al igual que Sasal et al. (2006); Alvarez et al.
573 (2009) y Lozano et al. (2014).

574 Tanto la mesoporosidad efectiva como la conectividad de la PT tuvieron efecto de la
575 interacción momento*labranza*tráfico (Anexo I). Sin considerar el tráfico, la LC reduce
576 significativamente la mesoporosidad efectiva y la conectividad medida en Post-S, luego
577 tienden a mantenerse, mientras que la SD recién la redujo posterior a la cosecha. Cuando
578 se registró la incidencia del tráfico, en los tres parámetros mencionados, se obtuvieron
579 valores superiores en SD, en comparación con LC, luego del paso de la sembradora.
580 Probablemente explicado por una compactación moderada del suelo que podría promover
581 la acumulación de agua superficial y el flujo preferencial de la misma, según descubrieron
582 Ren et al. (2022). El impacto del tráfico se ve muy marcado después de la cosecha, en
583 ambos sistemas de labranza.

584 Los resultados de indicadores dinámicos de calidad física del suelo corroboran las tres
585 primeras hipótesis planteadas, en cuanto a las propiedades del sistema hidráulico del suelo.



587

588 Figura 9: Valores medios de macroporosidad efectiva, mesoporosidad efectiva y
 589 conectividad de poros totales (ϵ_{ma} , ϵ_{me} y $C_{w_{PT}}$, respectivamente) para diferentes momentos

590 de medición (previo a la siembra, Pre-S; luego de la siembra, Post-S y luego de la cosecha,
 591 Post-C), sistemas de labranza (siembra directa, SD y labranza convencional, LC) y
 592 condición de tráfico (donde no haya pisado ningún neumático de la última labor realizada
 593 SH y donde haya tráfico de la última labor realizada, CH) sobre un cultivo de soja sembrado
 594 en Chascomús. Los valores de macroporosidad efectiva y mesoporosidad efectiva están
 595 expresados x 10⁻⁶.

596 **6.3 Humedad del suelo y resistencia a la penetración**

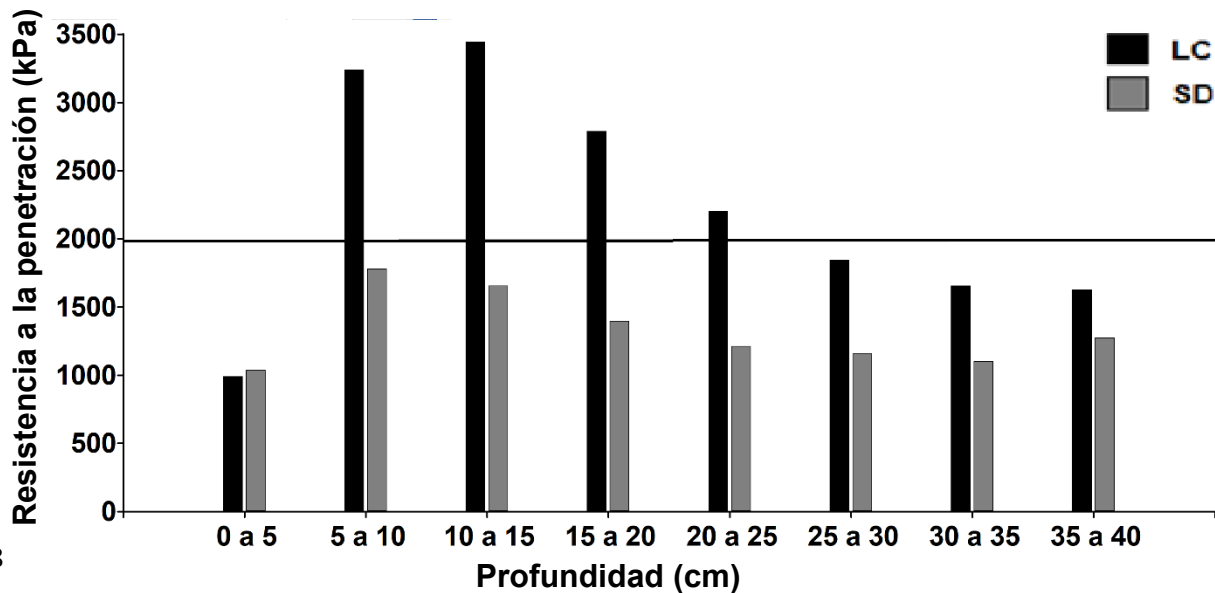
597 La tabla 5 y figura 10 muestran la humedad del suelo y resistencia a la penetración,
 598 respectivamente, en diferentes estratos de profundidad, para el momento Pre-S, en
 599 diferentes sistemas de labranza y condición de tráfico.

600 Tabla 5: Valores medios de humedad de suelo (H) en tres estratos de profundidad (0-10,
 601 10-20 y 20-30 cm), medidos previo a la siembra de un cultivo de soja (Pre-S), para
 602 diferentes sistemas de labranza (siembra directa, SD y labranza convencional, LC) y
 603 condición de tráfico (donde no haya pisado ningún neumático de la última labor realizada
 604 SH).

Momento	Labranza	Tráfico	Profundidad (cm)		
			0-10	10-20	20-30
			H (%)		
Pre-S	SD	SH	30,89b	27,92b	22,92a
	LC	SH	19,14a	22,22a	25,35a

605 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 606 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).

607



608

609 Figura 10: Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) medidos a intervalos de 5
 610 cm hasta los 40 cm de profundidad, determinados en el momento previo a la siembra (Pre-
 611 S) de un cultivo de soja, sembrado bajo diferentes sistemas de labranza (siembra directa,
 612 SD y labranza convencional, LC).

613 La humedad del suelo, en Pre-S, mostró diferencias significativas en los estratos de 0-10 y
 614 10-20 cm de profundidad. Por lo tanto, se hizo un nuevo ANOVA unifactorial, y un test de
 615 medias. En ambos estratos se obtuvieron menores valores de humedad para LC,
 616 probablemente debido a que el suelo al ser laboreado queda más expuesto a la pérdida de
 617 agua por evaporación. Las labores se realizaron el 22 de octubre de 2019 (Tabla 1) y la
 618 medición el 21 de noviembre del mismo año, durante este período de tiempo no se
 619 registraron grandes precipitaciones y menos aún en momento previos al muestreo. Por otro
 620 lado, las temperaturas favorecieron el aumento de la demanda evapotranspirativa desde la
 621 atmósfera (Figura 3). En el último estrato de profundidad no hay diferencia estadística en
 622 cuando al contenido de humedad, lo cual puede explicarse porque no se laboreó hasta esa
 623 profundidad y las condiciones atmosféricas no repercuten de la misma forma que en
 624 estratos superiores.

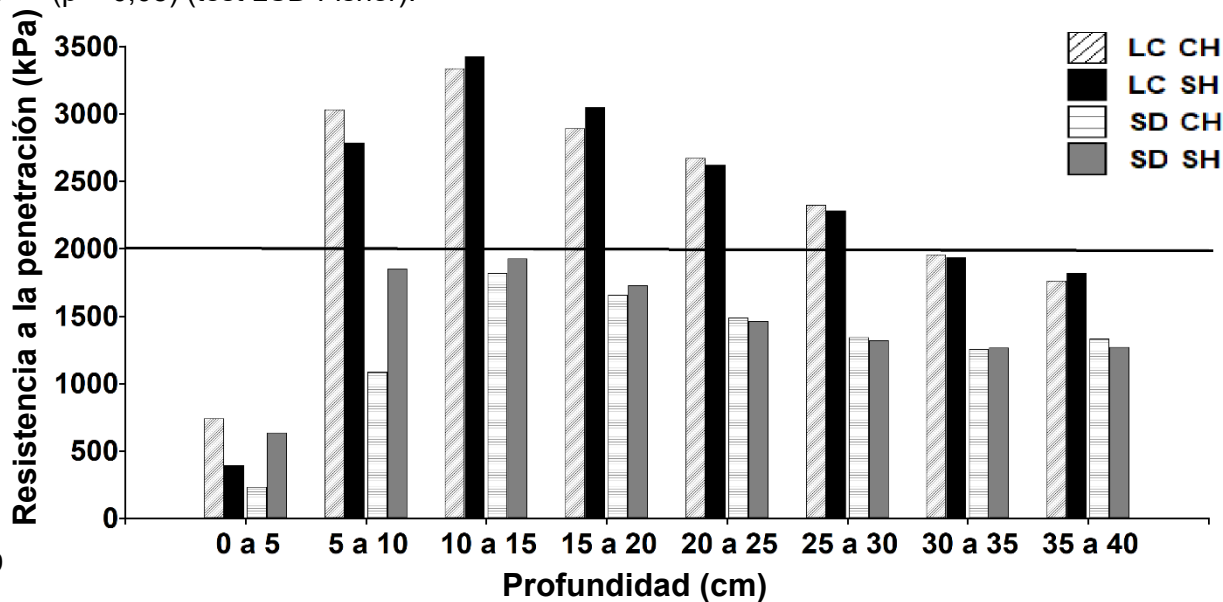
625 En cuanto a la resistencia a la penetración, en Pre-S, en los primeros 5 cm de profundidad,
 626 no hubo diferencias estadísticamente significativas en los dos sistemas de labranza
 627 evaluados. Por debajo de dicha profundidad, la RR fue significativamente mayor para LC
 628 (Anexo II). En SD, entre los 5 y 15 cm de profundidad, se obtuvieron valores superiores a
 629 los 1,5 MPa citados por Threadgill (1982) como causantes de disminución del desarrollo
 630 radical. En LC dichos valores se observaron desde los 5 cm hasta los 40 cm. A su vez,
 631 desde los 5 cm hasta los 25 cm se encontraron valores mayores a los 2 MPa señalados por
 632 Botta et al. (2012) como críticos para el desarrollo radical. También hubo valores superiores
 633 al rango de 2,1 a 2,5 MPa, indicado como valor a partir del cual se detiene el crecimiento
 634 de las raíces (Threadgill, 1982). Desde los 5 hasta los 20 cm se observa que el mayor
 635 contenido de humedad de SD se condice con una menor RR, comparado con LC. Por
 636 debajo de dicha profundidad, la tendencia de la RR continúa igual a pesar de no tener
 637 diferencia de humedad, lo cual permite deducir que la mayor compactación puede deberse
 638 al sistema de labranza.

639 En la tabla 6 y figura 11 se muestran los valores de humedad del suelo y resistencia a la
 640 penetración, respectivamente, en diferentes estratos, para el momento Post-S en diferentes
 641 sistemas de labranza y condición de tráfico.

642 Tabla 6: Valores medios de humedad de suelo (H) en tres estratos de profundidad (0-10,
 643 10-20 y 20-30 cm), medidos luego de la siembra de un cultivo de soja (Post-S), para
 644 diferentes sistemas de labranza (siembra directa, SD y labranza convencional, LC) y
 645 condición de tráfico (donde haya tráfico de la última labor realizada, CH y donde no haya
 646 pisado ningún neumático de la última labor realizada SH).

Momento	Labranza	Tráfico	Profundidad (cm)		
			0-10	10-20	20-30
			H (%)		
Post-S	SD	CH	22,05c	23,43b	20,33a
		SH	24,60c	25,35b	21,21a
	LC	CH	14,68b	18,48a	22,64a

647 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 648 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).



649

650 Figura 11: Valores medios de resistencia a la penetración medidos a intervalos de 5 cm
 651 hasta los 40 cm de profundidad, determinados en el momento posterior a la siembra (Post-
 652 S) de un cultivo de soja, sembrado bajo diferentes sistemas de labranza (siembra directa,
 653 SD y labranza convencional, LC). Las mediciones fueron realizadas en distintas zonas con
 654 respecto al tráfico agrícola (donde haya tráfico de la última labor realizada, CH y donde no
 655 haya pisado ningún neumático de la última labor realizada SH).

656 Los menores valores de humedad, hasta los 20 cm, se midieron bajo LC (y menor todavía
 657 en el sector donde no hubo pisada del rodado), probablemente explicado por la exposición
 658 del suelo labrado a las condiciones de demanda atmosférica en ese lapso de tiempo. En el
 659 estrato de 20 a 30 cm no hubo diferencias significativas. La SD mantuvo sus mayores
 660 contenidos de humedad hasta los 20 cm. En la profundidad de 20-30 cm, los mayores
 661 valores de humedad se registraron en Pre-S para ambos sistemas de labranza.

662 En el momento Post-S, la SD mantiene valores de RR más bajos que la LC por debajo de
 663 los 5 cm de profundidad. En las parcelas de SD se detectaron valores superiores a 1,5 MPa
 664 desde los 5 cm hasta los 20 cm, lo cual supera en 5 cm a la profundidad mencionada en

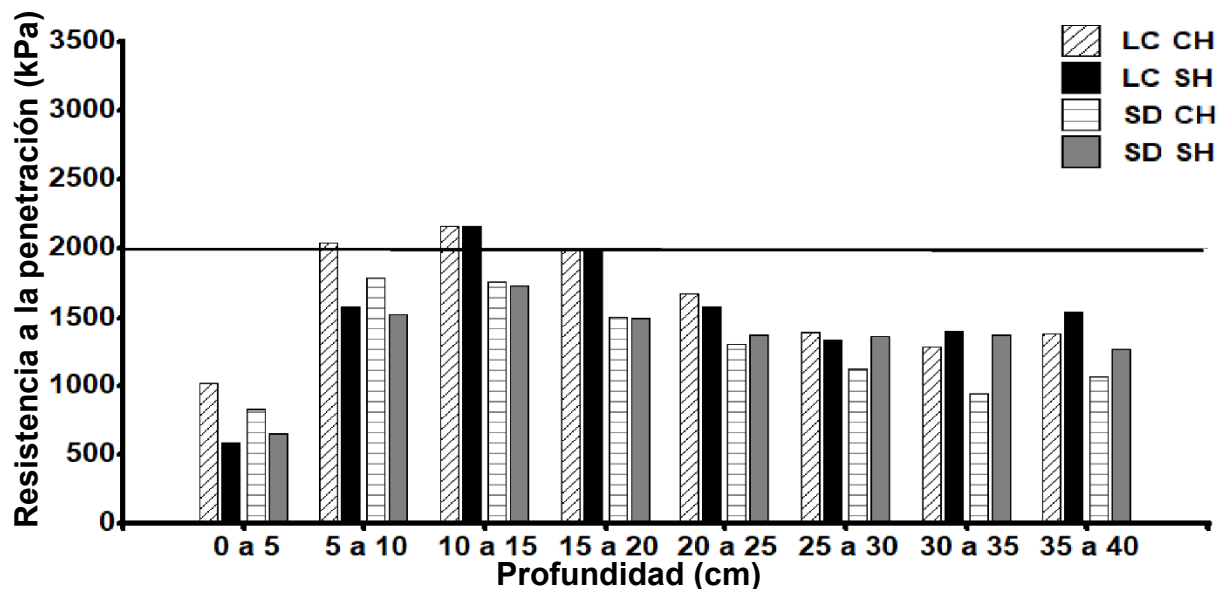
665 Pre-S con estos valores críticos, pero nunca llegó a los 2 MPa. La LC tuvo valores
 666 superiores a 1,5 MPa desde los 5 cm en adelante, incluso superiores a los 2 MPa desde
 667 los 5 cm hasta los 30 cm de profundidad. No hubo diferencia estadísticamente significativa,
 668 para las diferentes condiciones de tráfico, a partir de los 10 cm en SD, ni desde los 5 cm en
 669 LC (Anexo III). En los primeros 5 cm se observan valores inferiores a Pre-S y, hasta los 10
 670 cm, se obtuvo un comportamiento errático en cuanto al tráfico, probablemente explicado
 671 por el efecto que producen las cuchillas de la sembradora (tanto las turbos como las abre
 672 surcos), las cuales realizaron una microlabranza por detrás del neumático del tractor, pero
 673 no de manera uniforme en toda la superficie del suelo. En cuanto a la relación de la
 674 humedad con la RR, se observa el mismo comportamiento que en Pre-S, sin encontrar
 675 diferencia en la condición de tráfico.

676 En la tabla 7 y figura 12 se muestran los valores de humedad del suelo y RR,
 677 respectivamente, en diferentes estratos, para el momento Post-C, en diferentes sistemas
 678 de labranza y condición de tráfico.

679 Tabla 7: Valores medios de humedad de suelo (H) en tres estratos de profundidad (0-10,
 680 10-20 y 20-30 cm), medidos luego de la cosecha de un cultivo de soja (Post-C), para
 681 diferentes sistemas de labranza (siembra directa, SD y labranza convencional, LC) y
 682 condición de tráfico (donde haya tráfico de la última labor realizada, CH y donde no haya
 683 pisado ningún neumático de la última labor realizada, SH).

Momento	Labranza	Tráfico	Profundidad (cm)		
			0-10	10-20	20-30
H (%)					
Post-C	SD	CH	35.4c	29.4b	31.0b
		SH	26.6b	27.3ab	30.6b
	LC	CH	25ab	25.3a	26.2a
		SH	22.3a	25.9a	24.9a

684 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 685 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).



686

687 Figura 12: Valores medios de resistencia a la penetración medidos a intervalos de 5 cm
 688 hasta los 40 cm de profundidad, determinados en el momento posterior a la cosecha (Post-
 689 C) de un cultivo de soja, sembrado bajo diferentes sistemas de labranza (siembra directa,
 690 SD y labranza convencional, LC). Las mediciones fueron realizadas en distintas zonas con
 691 respecto al tráfico agrícola (donde haya tráfico de la última labor realizada, CH y donde no
 692 haya pisado ningún neumático de la última labor realizada SH).

693 El contenido de humedad del suelo fue superior a Post-S, debido a la recarga del perfil
 694 producida por las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo (Figura 2). En los
 695 primeros 20 cm de profundidad se observa que los mayores contenidos de humedad se
 696 dan en SD CH, pero entre los 10 y 20 cm no hay diferencias estadísticas entre tratamientos
 697 ni condición de tráfico, aunque los valores siempre fueron superiores en SD. Desde los 20
 698 hasta los 30 cm, se ve diferencias estadísticamente significativas en cuanto al sistema de
 699 labranza, SD tuvo mayor contenido de humedad.

700 En los primeros 10 cm no hay diferencias significativas de resistencia a la penetración entre
 701 sistemas de labranza (Anexo IV). Entre los 5 y los 10 cm la compactación fue superior
 702 debajo de la huella de la cosechadora para cada tipo de labranza. A pesar de no
 703 encontrarse diferencias significativas dentro de la labranza, en el primer estrato, se puede

704 observar que el comportamiento errático mencionado en Post-S desapareció ya que el valor
705 medio de la condición de tráfico fue mayor en CH que en SH (alrededor de 50 % más), lo
706 cual se corresponde con lo encontrado por Hidalgo et al. (2010) y Richmond & Rillo, (2006),
707 luego de la cosecha del cultivo. También se evidencia que la operación de cosecha produce
708 mayor aumento de la RR que la siembra en el estrato mencionado. Por otro lado, hasta los
709 10 cm de profundidad, se observó que la magnitud del aumento de la RR inducida por el
710 tráfico agrícola fue inferior en SD que en LC, al igual que lo encontrado por Draghi et al.
711 (2015). Desde los 10 cm hasta los 25 cm se mantiene la no diferenciación de RR entre las
712 condiciones de tráfico, pero sí hay diferencia entre los sistemas de labranza. Desde los 25
713 hasta los 35 cm se observó que SD CH produce menor RR que las demás condiciones. Por
714 debajo de la profundidad mencionada no hay diferencia entre los sistemas de labranza ni
715 condición de tráfico.

716 A partir de los 5 cm de profundidad se observan valores superiores al citado como crítico
717 para el desarrollo radicular (1,5 MPa), en SD hasta los 20 cm. Mientras que en LC se
718 obtuvieron dichos valores hasta los 25 cm, y en muchos casos fueron de alrededor de los
719 2 MPa.

720 Los resultados de resistencia a la penetración obtenidos en este ensayo permiten
721 diferenciar entre sistemas de labranza y condición de tráfico, por tal motivo no se puede
722 corroborar la cuarta hipótesis planteada.

723 **6.4 Rendimiento del cultivo**

724 El rendimiento del cultivo de soja, con humedad de 10,8 %, fue de 2438 kg.ha⁻¹ y 2562
725 kg.ha⁻¹ para las parcelas de SD y LC, respectivamente. No se detectó diferencia

726 estadísticamente significativa entre ambos rendimientos a pesar de las diferencias
727 encontradas, entre SD y LC, en los distintos parámetros evaluados en Post-S (momento en
728 el cual se define la condición inicial para el crecimiento y desarrollo del cultivo). En dicho
729 momento se obtuvieron mayores K_0 , ϵ_{me} , CW_{PT} y menor resistencia a la penetración, en SD
730 comparado con LC. Pero estas ventajas bajo SD no se tradujeron en aumento del
731 rendimiento, probablemente debido a que algún factor externo a los evaluados haya
732 limitado el rendimiento potencial del cultivo y no permitió visualizar diferencias. Las
733 condiciones climáticas de precipitación y temperatura no presentaron situaciones de estrés
734 para el cultivo de soja. La precipitación total durante la campaña 2019/2020 fue similar a
735 las ocurridas en el registro histórico (678 mm y 690 mm, respectivamente), pero su
736 distribución no lo fue. En los meses de enero y febrero, donde los requerimientos
737 evapotranspirativos del cultivo de soja son máximos, hubo menores mm de agua
738 precipitada en la campaña de este ensayo, mostrando sus valores más altos hacia fines de
739 marzo, momento en el cual el rendimiento del cultivo ya estaba definido (Figura 2). En
740 cuanto a la temperatura, los valores mínimos, medios y máximos no presentan problemas
741 para el normal desarrollo del cultivo de soja, ya que no hay temperaturas extremas durante
742 el ciclo de la misma (Figura 3).

743 **6.5 Consideraciones finales**

744 El presente estudio permite demostrar que, tanto en sistemas de siembra directa como en
745 labranza convencional, las propiedades del suelo sufren variaciones temporales generadas
746 por el tráfico agrícola. Y, que cada operación agrícola realizada sobre el suelo tiene efectos
747 diferentes de acuerdo a las características de la maquinaria utilizada y de la condición de
748 la cual se parte. El suelo bajo SD es susceptible a compactación, particularmente en la
749 cosecha, y debe prestarse atención al contenido de humedad del suelo al hacer esta labor,
750 ya que esta compactación en este sistema será difícil de revertir en suelos de la región
751 pampeana que tienen baja capacidad de generar porosidad.

752 Los indicadores estáticos, dinámicos y mecánicos permiten detectar diferencias en las
753 respuestas de los diferentes sistemas de labranza y condición de tráfico a través del tiempo.
754 En general, puede notarse un efecto más negativo donde hubo pisada del neumático que
755 donde no la hubo.

756 A pesar de las diferencias en las respuestas de las variables estudiadas, no se obtuvieron
757 diferencias estadísticas en los rendimientos del cultivo. Probablemente debido a factores
758 externos al estudio. Pero quizás sea conveniente realizar un estudio similar donde se
759 determine el rendimiento en los sectores con y sin tráfico dentro de cada sistema de
760 labranza, y abarcando años con condiciones climáticas diferentes.

761 **7 CONCLUSIONES**

762 Las propiedades del sistema poroso y las propiedades hidráulicas del suelo sufren
763 variaciones temporales, durante el ciclo del cultivo de soja, generadas por las operaciones
764 de tráfico. Las mayores variaciones se dan en el sistema de labranza convencional. Y, en
765 los lugares donde hay tráfico agrícola. Por ello se corroboran la primera y la segunda
766 hipótesis planteada.

767 La cosecha es la labor que mayor efecto negativo tiene sobre los parámetros físicos.
768 Corroborando la tercera hipótesis planteada.

769 Tanto los indicadores estáticos de calidad física del suelo, como los dinámicos y los
770 parámetros de resistencia a la penetración, permiten detectar efectos del tráfico agrícola en
771 un cultivo de soja bajo labranza convencional o siembra directa, siendo importante
772 considerarlos en su conjunto a la hora de evaluar el efecto de distintos sistemas de labranza
773 y situaciones de tráfico sobre la calidad física del suelo. Por tal motivo no puede
774 corroborarse la cuarta hipótesis planteada.

775 **8 BIBLIOGRAFÍA**

776 **AAPRESID.** 2018. Evolución y retos de la Siembra Directa en Argentina. Disponible en:
777 <https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2018/03/Estimacio%CC%81n-de-superficien->
778 [en-SD.pdf.](#)

779 Último acceso: septiembre 2019

780 **Alvarez, R. & H.S. Steinbach.** 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil
781 physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine
782 Pampas. Soil and tillage research, 104: 1-15.

783 **Alvarez, C.R., M.A. Taboada, F.H. Gutierrez Boem, A. Bono, P.L. Fernandez & P**
784 **Prystupa.** 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa
785 region of Argentina. Soil Science Society of America Journal 73: 1242-1250.

786 **Ankeny M.D., M. Ahmed, T.C. Kaspar & R. Horton.** 1991. Simple field method for
787 determining unsaturated hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Journal
788 Abstract. Disponible en: <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020028x>.

789 Último acceso: agosto 2019.

790 **Botta, G.F., A. Tolon-Becerra, M. Tourn, X. Lastra-Bravo & D. Rivero.** 2012. Agricultural
791 traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil
792 conditions. Soil and Tillage Research 120: 92-98.

793 **Botta, G.F., A.T. Becerra & F.B. Tourn.** 2009. Effect of the number of tractor passes on
794 soil rut depth and compaction in two tillage regimes. Soil and Tillage Research 103: 381-
795 386.

796 **Botta, G.F., D. Jorajuría, H. Rosatto & C. Ferrero.** 2006. Light tractor traffic frequency on
797 soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil and Tillage Research* 86: 9-
798 14.

799 **Botta, G.F., D. Jorajuría, R. Balbuena & H. Rosatto.** 2004. Mechanical and cropping
800 behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine*
801 *max L.*) yields. *Soil and Tillage Research* 78: 53-58.

802 **Botta, G.F., D. Jorajuría & L.M. Draghi.** 2002. Influence of the axle load, tyre size and
803 configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics* 39:
804 47-54.

805 **Cassel, D.K., & L.A. Nelson.** 1985. Spatial and temporal variability of soil physical
806 properties of Norfolk loamy sand as affected by tillage. *Soil and Tillage Research* 5: 5-17.

807 **Coquet, Y., J. Šimůnek, C. Coutadeur, M.T. van Genuchten, V. Pot & Roger-Estrade,**
808 **J.** 2005. Water and Solute Transport in a Cultivated Silt Loam Soil. *Vadose Zone Journal* 4:
809 587-601.

810 **Chagas, C.I., O.J. Santanatoglia, M.G. Castiglioni & H.J Marelli.** 1995. Tillage and
811 cropping effects on selected properties of an Argiudoll in Argentina. *Communications in soil*
812 *science and plant analysis*, 26: 643-655.

813 **Dexter, A. R.** 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and
814 organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120: 201-214.

815 **Draghi, L., D Jorajuría, D. Sarena, M. Bailleres, E. Melani, J.M. Castillo, C. Cerisola &**
816 **T. Palancar.** 2015. Impacto del tráfico en dos sistemas de siembra. *Agrociencia Uruguay*
817 19 2:59-67.

818 **Gardner, W.R. & M.S. Mayhugh.** 1958. Solutions and Tests of the Diffusion Equation for
819 the Movement of Water in Soil 1. *Soil Science Society of America Journal* 22(3): 197-201.

820 **Håkansson, I., W.B. Voorhees & H Riley.** 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil
821 compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil and tillage research* 11: 239-
822 282.

823 **Hamza, M.A. & W.K., Anderson.** 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of
824 the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research* 82: 121-145.

825 **Hillel, D.** 1998. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental*
826 *considerations.* Academic Press. San Diego. pp 771.

827 **Hidalgo, R., G. Botta, O. Pozzolo, H. Santajuliana, F. Domínguez & C. Curró.** 2010.
828 Cosecha de soja. efecto sobre la compactación del suelo. In *Actas XX Congreso Argentino*
829 *de Mecánica de Suelos e Ingeniería. Geotécnica.*

830 **Ibañez, G. & G.F. Botta.** 2003. Compactación del suelo producida por el tráfico del tractor
831 agrícola. Trabajo final de aplicación, UNLu, Buenos Aires, Argentina. 53 pp.

832 **Jorajuría D.** 2001. Distribución vertical de la compactación del suelo bajo tráfico vehicular
833 agrícola. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España. 135 pp.

834 **Jorajuría D.** 2005. Compactación del suelo agrícola bajo tráfico vehicular. Una revisión. En:
835 *Reología del suelo agrícola bajo tráfico.* Ed. EDULP. 39-55.

836 **Jorajuría, D., L. Draghi & A. Aragon.** 1997. The effect of vehicle weight on the distribution
837 of compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium* grassland. *Soil and Tillage*
838 *Research* 41: 1-12.

839 **Lal, R.** 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating
840 greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 43: 81-107.

841 **Iovino, M., M. Castellini, V. Bagarello & G. Giordano.** 2016. Using static and dynamic
842 indicators to evaluate soil physical quality in a Sicilian area. *Land degradation &*
843 *development* 27: 200-210.

844 **Lozano, L.A.** 2014. Desarrollo de estructura laminar del suelo en siembra directa. Doc.
845 Tesis, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP, Buenos Aires, Argentina. 131 pp.

846 **Lozano L.A., C.G. Soracco, R. Villarreal, J.M. Ressa, G.O. Sarli & R.R. Filgueira.** 2016.
847 Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till
848 soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40. Disponible en:
849 <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150160>. Último acceso: Agosto 2019.

850 **Lozano, L. A., C.G. Soracco, V.S. Buda, G.O. Sarli & R. R. Filgueira.** 2014. Stabilization
851 of soil hydraulic properties under a long term no-till system. *Revista Brasileira de Ciência do*
852 *Solo*, 38: 1281-1292.

853 **Lozano L.A., C.G. Soracco, W.M. Cornelis, D. Gabriels, G.O. Sarli & R. Villarreal.** 2013.
854 Anisotropy of pore size classes' connectivity related to soil structure under no tillage. *Soil*
855 *Science* 11: 612-617.

856 **Moret, D. & J.L. Arrúe.** 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected
857 by tillage. *Soil and Tillage Research* 96: 103-113.

858 **Pabin, J., J. Lipiec, S. Włodek, A. Biskupski & A. Kaus.** 1998. Critical soil bulk density
859 and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil and Tillage*
860 *Research* 46: 203-208.

861 **Perroux, K.M. & I. White.** 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52
862 (2), 1205–1215.

863 **Pulido-Moncada, M., B.C. Ball, D. Gabriels, D. Lobo & W.M. Cornelis.** 2015. Evaluation
864 of soil physical quality index S for some tropical and temperate medium-textured soils. Soil
865 Science Society of America Journal 79: 9-19.

866 **Reichert, J.M., V.T. da Rosa, E.S. Vogelmann, D.P. da Rosa, R. Horn, D.J. Reinert &**
867 **J.E. Denardin.** 2016. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil
868 properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled
869 traffic. Soil and Tillage Research 158: 123-136.

870 **Ren, L., W.M. Cornelis, G. Ruyschaert, J. De Poes, P. Lootens & T. D'Hose.** 2022.
871 Quantifying the impact of induced topsoil and historical subsoil compaction as well as the
872 persistence of subsoiling. Geoderma, 424, 116024.

873 **Reynolds, W.D., B.T. Bowman, C.F. Drury, C.S. Tan & X. Lu.** 2002. Indicators of good
874 soil physical quality: density and storage parameters. Geoderma 110: 131-146.

875 **Reynolds, W.D., C.F. Drury, C.S. Tan, C.A. Fox & X.M. Yang.** 2009. Use of indicators and
876 pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma, 152: 252-
877 263.

878 **Richmond, P. & S. Rillo.** (2006). Evaluación del efecto de la compactación por el rodado
879 de maquinarias sobre algunas propiedades físicas del suelo y el cultivo de trigo en siembra
880 directa. INPOFOS Informaciones Agronómicas, 32, 22-25.

881 **Sanchez-Girón, V.E. Andreu & J.L. Hernanz.** 1998. Response of five types of soil to
882 simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests. Soil & Tillage
883 Research 48: 37-50.

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

887 **Servadio, P., A. Marsili, N. Vignozzi, S. Pellegrini & M. Pagliai.** 2005. Effects on some
888 soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single
889 and dual tires. Soil and Tillage Research 84: 87-100.

890 **Smith, D.L.O. & J.W. Dickson.** 1990. Contributions of vehicle weight and ground pressure
891 to soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research 46: 13-29.

892 **Soil Survey Staff.** 2006. Keys to Soil Taxonomy, 10th ed. USDA-Natural Resources
893 Conservation Service, Washington, DC.

894 **Sokal, R.R. & F.J. Rohlf.** 1995. Biometry: the Principals and Practice of Statistics in
895 Biological Research. WH Freeman and Company, New York.

896 **Soracco, C.G., L.A. Lozano, G.O. Sarli, P.R. Gelati & R.R. Filgueira.** 2010. Anisotropy of
897 saturated hydraulic conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. Soil and
898 Tillage Research 109: 18-22.

899 **Soracco, C.G., L.A. Lozano, G.O. Sarli, P.R. Gelati & R.R. Filgueira.** 2011. Using tension
900 disc infiltrometer to determine infiltration and water-conducting macroporosity and
901 mesoporosity relationships in an agricultural silty loam soil. Soil Science 176: 459-463.

902 **Soracco, C.G., L.A. Lozano, R. Balbuena, J.M. Ressia & R.R. Filgueira.** 2012.
903 Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. Revista
904 Brasileira de Ciência do Solo 36: 1149-1156.

905 **Soracco, C.G., L.A. Lozano, R. Villarreal, E. Melani & G.O. Sarli.** 2018. Temporal
906 variation of soil physical quality under conventional and no-till systems. *Revista Brasileira*
907 *de Ciência do Solo*, 42.

908 **Soracco, C.G., R. Villarreal, E.M. Melani, J.A. Oderiz, M.P. Salazar, M.F. Otero, A.B.**
909 **Irizar & L.A. Lozano.** 2019. Hydraulic conductivity and pore connectivity. Effects of
910 conventional and no-till systems determined using a simple laboratory device. *Geoderma*
911 337, 1236–1244.

912 **Steinbach, H.S. & R. Alvarez.** 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas
913 de los suelos de la Región Pampeana? *Informaciones Agronómicas* 33: 7-12.

914 **Strudley, M.W., T.R. Green & J.C. Ascough II.** 2008. Tillage effects on soil hydraulic
915 properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research* 99: 4-48.

916 **Threadgill, E. D.** 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions*
917 *of the ASAE* 25: 859-963.

918 **Tolon-Becerra, A., M. Tourn, G.F. Botta & X. Lastra-Bravo.** 2011. Effects of different
919 tillage regimes on soil compaction, maize (*Zea mays* L.) seedling emergence and yields in
920 the Eastern Argentinean Pampas región. *Soil and Tillage Research* 117: 184-190.

921 **van Genuchten, M.T., F.J. Leij & S.R. Yates.** 1991. The RETC code for quantifying the
922 hydraulic functions of unsaturated soils.

923 **van Genuchten, M.T.** 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity
924 of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.

925 **Villarreal, R., C.G. Soracco, L.A. Lozano, E.M. Melani & G.O. Sarli.** 2017. Temporal
926 variation of soil sorptivity under conventional and no-till systems determined by a simple
927 laboratory method. *Soil and Tillage Research* 168: 92-98.

928 **Voorhees, W.B.** 1983. Relative Effectiveness of Tillage and Natural Forces in Alleviating
929 Wheel-Induced Soil Compaction 1. Soil Science Society of America Journal 47: 129-133.

930 **Wahl, N.A., O. Bens, U. Buczko, E. Hangen & R.F. Hüttl.** 2004. Effects Of Conventional
931 And Conservation Tillage On Soil Hydraulic Properties Of A Silty Loamy Soil. Physics And
932 Chemistry Of The Earth 29: 821-829.

933 **Watson, K. & R.J. Luxmoore.** 1986. Estimating Macroporosity In A Forest Watershed By
934 Use Of A Tension Infiltrometer. Soil Science Society of America Journal 50: 578-582.

935 **Wooding, R.A.** 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources*
936 *Research* 4(6): 1259-1273.

937 **Yavuzcan, H.G., M. Vatandas & R. Gürhan.** 2002. Soil strength as affected by tillage
938 system and wheel traffic in wheat-corn rotation in central Anatolia. Journal of
939 Terramechanics 39: 23-34.

940 **9 ANEXO**

941 **9.1 Anexo I:**

942 Tabla I: Valores medios de macroporosidad efectiva, mesoporosidad efectiva y conectividad
 943 de poros totales (ϵ_{ma} , ϵ_{me} y C_{WPT} , respectivamente) para diferentes momentos de medición
 944 (previo a la siembra, Pre-S; luego de la siembra, Post-S y luego de la cosecha, Post-C),
 945 sistemas de labranza (siembra directa, SD y labranza convencional, LC) y condición de
 946 tráfico (donde haya tráfico de la última labor realizada, CH y donde no haya pisado ningún
 947 neumático de la última labor realizada SH) sobre un cultivo de soja sembrado en
 948 Chascomús.

Momento	Labranza	Tráfico	ϵ_{ma} ($m^3 \cdot m^{-3}$)*	ϵ_{me} ($m^3 \cdot m^{-3}$)*	C_{WPT} ($cm \cdot h^{-1}$)
Pre-S	SD	SH	42b	36b	10,93e
	LC	SH	45b	38b	9,72e
Post-S	SD	CH	62b	98c	25,04f
		SH	14b	38b	10,30e
	LC	CH	29b	11a	6,71d
Post-C	SD	CH	2a	2a	0,76a
		SH	4a	6a	1,76ab
	LC	CH	2a	2a	0,67a
		SH	12a	10a	3,92bc

949 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 950 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).

951 *Valores x 10^{-6} .

952 **9.2 Anexo II:**

953 Tabla II: Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) medidos a intervalos de 5 cm
 954 hasta los 40 cm de profundidad, determinados en el momento previo a la siembra (Pre-S)
 955 de un cultivo de soja, sembrado bajo diferentes sistemas de labranza (siembra directa, SD
 956 y labranza convencional, LC).

Momento Pre-S		Profundidad (cm)						
Labranza	Resistencia a la penetración (kPa)							
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
SD	1035a	1777a	1654a	1397a	1212a	1156a	1100a	1272a
LC	988a	3240b	3441b	2786b	2201b	1843b	1654b	1625b

957 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 958 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).

959

960 **9.3 Anexo III:**

961 Tabla III: Valores medios de resistencia a la penetración medidos a intervalos de 5 cm hasta
 962 los 40 cm de profundidad, determinados en el momento posterior a la siembra (Post-S) de
 963 un cultivo de soja, sembrado bajo diferentes sistemas de labranza (siembra directa, SD y
 964 labranza convencional, LC). Las mediciones fueron realizadas en distintas zonas con
 965 respecto al tráfico agrícola (donde haya tráfico de la última labor realizada, CH y donde no
 966 haya pisado ningún neumático de la última labor realizada SH).

Momento Post-S		Profundidad (cm)							
Labranza	Tráfico	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
		Resistencia a la penetración (kPa)							
SD	CH	231a	1084a	1816a	1654a	1485a	1341a	1253a	1331a
	SH	632b	1847b	1923a	1725a	1461a	1316a	1263a	1268a
LC	CH	738b	3032c	3335b	2891b	2670b	2322b	1956b	1759b
	SH	390a	2786c	3426b	3047b	2619b	2280b	1933b	1817b

967 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 968 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).

969 **9.4 Anexo IV:**

970 Tabla IV: Valores medios de resistencia a la penetración medidos a intervalos de 5 cm hasta
 971 los 40 cm de profundidad, determinados en el momento posterior a la cosecha (Post-C) de
 972 un cultivo de soja, sembrado bajo diferentes sistemas de labranza (siembra directa, SD y
 973 labranza convencional, LC). Las mediciones fueron realizadas en distintas zonas con
 974 respecto al tráfico agrícola (donde haya tráfico de la última labor realizada, CH y donde no
 975 haya pisado ningún neumático de la última labor realizada SH).

Momento Post-C		Profundidad (cm)							
Labranza	Tráfico	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
		Resistencia a la penetración (kPa)							
SD	CH	828bc	1791b	1764a	1508a	1294a	1117a	945a	1060a
	SH	647ab	1522a	1728a	1495a	1363a	1356b	1366b	1263a
LC	CH	1017c	2039c	2160b	1981b	1673b	1395b	1279b	1369a
	SH	583a	1576a	2160b	1988b	1581b	1323b	1405b	1544a

976 Medias con una letra común, dentro de cada columna, no son significativamente diferentes
 977 ($p > 0,05$) (test LSD Fisher).