

PERSISTENCIA DEL EFECTO DEL SUBSOLADO EN UN SUELO BAJO ROTACIÓN DE CULTIVOS-PASTOREO EN EL SECANO DE LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA, CHILE

PERSISTENCE OF THE EFFECT OF SUBSOILING ON A SOIL UNDER CROP ROTATION-GRAZING IN THE DRY LAND OF THE ARAUCANIA REGION, CHILE

Manuel Vial^{1a} y Juan Inostroza^{1b}

^{1a}Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigaciones Carillanca, Casilla 58-D, Temuco, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-3728-9437>

^{1b}Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigaciones Carillanca, Casilla 58-D, Temuco, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-5650-0026>

* Autor para correspondencia E-mail: manuel.vial@inia.cl

RESUMEN

La compactación es un problema que se presenta de manera recurrente en los suelos del secano interior de la Región de La Araucanía, afectando considerablemente los rendimientos. El objetivo de este estudio fue determinar la persistencia en el tiempo del efecto del subsolado, como herramienta utilizada para descompactar, en un suelo bajo rotación de cultivos-pastoreo. Se estableció un ensayo de seguimiento por 5 temporadas consecutivas (t), midiendo la compactación dentro del perfil de 0-45 cm de profundidad, considerando lecturas del Índice de Cono ≥ 2000 kPa como indicador de suelo compactado. El diagnóstico se realizó el año 2015 (t_0), mientras que los ensayos de seguimiento se iniciaron el 2016 (t_1) con una siembra de avena, incluyendo dos tratamientos: "Con subsolado" y "Sin subsolado". Los resultados obtenidos indican que la utilización del subsolado incrementó el rendimiento un 14,9% comparado con el testigo (sin subsolado). Posteriormente, el sitio experimental fue utilizado para pastoreo extensivo todo el año sin regulación de carga animal entre las temporadas 2017-2020 (t_2 - t_5); durante ese periodo, se realizó el seguimiento de la persistencia del efecto del subsolado en el espacio ocupado por las parcelas experimentales, evaluando la compactación del perfil de 0-45 cm y contrastando los valores obtenidos el 2015 (t_0). En la última temporada evaluada (t_5), el perfil de 0-10 cm presentó lecturas superiores al límite considerado como compactado, lo cual fue atribuido al uso ganadero del sitio. Se concluye que las lecturas del grado de compactación (kPa) retornan a la condición original (t_0) a partir de la segunda temporada luego del subsolado (t_2), con lo cual se termina el efecto residual del subsolado.

Palabras clave: Compactación; subsolador, Alfisol, secano, persistencia.

ABSTRACT

Compaction is a recurring problem in soils of the dryland zone of the Araucanía Region, affecting yields considerably. The objective of this study was to determine the persistence over time of the effect of subsoiling, as a tool to reduce soil compaction, on a soil under crop rotation-grazing. A field experiment was established for 5 consecutive seasons (t). Soil compaction was measured at a depth of 0-45 cm, using the Cone Index as an indicator and considering ≥ 2000 kPa as compacted soil. The diagnosis was conducted in 2015 (t_0), while the experimental trials started in 2016 (t_1) when oats were sown on a site with two different treatments: 'Subsoiling' and 'No subsoiling'. The obtained results showed that subsoiling increased yield by 14.9% compared to the no subsoiling treatment. Subsequently, the

experimental site was used for grazing without animal load control from 2017 to 2020 (t_1-t_3). During this period, the persistence of the effect of subsoiling on the experimental site was evaluated by measuring soil compaction of a depth of 0-45 cm and contrasting the values to those obtained in 2015 (t_0). In the last season (t_3), the 0-10 cm profile showed surface compaction, which was attributed to grazing. It can be concluded that compaction levels (kPa) return to the original levels (t_0) from the second season after subsoiling (t_2), which ends the residual effect derived from the use of this tool.

Key words: Compaction; subsoiler, Alfisol, dryland, persistence.

INTRODUCCIÓN

El seco interior de la región de La Araucanía posee condiciones de suelo y clima particulares que los diferencian del resto de la región; esta área fue determinada como zona agroecológica por Rouanet (1982) caracterizándose por presentar un periodo de déficit hídrico de cinco a seis meses, con alta probabilidad de que se agote el agua en el suelo entre los meses de diciembre a marzo, siendo clasificado como clima tipo templado cálido supra-termal con régimen de humedad sub húmedo seco; encontrándose actualmente en un proceso transicional de zona semi-húmeda a semiárida al disminuir la pluviometría y aumentar las temperaturas paulatinamente (AGRIMED, 2017). La pluviometría anual promedio en el periodo 1960-2019 es de 672 mm concentrándose un 61% en los meses de mayo a agosto, 24% en primavera (septiembre a diciembre) y un 15% de enero a abril, según la Red Agrometeorológica-INIA (Fig. 1). La temperatura mínima media de

los meses más cálidos (diciembre–febrero), oscila entre 25°C y 27°C. La mínima media es de 10°C (Rouanet, 1982; Romero y Rojas, 1996).

Desde fines del siglo XIX, los suelos han sido sometidos a un continuo proceso de degradación de origen antrópico, observándose en la actualidad graves procesos erosivos, compactación, sobre pastoreo y rotaciones con bajos rendimientos; actualmente predomina el sistema mixto rotación de cultivo – praderas donde se alternan cultivos anuales, principalmente cereales, y luego 3 a 4 años de praderas naturalizada que comúnmente presentan una muy baja producción de materia seca (MS/ha) llegando entre 0,7 a 1,4 t MS año⁻¹ (Rojas et al., 1993; Romero y Rojas, 1996).

El objetivo del estudio fue determinar la duración del efecto del subsolado en un perfil de suelo utilizado para rotación de cultivos y ganadería entre 0 a 45 cm de profundidad con mediciones anuales comparativas mediante el índice de cono (IC, kPa).

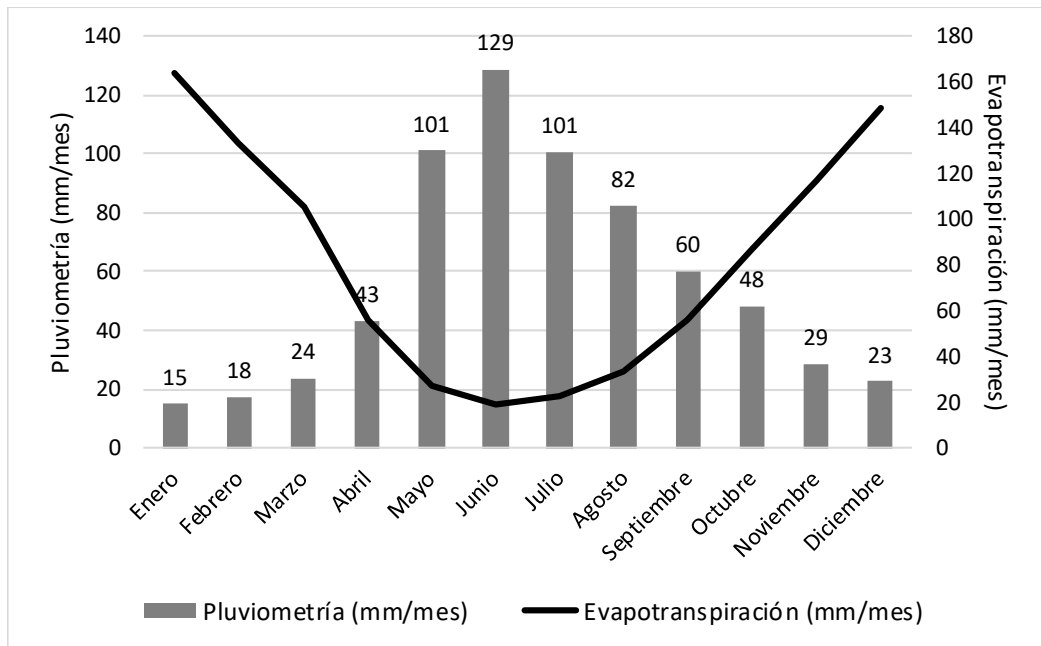


Fig. 1. Distribución de las precipitaciones (mm/mes) y evapotranspiración (mm/mes) en la comuna de Los Sauces. Datos históricos (1960-2019).

Fig. 1. Distribution of precipitation (mm/month) and evapotranspiration (mm/month) in the commune of Los Sauces. Historical data (1960-2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio experimental se encuentra a 10 kilómetros al sur de la localidad de Los Sauces (38°04' S. 72°47' O. 187 msnm), Chile (Fig. 2). El suelo corresponde un Alfisol, serie Santa Sofía (Familia fina, mixta, mélica, Rhodic Kanhapludalf) en posición de terrazas de 5% de pendiente aproximadamente; el clima es clasificado como templado cálido mesotermal con régimen de humedad sub húmedo seco (Csb1Shs) (CIREN, 2002; Luzio et al., 2009; AGRIMED, 2017).

Las características del suelo se indican en Tabla 1; en superficie presenta textura franco-arcillo-arenoso (FAa) y color pardo a pardo oscuro en el matiz 7,5YR; de textura arcillosa y color pardo rojizo oscuro en el matiz 2,5YR en profundidad, presentando afloramientos de gravilla y grava cuarcífera ocasionalmente. En las fórmulas de indicadores de porosidad (1,2 y 3), se consideró el valor de densidad real (Dr) de 2,65 (g cm⁻³) como referencia en suelos derivados de rocas graníticas (Schlatter et al., 2003; Blake, 2008; Sandoval et al., 2012). Las formular referenciales fueron las siguientes:

$$\text{Porosidad total PT (\%)} = [1 - \text{Da (g cm}^{-3}\text{)} / \text{Dr (g cm}^{-3}\text{)}] * 100 \quad (1)$$

$$\text{Macroporos Ma (\%)} = \text{PT} - [\% \text{CC} * \text{Da (g cm}^{-3}\text{)}] \quad (2)$$

Considerando Macroporos a los espacios de (Ø>50 µm) a una presión >33 kPa.

$$\text{Microporos Mi (\%)} = \text{PT} - \% \text{Ma.} \quad (3)$$

Considerando Microporos a los espacios de (Ø<50µm) y a una presión <33 kPa.

El análisis indica un suelo ácido, con valores de macro y micronutrientes catalogados como bajos a muy bajos; el contenido de materia orgánica está clasificado como bajo disminuyendo en profundidad (Tabla 2).

Diagnóstico de compactación

El año 2015 se realizó el diagnóstico de compactación tomando inicialmente 30 puntos de inserción al azar con un penetrómetro y posteriormente determinado (4) el número de muestras requeridas (*n*) para lograr una representatividad adecuada considerando un error del 5% (Mostacedo y Fredericksen, 2000), a continuación, se confeccionó la curva IC (kPa)/ profundidad (cm) para establecer donde se encuentra la capa compactada (≥2000 kPa) en el perfil. Esta metodología se utilizó en cada muestreo anual de seguimiento.

$$n = \frac{[(t^2 * C.V.^2)]}{[E^2 + [(t^2 * C.V.^2) * N^{-1}]]} \quad (4)$$

n = número de muestras requeridas

E = error al 5%

t = valor que se obtiene de las tablas de t-student (α/2= 0,05)

N = total de muestras en todo el sitio en el pre-test

C.V. = coeficiente de variación (%) de *N*

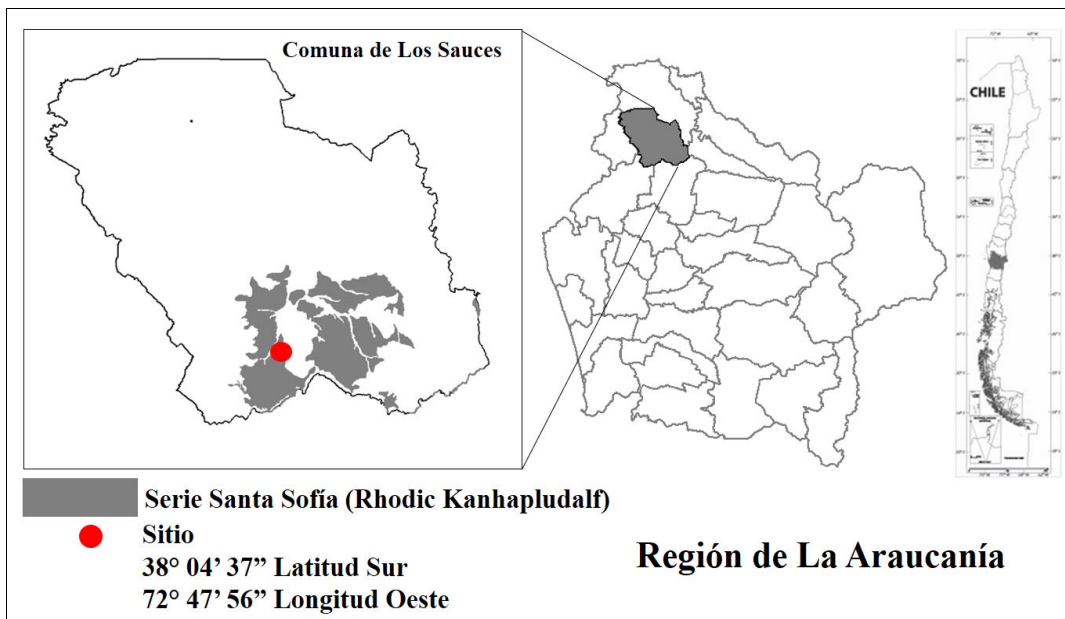


Fig. 2. Ubicación sitio. Comuna de Los Sauces. Región de La Araucanía.

Fig. 2. Site location. Commune of Los Sauces. Araucanía Region.

Tabla 1. Característica física suelo del sitio experimental.
Table 1. Soil physical characteristics of the experimental site.

	Profundidad (cm)		
	0-20	20-30	30-50
MO (%)	3,9	1,5	1,2
Arena 0,05-2 (mm) (%)	55,2	48,6	40,5
Limo 0,002-0,05 (mm) (%)	24,1	16,0	16,2
Arcilla <0,002 (mm) (%)	20,7	35,4	43,3
(a) CC 33 kPa (%)	16,7	19,5	22,8
(b) PMP 1500 kPa (%)	8,5	13,6	15,8
Humedad aprovechable (a-b)	8,2	5,9	7,0
Clasificación Textural USDA	Franco Arcillo Arenoso	Arcillo arenoso	Arcilloso
Leyenda	FAa	Aa	A
Da (g cm ⁻³)	1,45	1,45	1,55
(1) Porosidad total (%)	45,3	45,3	43,4
(2) Macroporos (%)	21,0	17,0	9,1
(3) Microporos (%)	24,28	28,26	34,27

MO: Materia orgánica (%). Da: Densidad aparente. CC: Capacidad de campo PMP: Punto de Marchitez Permanente.

Tabla 2. Características químicas del suelo * (2015).
Table 2. Chemical characteristics of the soil* (2015).

Elemento	Unidad	Valor
MO	%	3,9
pH	H ₂ O	5,3
pH	C _a Cl ₂	4,4
Ca	cmol (+) / kg	3,2
Mg	cmol (+) / kg	0,8
Na	cmol (+) / kg	0,1
K	cmol (+) / kg	0,6
SB	cmol (+) / kg	4,7
Al int.	cmol (+) / kg	0,4
CICE	cmol (+) / kg	5,1
Sat. Al+	%	7,5
P	ppm	11
Cu	ppm	6,5
Fe	ppm	60,6
Mn	ppm	125,4
Zn	ppm	1,7
B	ppm	0,4
S	ppm	1
N	ppm	18

*Profundidad de muestreo entre 0-25 cm.

Subsolado 2016

El 2016 se utilizó un subsolador de fabricación local de 5 puntas rígidas con una capacidad de penetración efectiva máxima de 50 cm durante el otoño para romper la capa compactada. Se usó como indicador el índice de cono IC (kPa) determinado con un penetrómetro-datalogger con un cono en el extremo de 12,8 mm de diámetro (Field Scout SC 900 Soil Compaction Meter); proporcionando

lecturas cada 2,5 cm de profundidad hasta los 45 cm de inserción (Alakukku, 1996; Terminiello et al., 2000). Los muestreos se realizaron con suelo en condiciones de capacidad de campo (24 horas luego de una lluvia efectiva), evitando el exceso de humedad; se repitió la medición todos los años en el mes de agosto con suelo con humedad adecuada siendo esto determinado mediante el método gravimétrico.

Con el fin de comprobar si existía un efecto real del subsolado, en cuanto a alterar el grado de compactación del suelo, se realizó un ensayo donde se demarcaron parcelas experimentales de 6 por 15 metros con 3 repeticiones en dos tratamientos “Con subsolado” y “Sin subsolado”; luego fueron sembradas con avena, variedad Supernova-INIA, con una fertilización ajustada al análisis de suelo (150 u N ha⁻¹, 100 u P₂O₅ ha⁻¹, 50 u K₂O ha⁻¹, 41 u MgO ha⁻¹, 14,5 u S ha⁻¹ y 45 u CaO ha⁻¹). El diseño experimental, para esta etapa del ensayo, fue bloques divididos; se analizó la normalidad (Kolmogórov-Smirnov) y homogeneidad de varianzas (Levene) de los resultados previo al análisis de diferencia de medias mediante Tukey ($p \leq 0,05$).

Posteriormente, el espacio de las parcelas “Con subsolado” fue utilizado como sitio de seguimiento para las mediciones de IC (kPa) en el perfil desde t_1 a t_5 . Para evaluar los cambios en el perfil se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney comparando los valores (kPa) de manera paralela entre los tramos de profundidad cada 2,5 cm, de 0 a 45 cm entre el valor diagnóstico (t_0) y el valor anual o de la temporada elegida (t_1 a t_5) para determinar diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Se describe la secuencia anual según la Tabla 3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diagnóstico (t_0)

El diagnóstico realizado el 2015 de IC (kPa) (t_0) indica una capa compactada a partir de 22,5 cm y de manera continua en profundidad considerando el valor de referencia igual y mayor a 2000 kPa, a partir del cual, es inhibido el crecimiento adecuado de las raíces de acuerdo a la especie (Varsa et al., 1997; Goodman y Ennos, 1999; Benjamin et al., 2003). A partir del diagnóstico, se utilizó el subsolador ajustado a una profundidad de trabajo de 45 cm para cubrir el perfil de seguimiento. El perfil de diagnóstico (IC/Profundidad) se presenta en la Fig. 3.

Efecto del subsolado (t_1)

El uso del subsolador (t_1) provocó un incremento del rendimiento de grano de avena en el tratamiento “Con subsolado” ($5,69 \pm 0,64$ t ha⁻¹) de un 14,9 % sobre el rendimiento del tratamiento “Sin subsolado” ($4,95 \pm 0,82$ t ha⁻¹) evidenciando el efecto del implemento en ese periodo (Fig. 4). Al respecto, varios autores señalan un incremento de la productividad, ya sea como grano o biomasa, luego de subsolar un terreno compactado; al respecto, Braim et al. (1984) señalan un incremento rendimiento de grano de cebada en un 12%, junto con un incremento en el número de granos, mayor volumen y profundización radical en un suelo franco arcilloso; por su parte Sojka et al. (1997) indican un aumento en el rendimiento de avena forrajera en 17,6% en MS en un suelo Mollisol (Typic Haplaquoll); asimismo, señala un incremento de rendimiento en el cultivo de girasol con mayor calidad y rendimiento de aceite, y mayor tamaño en la semilla en un Ultisol (Typic Paleudults) luego del subsolado (Sojka, 1990).

El incremento del rendimiento en los cultivos producto del subsolado ha sido mencionado por Adeoye y Mohamed-Saleem (1990), quienes le atribuyen a una serie de beneficios inmediatos al suelo como incremento en la tasa de infiltración y menor pérdida por escorrentía, aumento en la tasa de recarga del perfil produciendo un mayor contenido de humedad útil y por ende un efecto directo en el rendimiento; de igual forma, varios autores indican que el subsolador es una práctica altamente conveniente para mejorar las condiciones de infiltración de agua, la realización de un manejo conservacionista del suelo al ser una labor vertical y no invertir el suelo, y para el establecimiento de especies susceptibles de ser afectadas por la compactación (Mukhtar et al., 1985; Atwell, 1988; López-Fando y Prado, 2012; Mera et al., 2016).

Persistencia del efecto del subsolado y contrastes (t_0 , t_1 - t_5)

Según Tabla 4, se indican las distintas lecturas de IC (kPa) en las temporadas sucesivas al

Tabla 3. Secuencia anual en el sitio experimental.
Table 3. Annual sequence at the experimental site.

Año	Indicativo	Detalle	Muestreo IC (kPa)
2015	t_0	Diagnóstico del grado de compactación	Junio
2016	t_1	Tratamiento Con y Sin subsolado y siembra de avena	Agosto
2017	t_2	Cosecha avena (verano) y posterior uso para pastoreo	Agosto
2018	t_3	Uso para pastoreo extensivo sin control de carga animal	Agosto
2019	t_4	Uso para pastoreo extensivo sin control de carga animal	Agosto
2020	t_5	Uso para pastoreo extensivo sin control de carga animal	Agosto

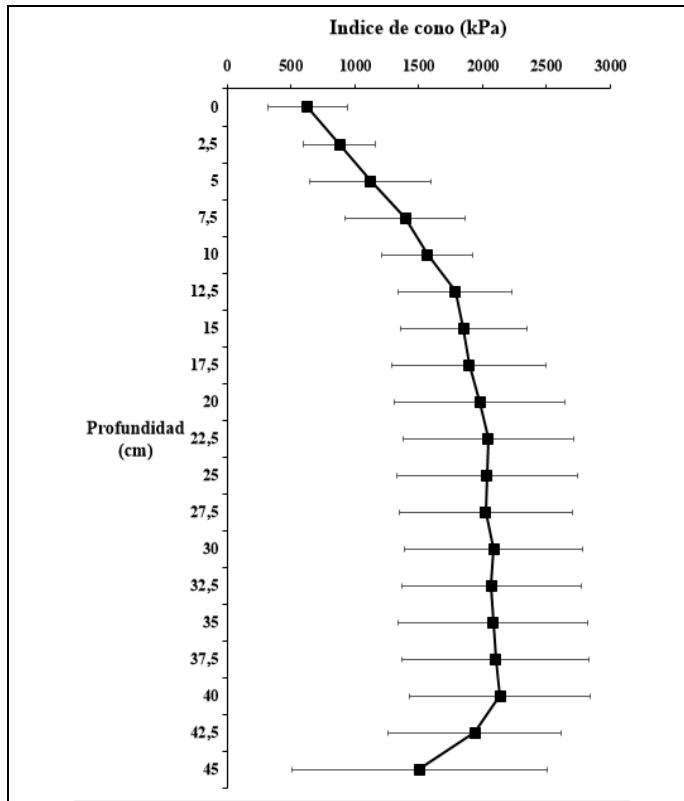


Fig. 3. IC (kPa) año 2015.

Fig. 3. IC (kPa) year 2015.

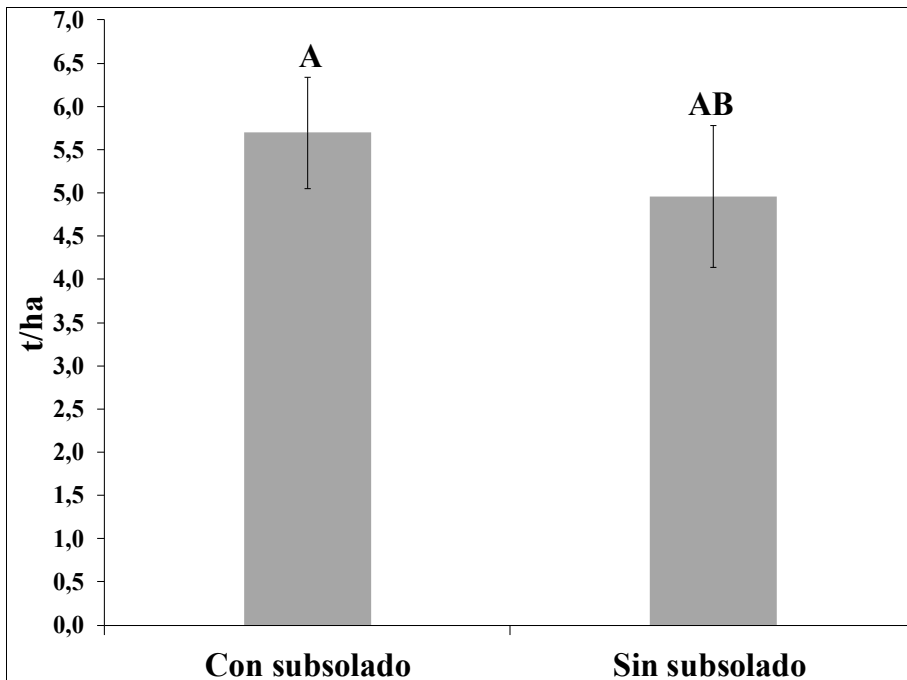


Fig. 4. Rendimiento obtenido en los tratamientos "Con subsolado" y "Sin subsolado" en la temporada 2016-2017.

Fig. 4. Yield for the treatments "Subsoiling" and "No subsoiling" in the 2016-2017 season.

Tabla 4. Variaciones en kPa entre t₀ y las temporadas siguientes (t₁, t₂, t₃, t₄, t₅).
Table 4. Variations in kPa between t₀ and the following seasons (t₁, t₂, t₃, t₄, t₅).

Profundidad (cm)	2015 t ₀			2016 t ₁			2017 t ₂			2018 t ₃			2019 t ₄			2020 t ₅		
	\bar{x}	D.E.	C.V.	\bar{x}	D.E.	C.V.	\bar{x}	D.E.	C.V.	\bar{x}	D.E.	C.V.	\bar{x}	D.E.	C.V.	\bar{x}	D.E.	C.V.
0	272	± 98	36,0	1035	± 638	61,6	337	± 198	58,8	1363	± 372	27,3	1055	± 537	50,9	1690	± 447	26,4
2,5	491	± 146	29,7	1415	± 619	43,7	741	± 331	44,7	1768	± 214	12,1	1521	± 406	26,7	2163	± 375	17,3
5	617	± 503	81,5	1909	± 523	27,4	1318	± 319	24,2	1829	± 273	14,9	1674	± 363	21,7	2238	± 251	11,2
7,5	644	± 451	70,0	1733	± 350	20,2	1397	± 339	24,3	1857	± 388	20,9	1623	± 295	18,2	2150	± 253	11,8
10	1123	± 514	45,8	1809	± 482	26,6	1444	± 334	23,1	1857	± 294	15,8	1558	± 289	18,5	2066	± 276	13,4
12,5	1848	± 478	25,9	1940	± 773	39,8	1540	± 394	25,6	1873	± 370	19,8	1682	± 406	24,1	2088	± 386	18,5
15	2430	± 644	26,5	2139	± 947	44,3	1528	± 412	27,0	2001	± 604	30,2	1739	± 470	27,0	2099	± 510	24,3
17,5	2641	± 534	20,2	1903	± 1277	67,1	1687	± 470	27,9	2129	± 777	36,5	1714	± 512	29,9	2263	± 640	28,3
20	2703	± 496	18,3	2243	± 1341	59,8	1807	± 365	20,2	2127	± 820	38,6	1952	± 616	31,6	2361	± 671	28,4
22,5	2618	± 437	16,7	2754	± 1418	51,5	1941	± 436	22,5	2121	± 763	36,0	2182	± 603	27,6	2412	± 726	30,1
25	2799	± 507	18,1	3686	± 582	15,8	2012	± 506	25,1	2155	± 747	34,7	2303	± 630	27,4	2469	± 712	28,8
27,5	2982	± 720	24,1	4080	± 267	6,5	2040	± 531	26,0	2318	± 866	37,4	2386	± 609	25,5	2610	± 522	20,0
30	3074	± 802	26,1	3749	± 364	9,7	2147	± 464	21,6	2565	± 821	32,0	2477	± 509	20,5	2705	± 429	15,9
32,5	3036	± 822	27,1	2507	± 1326	52,9	2148	± 468	21,8	2788	± 604	21,7	2528	± 493	19,5	2767	± 420	15,2
35	2893	± 548	18,9	3812	± 466	12,2	2179	± 397	18,2	2841	± 471	16,6	2597	± 490	18,9	2833	± 423	14,9
37,5	2772	± 263	9,5	3899	± 449	11,5	2264	± 452	20,0	2947	± 484	16,4	2713	± 477	17,6	2888	± 447	15,5
40	2829	± 235	8,3	3812	± 500	13,1	2260	± 472	20,9	2987	± 487	16,3	2779	± 469	16,9	2887	± 476	16,5
42,5	2850	± 164	5,8	3553	± 345	9,7	2258	± 469	20,8	2915	± 429	14,7	2808	± 433	15,4	2879	± 505	17,5
45	2990	± 163	5,5	3468	± 466	13,4	2267	± 465	20,5	2771	± 454	16,4	2814	± 422	15,0	2823	± 464	16,4

\bar{x} = Promedio, D.E. Desviación estándar, C.V. Coeficiente de variación (%).

subsolado en el perfil 0-45 cm y sus variaciones.

Según la Tabla 5, existieron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en IC (kPa) entre la lectura inicial (2015, t_0) y las siguientes temporadas. Al respecto, en t_1 , existieron diferencias de 0-10 cm, no así el resto de las profundidades a excepción de variaciones a los 25 a 27,5 cm y de 37,5 a 42,5 cm; en t_2 existieron diferencias significativas en todo el perfil (0-45 cm) a excepción de variaciones en entre 0-2,5 cm y 12,5 cm. En t_1 y t_2 las lecturas en IC (kPa) tienen un comportamiento disímil entre ambos años. En años posteriores (t_3 , t_4 , t_5) existieron diferencias significativas entre 0-25 cm (t_3), manteniéndose esta variabilidad de 0-20 (t_4) y luego limitándose al tramo de 0-10 cm (t_5) del perfil.

Variaciones en el valor IC (kPa) post-solado

Según Tabla 6, las lecturas de IC (kPa) en periodos posteriores al subsolado (t_1 - t_5 , 2016-2020), respecto al instante del diagnóstico (t_0), se caracterizan por cambios en tramos de profundidad del perfil de seguimiento. Se incrementaron los valores % IC (kPa) de manera sostenida en la media del tramo 0-10 cm con un incremento promedio de 185% entre los años 2016-2020 (t_1 - t_5); asimismo en el tramo 12,5-35 cm existió una disminución media de -13% y de 37,5-45 cm un incremento de 2%. Cabe indicar

que el perfil tiene distinto contenido de arcilla incrementándose de 20,7 a 35,4% entre el tramo de 0-30 cm a 43,3% en el tramo 30-50 cm lo cual incide en la respuesta del suelo ante la acción mecánica ejercida por el subsolador.

En el periodo t_2 - t_5 el sitio fue utilizado para pastoreo extensivo sin control de carga con un efecto en el estrato superior del perfil (0-10 cm); al respecto, varios autores señalan que la pezuña del ganado genera presión sobre el suelo, que sumado a una condición de humedad, produce un fenómeno de amasamiento y la generación de material densificado en los primeros centímetros como compactación superficial (Ellies et al., 1993; Pierce et al., 1992; Geissen et al., 2009; San Martín et al., 2009).

De acuerdo con lo anterior, la re-consolidación paulatina del suelo y disminución del efecto del subsolado en el tiempo son fenómenos mencionados por varios autores; López-Fando et al. (2007) indican que el efecto residual del subsolador y los indicadores de calidad física en un Alfisol (Haploxeralf cálcico), en una zona semiárida (400 mm año⁻¹), disminuyen prácticamente el segundo año; por su parte Pierce et al. (1992), señalan mejoras en rendimiento del cultivo en un suelo franco arenoso (Typic Hapludalf) luego de utilizar subsolador, con un efecto residual que disminuye luego de 2 años;

Tabla 5. Significancia estadística entre t_0 y las temporadas siguientes (t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5).
Table 5. Statistical significance between t_0 and the following seasons (t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5).

Profundidad (cm)	2015 t_0 / 2016 t_1	2015 t_0 / 2017 t_2	2015 t_0 / 2018 t_3	2015 t_0 / 2019 t_4	2015 t_0 / 2020 t_5
0	0,031	0,533	0,000	0,001	0,000
2,5	0,002	0,052	0,000	0,000	0,000
5	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
7,5	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,005	0,040	0,001	0,004	0,000
12,5	0,970	0,053	0,924	0,273	0,338
15	0,344	0,000	0,026	0,002	0,257
17,5	0,107	0,000	0,011	0,000	0,138
20	0,282	0,000	0,027	0,005	0,257
22,5	0,770	0,000	0,041	0,072	0,532
25	0,011	0,000	0,021	0,058	0,172
27,5	0,007	0,001	0,103	0,024	0,184
30	0,179	0,001	0,150	0,041	0,241
32,5	0,588	0,003	0,681	0,140	0,736
35	0,066	0,001	0,933	0,366	0,784
37,5	0,017	0,005	0,155	0,857	0,841
40	0,016	0,003	0,303	0,873	0,960
42,5	0,020	0,006	0,529	0,913	0,616
45	0,157	0,006	0,297	0,246	0,316

Prueba U de Mann-Whitney, significancia $p \leq 0,05$.

Tabla 6. Variabilidad (%) de incremento o detrimento en kPa de respuesta por temporada (t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5) en referencia a la situación pre-subsolado (t_0).**Table 6. Increase or decrease (% variability) in kPa response per season (t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5) with respect to pre-subsoiling (t_0).**

Profundidad (%)						Promedio
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	(t_1 - t_5)
0	244	24	401	288	521	295
2,5	188	51	260	210	341	210
5	209	114	196	171	263	191
7,5	169	117	188	152	234	172
10	61	29	65	39	84	56
12,5	5	-17	1	-9	13	-1
15	-12	-37	-18	-28	-14	-22
17,5	-28	-36	-19	-35	-14	-27
20	-17	-33	-21	-28	-13	-22
22,5	5	-26	-19	-17	-8	-13
25	32	-28	-23	-18	-12	-10
27,5	37	-32	-22	-20	-12	-10
30	22	-30	-17	-19	-12	-11
32,5	-17	-29	-8	-17	-9	-16
35	32	-25	-2	-10	-2	-1
37,5	41	-18	6	-2	4	6
40	35	-20	6	-2	2	4
42,5	25	-21	2	-1	1	1
45	16	-24	-7	-6	-6	-5

asimismo, Busscher et al. (1986) indican un efecto residual del subsolado y cincelado escaso en un Ultisol (Typic Paleudult), aumentando el IC (kPa) paulatinamente, llegando a una efectividad de un año.

CONCLUSIONES

El uso del subsolador, como implemento para descompactar el suelo, incrementó el rendimiento del cultivo de avena en el primer año de uso (t_1) en comparación al sitio donde no se utilizó.

El Índice de Cono (kPa), medido anualmente, tuvo lecturas variables y distintas en el perfil de seguimiento (0-45 cm), diferenciándose el grado de respuesta al efecto del subsolado por tramos de profundidad y no de manera uniforme; esto es atribuible a la respuesta diferenciada por cada estrato del perfil del suelo.

Bajo las condiciones descritas, el contraste entre las lecturas de IC (kPa) posteriores al subsolado (t_1 - t_5) y el diagnóstico (t_0) muestran que el efecto del subsolado se presenta de manera significativa hasta el segundo año (2017, t_2), no existiendo efecto posterior a excepción de alteraciones esporádicas y en el perfil superficial de 0-10 cm, siendo esto último atribuible a la exposición al medio de esta capa, en este caso, la acción del tránsito de ganado.

LITERATURA CITADA

- Adeoye, K.B., and M.A. Mohamed-Saleem. 1990. Comparison of effects of some tillage methods on soil physical properties and yield of maize in a degraded ferruginous tropical soil. *Soil and Tillage Research* 18 (1):63-72.
- AGRIMED. 2017. Atlas Agroclimático de Chile. Estado Actual y tendencias del clima. Regiones del Biobío y de La Araucanía. Proyecto Centro AGRIMED, Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile - Fundación para la Innovación Agraria. Tomo IV.72 p.
- Alakukku, L.1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II Short-term effects on the properties of clay and organic soil. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, Netherlands 37: 211-222.
- Atwell, J. 1988. Physiological responses of lupin roots to soil compaction. *Plant and Soil* 111(2):277-281.
- Benjamin, J., D. Nielsen, and M. Virgil.2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116:137-148.

- Blake, G.R.2008. Particle density. In: Chesworth W. (eds) Encyclopedia of Soil Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_406
- Braim M., K. Chaney, and D. Hodgson D. 1984. Preliminary investigation on the response of spring barley (*Hordeum sativum*) to soil cultivation with the 'paraplow'. *Soil and Tillage Research* 4(3):277-293.
- Busscher, W., R. Sojka, and C. Doty.1986. Residual effects of tillage on coastal plain soil strength. *Soil Science* 141:144.
- CIREN, 2002. Estudio agrológico IX Región. Descripciones de suelos: Materiales y símbolos. Publicación N°122. 343 p.
- Ellies, A., C. Ramírez, R. Mac Donald, y H. Figueroa. 1993. Modificaciones estacionales en la distribución del espacio poroso por tamaño en un suelo sometido a variado uso forestal. *Bosque* 14(2):31-35.
- Geissen, V., R. Sanchez-Hernandez, C. Kampichler, R. Ramos-Reyes, A. Sepúlveda-Lozada, and S. Ochoa-Goana. 2009. Effects of land-use change on some properties of tropical soils - An example from Southeast Mexico. *Geoderma* 151(3-4):87-97.
- Goodman A. and Ennos A. 1999. The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanicals of the root systems of sunflower and maize. *Annals of Botany* 83:293-302.
- López-Fando, C. and M. Pardo. 2012. Use of a partial-width tillage system maintains benefits of no-tillage in increasing total soil nitrogen. *Soil and Tillage Research* 18:32-39.
- López-Fando, C., J. Dorado, and M. Pardo. 2007. Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain. *Soil and Tillage Research* 95:266-276.
- Luzio, W., M. Casanova y O. Seguel. 2009. Suelos de Chile. Universidad de Chile. 229 p.
- Mera, M., J. García y J. Alcalde. 2016. Capítulo 3. Establecimiento de lupino. En: Lupino dulce y amargo producción en Chile. *Boletín INIA* 326. ISSN: 0717-4829. 122 p.
- Mostacedo, B. y F. Fredericksen. 2000. Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOS). Santa Cruz, Bolivia. 87 p.
- Mukhtar, S., J. Baker, R. Horton, and D. Erbach.1985. Soil water infiltration as affected by the use of the paraplow. *Trans. ASAE*. 28:1811-1816.
- Pierce, J., C. Fortin, and J. Staton. 1992. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. *Soil and Tillage Research* 30:149-165.
- Rojas, C., A. Catrileo y R. Campillo.1993. Sistema de cría y engorda con novillos cruzas de Holstein por frisonas negras, integrado a una sucesión de cultivos en el valle de la IX Región. *Agricultura Técnica (Chile)* 53(3): 225-235.
- Romero, O. y C. Rojas. 1996. La pradera en el secano interior de la IX Región (Malleco-Cautín). Capítulo 31. En: Praderas para Chile. Segunda Edición. 563-578 p.
- Rouanet, J. 1982. Aéreas agroecológicas determinantes del sistema de producción agropecuario. *Investigación y Progreso Agropecuario Carillanca* (1):17-21.
- Sandoval, M., J. Dörner, S. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile, N° 50. 80 p.
- San Martín, C., J. Villagra, y C. Novoa. 2009. Comparación de manejos pratenses del centro-sur de Chile utilizando valores bioindicadores de Ellenberg. *Gayana Botánica* 66(2), 158-170. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432009000200004>
- Schlatter, J., R. Grez, y V. Gerding.2003. Manual para reconocimiento de suelos. 3a Edición. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 114 p.
- Sojka, R., W. Busscher, D. Gooden, and W. Morrison. 1990. Subsoiling for Sunflower Production in the Southeast Coastal Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1107-1112.
- Sojka, R., D. Horne, C. Ross, and C. Baker. 1997. Subsoiling and surface tillage effects on soil physical properties and forage oat stand and yield. *Soil and Tillage Research* 40(3-4): 125-144.
- Terminiello, A., R. Balbuena, J. Claverie, y J. Casado. 2000. Compactación inducida por el tránsito vehicular sobre un suelo en producción hortícola. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4(2):290-293.
- Varsa, E., S. Chong, J. Abolaji, D. Farquhar, and F. Olsen.1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil and Tillage Research* 43 (1):219-228.