

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE UN ANDISOL SOMETIDO A DISTINTOS METODOS Y PROFUNDIDADES DE INCORPORACIÓN DE RASTROJO EN EL SUELO

ASSESSMENT OF THE STRUCTURAL PROPERTIES OF AN ANDISOL UNDER DIFFERENT METHODS AND DEPTHS OF STUBBLE INCORPORATION INTO THE SOIL

Tomas Bustos^{1a}, Dorota Dec^{1b,2}, Susana Valle^{1c,2}, John Clunes^{1d,2} y José Dörner^{1e,2*}

^{1a} Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile

^{1b} Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile
<http://orcid.org/0000-0002-6113-3953>

^{1c} Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile
<http://orcid.org/0000-0002-9599-0080>

^{1d} Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile
<http://orcid.org/0000-0002-2357-5523>

^{1e} Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile
<http://orcid.org/0000-0003-4016-2875>

² Centro de Investigación en Suelos Volcánicos, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile

* Autor de correspondencia: josedorner@uach.cl

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar los cambios en propiedades estructurales de un Andisol, como respuesta a la incorporación de rastrojo de avena (*Avena sativa*) entre postcosecha y pre-siembra, con tres equipos mecánicos. Los equipos empleados para la incorporación fueron: Púas (P), Discos (D), y Patas y Doble Discos Alternados (PD). La unidad experimental en cada caso fue de 1 ha y una parcela control (C) de 0,25 ha, sin incorporación. Para la evaluación de los tratamientos se colectaron muestras de suelo con cilindros antes y después de la incorporación de rastrojo. Los tratamientos P, D y PD presentaron cambios positivos en capacidad de aire (CA) y conductividad de aire 60 hPa (KI) en la profundidad de 5 a 10 cm, con respecto a los medidos en la parcela control (C). Sólo el contenido de agua disponible para las plantas (PAWC) fue mayor en C. En la profundidad de 20 a 25 cm, los efectos de incorporación fueron negativos. El coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) disminuyó en los tratamientos con incorporación de rastrojo, mientras que la CA aumentó en todos los tratamientos. Se concluyó que, durante el corto periodo transcurrido antes de la evaluación, el método de incorporación no produjo cambios significativos, pero sí se mejoraron algunas propiedades de la estructura suelo.

Palabras clave: Incorporación de rastrojo, Andisol, propiedades estructurales.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the changes in soil structural properties of an Andisol as a result of the incorporation of oat (*Avena sativa*) stubble between post-harvest and presowing, using three types of mechanical equipment. The following pieces of equipment were used for stubble incorporation: tines (P), discs (D), and alternating shanks and double discs (PD). The experimental unit in each treatment was 1 ha, while a control plot (C) of 0.25 ha (no stubble incorporation) was also included. For the evaluation of the treatments, soil samples were collected with cylinders before and after stubble incorporation. Treatments P, D and PD showed positive changes in air capacity (AC) and air conductivity 60 hPa (KI) at a depth of 5-10 cm, with respect to values observed in the control plot (C). Only plant available water content (PAWC) was higher in C. Stubble incorporation had negative effects at a depth of 20-25 cm. The coefficient of linear extensibility (COLE) decreased in the treatments with stubble addition, while AC increased in all the treatments. It was concluded that, during the short period before the evaluation, the incorporation method did not produce significant changes, but some soil structural properties were improved.

Keywords: Stubble incorporation, Andisol, structure properties.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales estrategias para aumentar la producción de cereales en el mundo, es el aumento de la productividad mediante la intensificación sostenible del uso de suelos agrícolas (Sichls et al., 2019). La producción sostenible de los cultivos agrícolas está fuertemente influenciada por la adecuada funcionalidad física del suelo (e.g., suelos profundos con volumen de agua aprovechable cercano a 20% y una capacidad de aire mayor de 10%; Reynolds et al., 2009), la que, al mismo tiempo, está estrechamente relacionada con la estructura del suelo y las propiedades de almacenamiento y transporte de agua, gas y nutrientes (Horn y Kutilek, 2009). Por su parte, la estructura del suelo, definida como la organización espacial de las partículas, agregados y poros del suelo en diferentes escalas de tamaño y forma, cumple un rol fundamental en el control de procesos tales como la regulación de agua y el intercambio de gases y calor con la atmósfera (Rabot et al., 2018).

La perturbación externa de las propiedades dependientes de la estructura del suelo (e.g., tránsito animal, labranza de suelo), puede modificar significativamente algunas características del suelo. Entre ellas, (i) la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo, que se determina desde la curva de retención de agua; dicha curva permite evidenciar como el tipo de labranza modifica la distribución del tamaño de poros y, por ende, la disponibilidad de agua y aire para las plantas (Vásquez et al., 2012; Ordóñez et al., 2018; Dec et al., 2021); y, (ii) la permeabilidad al aire, asociada al tamaño e interconexión entre los poros del suelo, un indicador de la capacidad del suelo para transportar fluidos (Dörner et al., 2012; Navarro et al., 2017; Haas et al., 2018). Por

lo tanto, las propiedades del suelo que dependen de aspectos geométricos del sistema poroso (porosidad total y su distribución, continuidad, tortuosidad e interconexión entre los poros; Bear, 1972; Hillel, 1998) permiten evaluar el efecto del manejo agrícola sobre la estructura del suelo.

La macro-zona sur de Chile concentra la mayor producción de cereales del país y, por ende, genera la mayor cantidad de rastrojos derivados de la producción agrícola (Ruiz, 2015). Esta macro-zona está dominada por suelos derivados de materiales volcánicos, que constituyen cerca del 60% de los suelos arables del país (Tosso, 1985). Los suelos volcánicos son conocidos localmente como Trumaos (Andisoles; Luzio, 2010) y se caracterizan por presentar baja densidad aparente ($< 0,9 \text{ Mg m}^{-3}$; Dörner et al., 2010), alto contenido de carbono orgánico (Matus et al., 2014; Zúñiga et al., 2015). Presentan un sistema poroso interconectado y continuo cuando esta estructurado (Decalzi et al., 2018), lo que les confiere elevada capacidad de almacenar agua y nutrientes (Dörner et al., 2015; Clunes et al., 2021), alta capacidad de contracción (Dörner et al., 2012), y elevada conductividad hidráulica saturada (Dec et al., 2017).

Por la alta producción de rastrojo que genera la producción de cereales en estos suelos, resulta fundamental realizar un manejo sustentable de los suelos volcánicos (Dörner et al., 2020). En el caso particular de este trabajo se trata de evaluar el efecto que tiene el empleo de diferentes tipos de máquinas para incorporar rastrojo (con distinto peso y forma de incorporación), en las propiedades asociadas a la estructura del suelo (Bustos et al., 2021). El propósito específico de esta investigación fue cuantificar y analizar los cambios en propiedades dependientes de la estructura del suelo en las profundidades de 5 a 10 cm y 20 a 25 cm, como consecuencia del uso

de diferentes incorporadoras de rastrojo en las labores de postcosecha y pre-siembra.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se condujo en un predio perteneciente a Semilleros Tecnológico SEK^{MR}, ubicado a 18 km de la ciudad de Valdivia, Chile. El suelo corresponde a un Eutric Fulvudands (Andisol), que se caracteriza por ser profundo, bien drenado, de textura franco limosa, con 12% de carbono orgánico en los primeros 10 cm y densidad aparente de 0,7 g cm⁻³ (CIREN, 2003).

Se establecieron cuatro parcelas (3 parcelas con manejo de rastrojo de 1 ha y la parcela Control de 0.25 ha), en un área que había sido sembrada previamente con avena (*Avena sativa*), la que fue cosechada por medio de una trilladora. En paralelo al paso de la trilladora, la paja de la avena fue cosechada por medio de una rotoenfardadora emboladora, quedando entre 8,8 y 3,8 ton ha⁻¹ sobre la superficie del suelo debido a la topografía del lugar (Bustos et al., 2021). Una vez cosechado la avena (30 de enero de 2018), la paja fue picada e hilerada para su posterior incorporación. El rastrojo fue incorporado mediante tres operaciones. La primera se realizó entre el 21 y 25 de febrero de 2018 y la segunda y tercera 15 y 30 días después, respectivamente. Los tratamientos consistieron en el tipo del equipo de incorporación del rastrojo: provisto de púas (P), provisto de discos (D) y un tercero provisto de patas y doble discos alternados (PD) (Tabla 1).

Para una descripción detallada de las condiciones agroclimáticas, establecimiento de

parcelas experimentales y labores agronómicas consultar Bustos et al. (2021).

Caracterización general del suelo

Para evaluar la condición inicial del suelo de cada tratamiento, se recolectaron muestras disturbadas en la profundidad de 0 a 20 cm. Las determinaciones realizadas fueron: contenido de carbono orgánico (método de digestión húmeda de Walkley-Black), densidad de partículas y densidad aparente (Forsythe, 1974). Además, se determinó la textura del suelo (Day, 1965; Sandoval et al., 2012) para cada parcela en el muestreo de condición inicial. Cada determinación se realizó por triplicado.

Para estudiar las propiedades físicas dependientes de la estructura se recolectaron muestras no disturbadas con cilindros metálicos de 230 cm³ a partir de dos profundidades (5 y 20 cm) del suelo. Estas muestras fueron recolectadas para evaluar la condición inicial y luego de cada una de las incorporaciones realizadas con los distintos equipos lo que da un total de cuatro muestreos. Dada la altura de los cilindros (5 cm), se evaluaron las profundidades de 5 – 10 cm y 20 – 25 cm desde la superficie del suelo. Las muestras recolectadas en terreno, fueron almacenadas en cámara de frío a 4 °C, hasta el momento de su análisis correspondiente.

Curva de retención de agua

Se determinó la curva de retención de agua de los suelos de cada parcela en ambas profundidades para los cuatro muestreos en el tiempo. Los cilindros de suelo no disturbado se

Tabla 1. Descripción de tratamientos utilizados en el estudio.

Table 1. Description of the treatments used in the study.

Tratamiento	Peso (kg)	Ancho de trabajo (m)	Rango profundidad de trabajo (cm)	Implementos de incorporación
Sin incorporación (C), todo el residuo fue retirado	-	-	-	-
Incorporación de rastrojo mediante púas (P)	1600	4,80	5-20	37 púas
Incorporación de rastrojo mediante discos (D)	1480	2,5	5-20	32 discos
	5800	5,0	5-20	40 discos
Incorporación de rastrojo mediante patas y doble discos alternados (PD)	3225	4,0	5-20	9 patas
				4 pares de discos

colocaron en bandejas y se procedió a saturarlos por ascenso capilar agua durante dos días incorporando agua en la bandeja mediante el uso de dispensadores controlados. Una vez alcanzada la saturación del suelo, se procedió a drenarlas mediante el método de succión por columna de agua colgante a: 10, 20, 30 y 60 hPa en bandejas de arena. Para tensiones mayores se usaron ollas de presión en donde se equilibraron las muestras a 150 y 330 hPa en platos cerámicos (Dörner y Dec, 2007). Después de retirar las muestras de las ollas a presión, éstas se sometieron a un aumento sucesivo de temperatura por 9 días, 20 °C (2 días), 25 °C (2 días), 30 °C (2 días), 65 °C (2 días) y 105 °C (1 día). Para el volumen de poros finos (< 2 µm) se ensamblaron cilindros de 20 cm³ utilizando muestras de suelos tamizadas a 2 mm, las que se saturaron por dos días y enrasaron al nivel del cilindro, para finalmente drenarlas a una tensión de 15000 hPa en platos de presión (Hartge y Horn, 2009). Luego, a los suelos correspondientes a las diferentes tensiones, se le registró la masa para obtener el contenido volumétrico de agua, con una balanza electrónica (Precisa 1000C-3000D, 0,01 de precisión).

Para corregir la curva de retención de agua por efecto del estrés hidráulico se midió la contracción de las muestras durante el proceso de secado con un profundímetro electrónico (Vernier Caliper, 0,01mm precisión), en cinco puntos diferentes del cilindro. Además, en las muestras sometidas entre 30 y 330 hPa de tensión, a 20 °C, se les midió la conductividad de aire (KI) con un flujómetro de aire (Dörner y Horn, 2006), en los dos primeros días. Concluido este procedimiento las muestras fueron secadas a 105 °C por 24 horas en un horno. Con la información generada se determinó la densidad aparente, el contenido volumétrico de agua y el índice de poros en cada tensión aplicada corrigiéndola por la deformación vertical del suelo producto de la contracción (Dörner et al., 2010).

Para la evaluación cuantitativa del sistema poroso, se consideró: la capacidad de aire (CA) y el contenido de agua disponible para las plantas (PAWC), parámetros que fueron derivados de la curva de retención de agua (Dörner et al., 2010). Ambos parámetros se calcularon de la siguiente forma:

$$CA = \theta_{(0kPa)} - \theta_{(6kPa)} \quad (1)$$

$$ADP = \theta_{(6kPa)} - \theta_{(1543kPa)} \quad (2)$$

donde, θ : contenido volumétrico de agua (%) en las tensiones mencionadas en las fórmulas (Dörner et al., 2015).

Coefficiente de extensibilidad lineal (COLE)

El COLE define la deformación unidimensional que experimenta el suelo desde que alcanza su punto de saturación, hasta el secado en horno a 105 °C (Dörner et al., 2009).

Se determina a partir de la curva de contracción. El COLE se calculó de la siguiente manera:

$$COLE = \frac{(L_0 kPa - L_{105^\circ C})}{L_{105^\circ C}} \quad (3)$$

donde, L_0 kPa es la altura de la muestra a 0 kPa y $L_{105^\circ C}$ es altura de la muestra después del secado en horno a 105 °C.

Conductividad del aire (KI)

Para su medición se aplicó un diferencial de presión de 1 hPa, que genera un flujo laminar ascendente de aire a través de la muestra de suelo hasta alcanzar un flujo constante (Dörner y Horn, 2006). Se hicieron tres repeticiones, y se registró la temperatura del aire y la presión del aire, lo que permitió el cálculo de la conductividad de aire (KI: conductividad de aire (cm s⁻¹)) por medio de la siguiente ecuación:

$$KI = \rho_1 * g * \left(\frac{\Delta V * L}{\Delta t * \Delta p * A} \right) \quad (4)$$

donde, ρ_1 : densidad de aire (kg m⁻³), g : aceleración de gravedad (m s⁻²), V : volumen de aire que fluye a través del flujómetro (m³), L : largo del cilindro (m), Δt : tiempo (s), Δp : diferencia de presión (hPa), A : área del cilindro (cm²).

A partir de la conductividad de aire (KI) (cm s⁻¹) se calculó la permeabilidad al aire (Ka) por la siguiente fórmula (Dörner y Horn, 2006):

$$Ka = KI * \frac{n}{\rho l * g} \quad (5)$$

donde, n es la viscosidad del aire (g s⁻¹cm⁻¹), ρl es la densidad del aire (kg m⁻³) y g es la aceleración de gravedad (m s⁻¹). Tanto la viscosidad como la densidad del aire son corregidas por la T (°C).

La continuidad de poros se estableció mediante el índice de continuidad propuestos por Groenevelt et al. (1984), y usado por Ball et al. (1988), Dörner y Horn (2006) y Reszkowska et al. (2011). Este índice (C_2) se calcula con base en la relación entre la permeabilidad de aire (Ka) y la capacidad de aire (ϵa) y por la relación entre Ka y ϵa .

$$C_2 = \frac{Ka}{\epsilon a} \quad (6)$$

Análisis estadístico

La evaluación del efecto de la incorporación de rastrojo en los parámetros se realizó haciendo, en primer lugar, la prueba de normalidad de residuales (Test de Shapiro–Wilk) para verificar si la distribución de los datos es normal. Cuando los residuales no presentaron una distribución normal, se realizaron análisis con estadística no paramétrica (prueba de Kruskal-Wallis), para determinar si había diferencias significativas entre medias. Si la distribución era normal, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía para cada factor (tiempo y tipo de incorporación) de manera independiente, debido a la ausencia de interacción. Las diferencias estadísticamente significativas entre las medias ($p < 0,05$) se determinaron mediante el test de Tukey (HSD) con un nivel de confianza de 95%. Los softwares utilizados para los análisis estadísticos y construcción de gráficos fueron GraphPad Prism 8.0, Infostat 7.0, y R 4.0.2 (R Core Team, 2020) usando RStudio 1.3.1017 (RStudio Team, 2020).

RESULTADOS

Descripción de las características generales del suelo

La textura del suelo (0 a 20 cm de profundidad), de las cuatro parcelas experimentales es franco-

limosa (Tabla 2). El contenido de materia MO presentó variaciones con el tiempo transcurrido desde la incorporación y entre los diferentes tratamientos, presentando valores entre 12,3 a 18,3%. Sin embargo, no existió una tendencia clara en función de los tratamientos evaluados.

Cambios en la porosidad del suelo y su distribución por efecto de la incorporación de rastrojos

La densidad aparente (Da) en la profundidad 5 a 10 cm (o 5 cm) no presentó diferencias ($p > 0,05$) entre los tratamientos P, D y PD (Fig. 1). Sin embargo, con el incremento en el número de operaciones de incorporación la Da disminuyó en todos los tratamientos ($p < 0,05$). La Da después de la tercera incorporación, en los tratamientos P, D y PD fue de 0,58, 0,50 y 0,55 g cm^{-3} , respectivamente. En la profundidad 20 a 25 cm (o 20 cm) la Da presentó diferencias entre el tipo de maquinaria empleada para la incorporación ($p < 0,05$) a partir de la segunda operación a diferencia de lo ocurrido en la profundidad 5 a 10 cm. Por otro lado, la Da en la profundidad 20 a 25 cm se mantuvo constante con el número de operaciones ($p > 0,05$).

La porosidad total (PT) en la profundidad 5 a 10 cm no mostró diferencias ($p < 0,05$) entre los tratamientos sino hasta la tercera labor de incorporación, cuando la mediana de CT (69,3%)

Tabla 2. Propiedades físico-químicas para la caracterización del suelo serie Pelchuquín (PQU).
Table 2. Physico-chemical properties for the characterization of the Pelchuquín soil series (PQU).

Tratamiento	Muestreo	Clase textural	ρ_s [g/cm^3]	MO %
Control (C)	Condición Inicial (C.Inicial)		1,72 ± 0,02	15,12 ± 0,15 Aa
	1º Incorporación (1ºIncorp)	Franco	1,72 ± 0,01	17,27 ± 0,69 Bb
	2º Incorporación (2ºIncorp)	limosa	1,79 ± 0,02	15,73 ± 0,17 Ca
	3º Incorporación (3ºIncorp)	FL	1,87 ± 0,08	18,30 ± 0,12 Bb
Púas (P)	C.Inicial		1,85 ± 0,02	14,65 ± 0,11 Ab
	1º Incorp.	Franco	1,80 ± 0,06	14,56 ± 0,06 ABb
	2º Incorp.	limosa	1,93 ± 0,03	13,34 ± 0,20 Aa
	3º Incorp.	FL	1,93 ± 0,04	13,48 ± 0,24 Aa
Discos (D)	C.Inicial		1,85 ± 0,03	15,45 ± 1,47 Aa
	1º Incorp.	Franco	1,75 ± 0,02	14,93 ± 1,64 ABa
	2º Incorp.	limosa	1,91 ± 0,02	14,84 ± 0,50 BCa
	3º Incorp.	FL	1,90 ± 0,06	16,57 ± 0,16 Ba
Patas y discos alternados (PD)	C.Inicial		1,85 ± 0,02	14,70 ± 0,15 Ab
	1º Incorp.	Franco	1,89 ± 0,05	12,36 ± 0,01 Ba
	2º Incorp.	limosa	1,93 ± 0,03	14,28 ± 0,30 ABb
	3º Incorp.	FL	1,83 ± 0,02	14,04 ± 0,77 Aab

ρ_s : densidad de partículas; M.O: materia orgánica. Se presentan valores promedio ± 1 error estándar. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos a un mismo tiempo, y letras minúsculas distintas diferencias en el tiempo en un mismo tratamiento ($p < 0,05$) ($n = 3$).

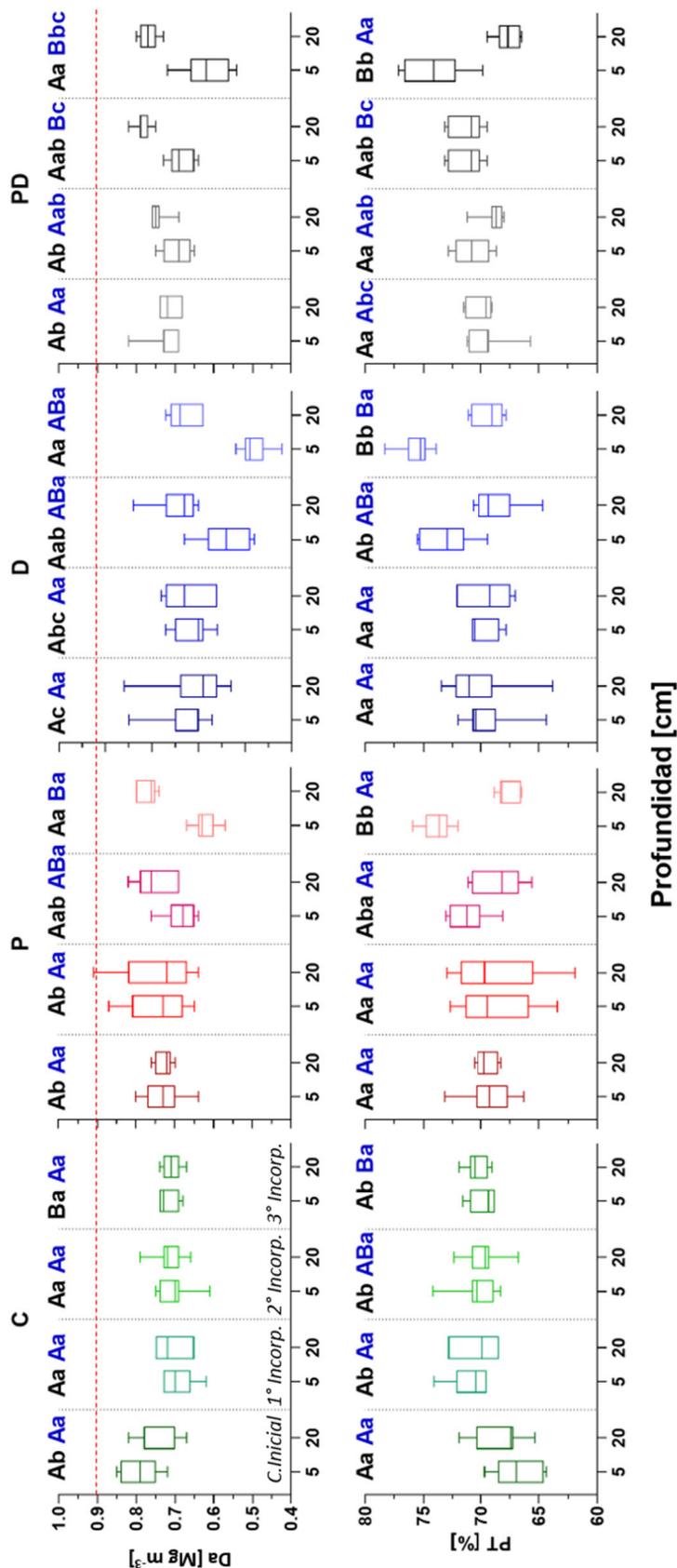


Fig. 1. Densidad aparente (Da) y porosidad total (PT) según diferentes métodos de incorporación de rastrojos: Control (C), Púas (P), Discos (D) y, Patas y Discos Alternados (PD) a 5 – 10 y 20 – 25 cm de profundidad. Para un mismo Figura, p.ej. “C” se presentan los resultados de la Da desde la condición inicial y luego de las incorporaciones de rastrojo para reflejar los cambios en el tiempo de esta propiedad del suelo. Letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a un mismo tiempo, y letras minúsculas distintas indican diferencias en el tiempo en un mismo tratamiento ($p < 0,05$). El color negro corresponde a la profundidad 5 - 10 cm y el color azul corresponde a 20 – 25 cm ($n=7$). Los diagramas de cajas muestran la mediana, percentiles (P_{10} y P_{90}), y límites inferior y superior.

Fig. 1. Bulk density (da) and total porosity (PT) according to different stubble incorporation methods: Control (C), Tines (P), Discs (D) and Alternating Shanks and Discs (PD), at depths of 5 - 10 and 20 - 25 cm. For the same Figure, e.g., ‘C’ the results of Da are presented from the initial condition and after stubble addition to reflect the changes over time in this soil property. Different capital letters indicate statistically significant differences between treatments at a given time, and different lowercase letters indicate differences over time within the same treatment ($p < 0.05$). Black color corresponds to 5 - 10 cm depth, and blue color corresponds to 20 - 25 cm depth ($n=7$). Box plots show median, percentiles (P_{10} and P_{90}), and lower and upper limits.

fue diferente de la mediana de P, D y PD (73,6, 75,3 y 74,1%, respectivamente) (Fig. 1). En general, la PT en el tratamiento C se mantuvo constante (alrededor de 70%); excepto en la medición inicial que presentó diferencias (PT = 66,9%; $p < 0,05$).

Los tratamientos con labranza aumentaron la PT en 4, 4,8 y 4,7 % P, D y PD, respectivamente, conforme se realizaban las sucesivas labores de incorporación en la profundidad de 5 a 10 cm ($p < 0,05$). Las diferencias en PT entre tratamientos solo se observaron en la tercera incorporación ($p < 0,05$). En la profundidad 20 a 25 cm, la PT se comporta de forma diferente entre los tratamientos; mientras en CT aumenta en 3,2 %, en P, D y PD disminuye entre 1,5 a 2%. De los cuatro tratamientos el único que presentó diferencias en la profundidad 20 a 25 cm ($p < 0,05$) fue PD, que disminuyó el PT de 69,6 a 67,6% a medida que transcurría el tiempo.

El suelo de los tratamientos P, D y PD aumentó significativamente ($p < 0,05$) su capacidad de aire (CA) en la profundidad de 5 a 10 cm, entre la primera y la tercera incorporación, de la siguiente manera: 5,6, 8,1 y 10,9%, respectivamente, mientras el CT no mostró cambios de esta variable (Fig. 2). Los tratamientos con labranza, independientemente de su CA inicial, alcanzaron valores de 18% a la tercera incorporación. En tanto, el CT alcanzó un valor de 5,2%. Las parcelas con incorporación de rastrojo no mostraron diferencias entre sí.

La CA de los cuatro tratamientos en la profundidad 20 a 25 cm, desde el inicio hasta la tercera incorporación, no presentó diferencias ($p > 0,05$) entre ellos. Sin embargo, la CA aumentó en CT, P y PD en casi un 2% en el mismo periodo anterior ($p < 0,05$).

En los cuatro tratamientos a la profundidad de 5 a 10 cm, el PAWC no presentó cambios significativos en el tiempo desde C.Inicial hasta la tercera Incorporación (Fig. 2). Con la 1ª Incorp., se observaron los valores más altos de PAWC ($p < 0,05$) con 32,8% para D, 32,2% para C, 30,6% para PD y 28,2% para P.

Al igual que a la profundidad de 5 a 10 cm, a los 20 a 25 cm la 1ª Incorp. presentó los valores más altos de PAWC. P presentó diferencias ($p < 0,05$) con D y PD que fueron un 5 y 3% menor, respectivamente. A pesar de que no se observaron diferencias en PAWC en el tiempo (desde C.Inicial hasta 3ª Incorp.), se presentó disminución de PAWC de un 3,7% en P, 0,5% en D y 2,6% en PD.

El coeficiente de extensibilidad lineal del suelo (COLE) varió entre 0,85 a 0,115 [-] sin que existieran diferencias ($p > 0,05$) al comparar los cuatro tratamientos a la profundidad de 5 a 10 cm en el tiempo (Fig. 3). A la profundidad de 20 a 25 cm el COLE se mantuvo sin diferencias entre los

tratamientos hasta la 2ª Incorp. El COLE de CT en la 3ª Incorp. fue de 0,088, y para P, PD y D fue de 0,56; 0,59 y 0,68, respectivamente.

En forma individual cada tratamiento en el tiempo presentó un incremento en el COLE, desde C.Inicial hasta la 3ª Incorp. ($p < 0,05$). El tratamiento D fue quien más incrementó su COLE en 0,42 [-] y P el que menos aumentó con 0,24 [-]. A la profundidad de 20 a 25 cm el COLE en CT y D no presentaron diferencias ($p > 0,05$). Por el contrario, en P y PD se presentaron diferencias ($p < 0,05$) mostrando una disminución en el COLE de 0,020 y 0,024 [-], respectivamente.

Cambios en funcionalidad sistema poroso del suelo en profundidad producto de la incorporación de rastrojos

La conductividad de aire (Kl) aumentó en P, D y PD en el tiempo a la profundidad de 5 a 10 cm (Fig. 4). En esta profundidad, los tratamientos P, D y PD presentaron valores de Kl $\geq -2,0$ log cm s⁻¹ en la 3ª Incorp., lo que fue diferente de la parcela sin incorporación (-2,9 log cm s⁻¹; $p < 0,05$). Además, PD presentó un aumento significativo ($p < 0,05$) en Kl de 1,8 log cm s⁻¹ entre C.Inicial y 3ª Incorp. CT y P a la profundidad de 5 a 10 cm permanecieron iguales en el tiempo ($p > 0,05$), mientras que D y PD presentaron incrementos significativos de Kl ($p < 0,05$) en el tiempo.

A la profundidad de 20 a 25 cm las diferencias entre los tratamientos ocurren solo en el C.Inicial, con C presentando valores de Kl de -2,8 log cm s⁻¹, lo que es diferente de D y PD con -3,0 y -2,9 log cm s⁻¹, respectivamente ($p < 0,05$). No se presentaron diferencias en el tiempo en C, D y PD ($p > 0,05$). Solo P presentó diferencias ($p < 0,05$) de C.Inicial a 3ª Incorp., disminuyendo su Kl en 0,3 log cm s⁻¹.

El índice de continuidad de poros C2 a la profundidad de 5 a 10 cm, presentó diferencias ($p < 0,05$) entre los tratamientos a partir de la 1ª Incorp. En este sentido, D presentó un valor de C2 de 451 [-] mayor al de C y PD de 211 y 156 [-], respectivamente. A partir de la 2ª Incorp. P, D y PD presentaron un aumento de C2, siendo significativas ($p < 0,05$) solo para D y PD.

A la profundidad de 20 a 25 cm entre los tratamientos solo hay diferencias significativas en C.Inicial entre C con un valor de C2 de 142 [-], con respecto a D de 80 [-] y PD de 82 [-]. El tratamiento P fue el único que presentó diferencias ($p < 0,05$), disminuyendo de 142 a 70 [-] el índice de continuidad de poros, en el tiempo.

La Fig. 5 muestra el aumento de CA y Ka con la disminución de la densidad aparente (Da) como resultado de continuas incorporaciones de rastrojo. Mientras esta relación es significativa para la profundidad de 5 a 10 cm ($p < 0,05$), no se observó lo mismo en 20 a 25 cm ($p > 0,05$). En

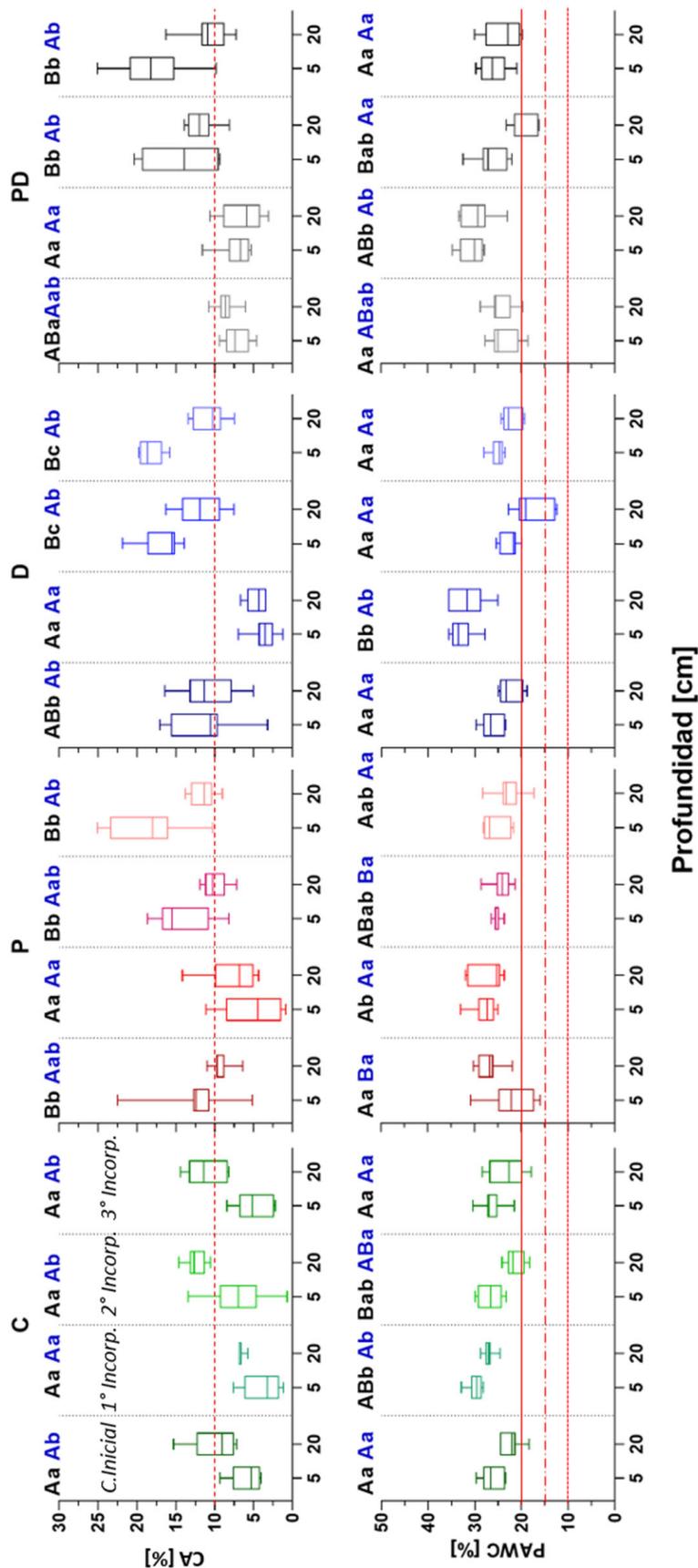


Fig. 2. Capacidad de Aire (CA) y contenido de agua disponible para las plantas (PAWC) según diferentes métodos de incorporación de rastrojos: Control (C), Púas(P), Discos(D) y Patas y Discos alternados (PD) a 5 - 10 y 20 - 25 cm de profundidad. Para un mismo Figura, p-ej. "C" se presentan los resultados de la CA desde la condición inicial y luego de las incorporaciones de rastrojo para reflejar los cambios en el tiempo de esta propiedad del suelo. Letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a un mismo tiempo, y letras minúsculas distintas indican diferencias en el tiempo en un mismo tratamiento ($p < 0,05$). El color negro corresponde a la profundidad 5 - 10 cm y el color azul corresponde a 20 - 25 cm ($n=7$). Los diagramas de cajas muestran la mediana, percentiles (P_{10} y P_{90}), y límites inferior y superior.

Fig. 2. Air capacity (AC) and plant available water content (PAWC) according to different stubble incorporation methods: Control (C), Tines (P), Discs (D) and Alternating Shanks and Discs (PD), at depths of 5-10 and 20 - 25 cm. For the same Figure, e.g., 'C' the results of AC are presented from the initial condition and after stubble addition to reflect the changes over time in this soil property. Different capital letters indicate statistically significant differences between treatments at a given time, and different lowercase letters indicate differences over time within the same treatment ($p < 0.05$). Black color corresponds to the 5 - 10 cm depth, and blue color corresponds to 20 - 25 cm depth ($n=7$). Box plots show median, percentiles (P_{10} and P_{90}), and lower and upper limits.

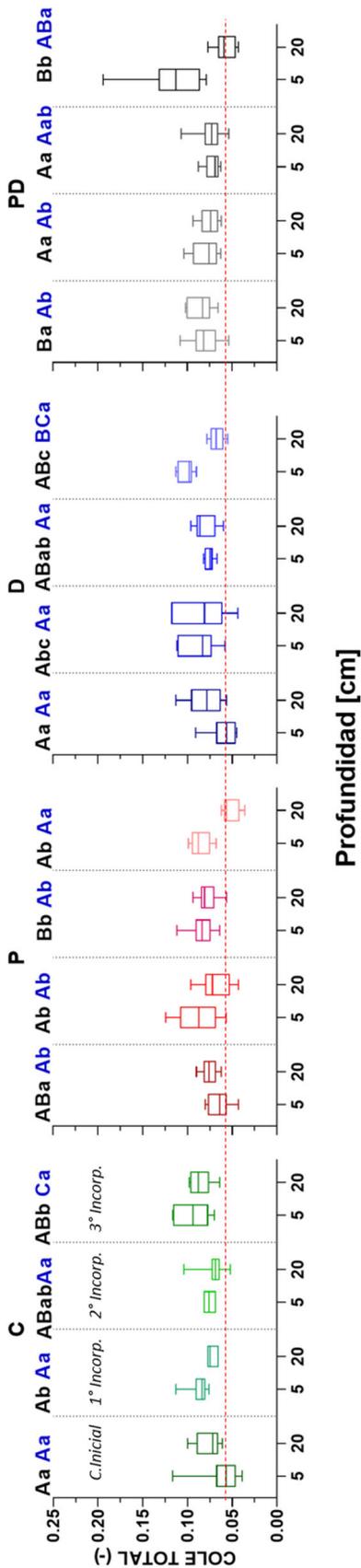


Fig. 3. Coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) según diferentes métodos de incorporación de rastrojos: Control (C), Púas(P), Discos(D) y Patas y discos alternados (PD) a 5 -10 y 20 - 25 cm de profundidad. Para un misma Figura, p.ej. "C" se presentan los resultados de la COLE TOOTAL desde la condición inicial y luego de las incorporaciones de rastrojo para reflejar los cambios en el tiempo de esta propiedad del suelo. Letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a un mismo tiempo, y letras minúsculas indican diferencias en el tiempo en un mismo tratamiento ($p < 0,05$). El color negro corresponde a la profundidad 5 -10 cm y el color azul corresponde a 20 - 25 cm ($n=7$). Los diagramas de cajas muestran la mediana, percentiles (P_{10} y P_{90}), y límites inferior y superior.

Fig. 3. Coefficient of Linear Extensibility (COLE) according to different stubble incorporation methods: Control (C), Tines (P), Discs (D) and Alternating Shanks and Discs (PD), at depths of 5 - 10 and 20 - 25 cm. For the same Figure, e.g., 'C' the results of COLE TOTAL are presented from the initial condition and after stubble addition to reflect the changes over time in this soil property. Different capital letters indicate statistically significant differences between treatments at a given time, and different lowercase letters indicate differences over time within the same treatment ($p < 0,05$). Black color corresponds to 5 - 10 cm depth, and blue color corresponds to 20 - 25 cm depth (n=7). Box plots show median, percentiles (P_{10} and P_{90}), and lower and upper limits.

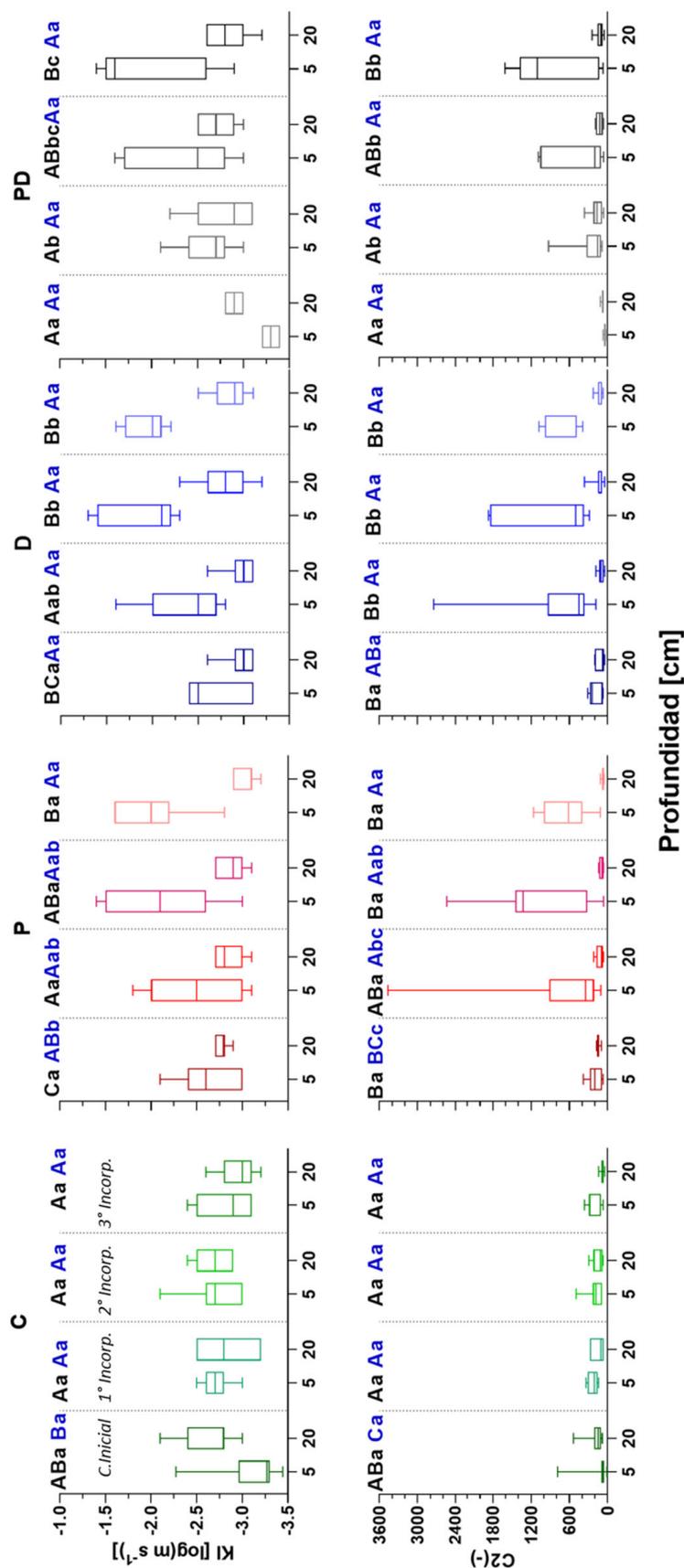


Fig. 4. Conductividad de aire (KI) y índice de continuidad de poros (C2) según diferentes métodos de incorporación de rastrojos: Control (C), Púas (P), Discos (D) y Patas y Discos Alternados (PD) a 5 - 10 y 20 - 25 cm de profundidad. Para un misma Figura, p.ej. "C" se presentan los resultados de KI desde la condición inicial y luego de las incorporaciones de rastrojo para reflejar los cambios en el tiempo de esta propiedad del suelo. Letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a un mismo tiempo, y letras minúsculas distintas indican diferencias en el tiempo en un mismo tratamiento ($p < 0,05$). El color negro corresponde a la profundidad 5 - 10 cm y el color azul corresponde a 20 - 25 cm ($n=7$). Los diagramas de cajas muestran la mediana, percentiles (P_{10} y P_{90}), y límites inferior y superior.

Fig. 4. Air conductivity (KI) and pore continuity index (C2) according to different stubble incorporation methods: Control (C), Tines (P), Discs (D) and Alternate Shanks and Discs (PD), at depths of 5 - 10 and 20 - 25 cm. For the same Figure, e.g. 'C' the results of KI are presented from the initial condition and after stubble addition to reflect the changes over time in this soil property. Different capital letters indicate statistically significant differences between treatments at a given time, and different lowercase letters indicate differences over time within the same treatment ($p < 0.05$). Black color corresponds to 5 - 10 cm, and blue color corresponds to 20 - 25 cm depth ($n=7$). Box plots show median, percentiles (P10 and P90), and lower and upper limits.

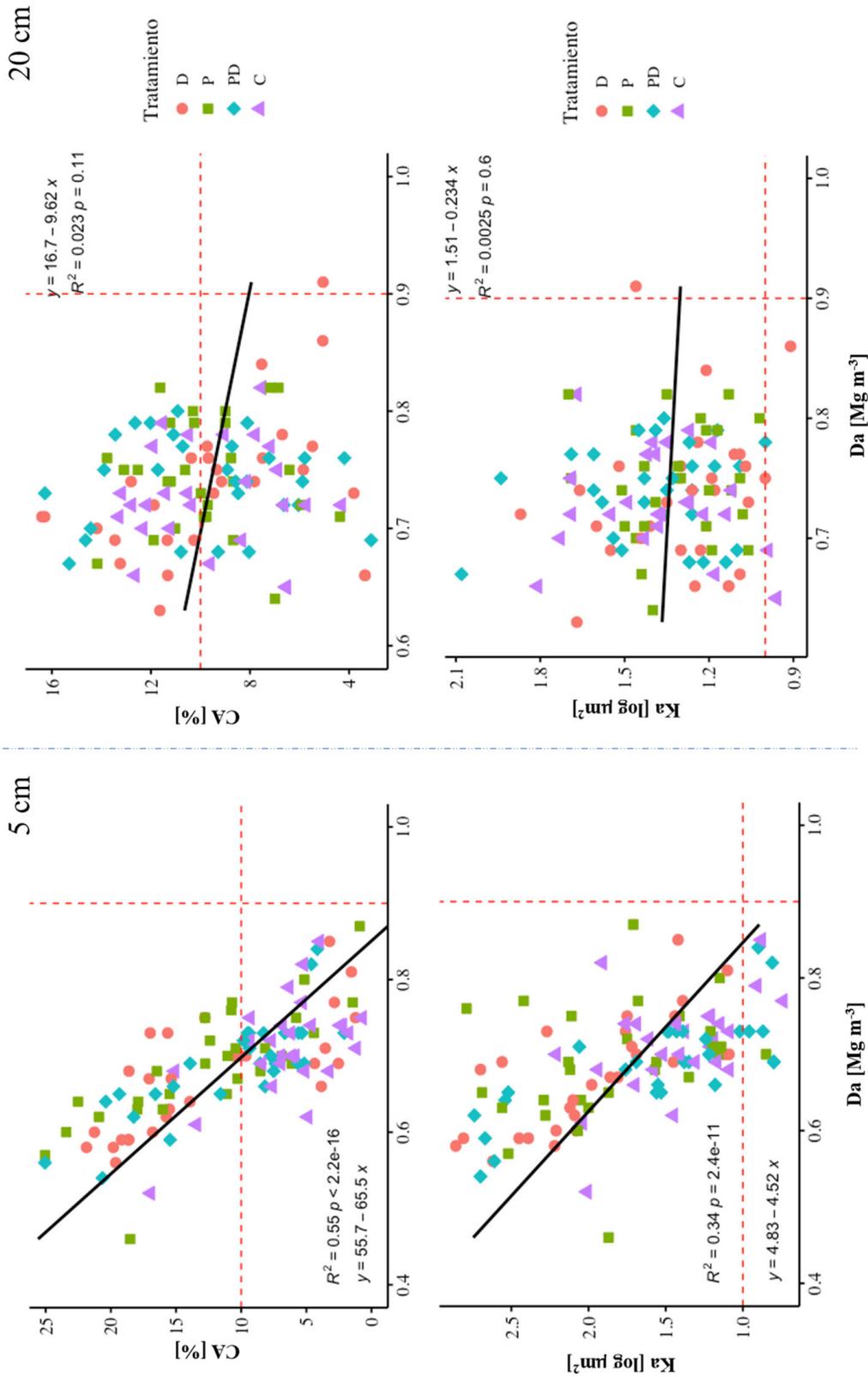


Fig. 5. Capacidad de aire (CA) y permeabilidad de aire (Ka) en función de la densidad aparente. Las líneas rojas presentan los valores críticos relativos a la compactación de suelo según Reynolds et al. (2009).
 Fig. 5. Air capacity (AC) and air permeability (Ka) as a function of bulk density. The red lines present the critical values for soil compaction according to Reynolds et al. (2009).

la medida que incrementa la incorporación de rastrojo la Da disminuye en promedio de 0,8 a 0,5 Mg m^{-3} a la profundidad de 5 a 10 cm. Además, se observó que el paso de maquinaria durante la cosecha compacta el suelo generando que la CA en el caso de C se encuentre por debajo de un 10%.

Con el aumento de la fracción de poros llenos de aire (CA) se incrementa la capacidad de conducción de aire del suelo (K_a) en ambas profundidades (Fig. 6), teniendo un mayor impacto en la profundidad de 5 a 10 cm ($R^2=0,43$), donde el valor de K_a en los tratamientos están por sobre 2,0 $\log \text{mm}^2$.

Con un aumento de CA, también disminuye el PAWC como resultado de las sucesivas incorporaciones en el tiempo en ambas profundidades (5 a 10 cm y 20 a 25 cm). En la profundidad de 5 a 10 cm se observó cómo los tratamientos se agruparon en función de las sucesivas incorporaciones de rastrojo, donde C se encuentra por debajo del límite de CA (10%) conservando su PAWC sobre el 20%. Una tendencia similar se observa a la profundidad de 20 a 25 cm.

DISCUSIÓN

Las diferencias obtenidas en la MO no fueron resultado de las incorporaciones, ya que el contenido de MO en suelos agrícolas cambia lentamente a través del tiempo llegando a tardar siglos el ciclo de sus elementos (Biederbeck et al., 1994), dependiendo del clima, uso y manejo del suelo. En ese contexto, es más probable que por la heterogeneidad de la cantidad de rastrojo incorporado, existan zonas de mayor y menor contenidos de MO. Esto último, se pudo observar en este estudio dado que la distribución del rastrojo no es homogénea con diferencias de al menos 7 ton más de residuos entre tratamientos (Bustos et al., 2021). Además, el historial de manejo del predio ha considerado la incorporación total del residuo por los últimos 15-20 años, con un estimado de 9,32 $\text{ton ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en el caso de avena y trigo, de lo que se puede inferir que la MO del sitio de estudio se ha estabilizado con el tiempo y que los resultados más contrastantes se pueden observar en sitios sin incorporación de rastrojo o en sitios con cambio de uso, por ejemplo de pradera a cultivo anual.

Cambios en la estructura del suelo y en la funcionalidad del sistema poroso por efecto de la incorporación de rastrojos

Las propiedades del suelo como COS, PAWC, K_l (60_{hPa}), CA, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y suma de bases están relacionadas con las funciones del suelo,

lo que permite su uso para la evaluación de la funcionalidad y sostenibilidad del recurso (Seybold et al., 1996). Se han propuesto valores críticos asociados a problemas de compactación como son un mínimo 8% de CA y de 20% PAWC para la óptima producción vegetal (Horn y Fleige, 2009; Reynolds et al., 2009). La parcela sin incorporación de rastrojo (C), a la profundidad de 5 a 10 cm, tiene limitadas funciones asociadas a la mantención de la biodiversidad y producción agrícola debido a su bajo K_l y CA (< 8%) y su alto contenido de agua (Fig. 6). Por el contrario, los tratamientos con labranza a la profundidad de 5 a 10 cm disminuyen la Da y favorecen el flujo de aire con valores de K_l y CA por sobre los valores críticos (Fig. 3 y Fig. 5). Sin embargo, estos tratamientos presentan, al mismo tiempo, una menor capacidad de soporte dejando al suelo susceptible a eventos de compactación (Vásquez et al., 2012).

La conductividad de aire es un indicador sensible para determinar la funcionalidad del sistema poroso (Horn y Kutilek, 2009). Una relación positiva entre CA y K_l muestra la alta capacidad de almacenar y conducir aire del suelo (Dörner et al., 2013; Valle et al., 2018; Haas et al., 2018). Además, un K_l alto o asociado a un alto índice de continuidad de poros (C_2) refleja la calidad de la estructura y un sistema poroso interconectado (Dörner et al., 2013; Clunes et al., 2021). Ordóñez et al. (2018) señalan que K_l es susceptible a cambios inmediatos producto de estreses mecánicos externos (pastoreos) aplicado en suelo. Sin embargo, la elasticidad que le confiere el contenido de MO a los Andisoles, permite su recuperación en el tiempo incluso hasta mejorar la capacidad de conducción de aire. El valor crítico de $K_l < -2,70 \log \text{cm s}^{-1}$, indica problemas de aireación por compactación (Horn y Fleige, 2009). En el sitio control durante todo el estudio se presentaron valores de K_l bajo el nivel crítico, además de un C_2 bajo 300 [-], ambos factores no presentaron variaciones en el tiempo (Fig. 4). Es posible que estos valores junto con la baja CA (Fig. 2) indiquen un eventual problema por compactación por el peso de las maquinarias usadas y con consecuencias para la producción agrícola (Bustos et al., 2021). Si bien la incorporación de los rastrojos permite un aumento en el espacio poroso y la CA (Fig. 6), éste no se refleja en un aumento en K_l y K_a , porque no aumenta la conexión del sistema poroso. Además, al aumentar la CA disminuye PAWC (Fig. 6) lo que afecta el almacenamiento de agua disponible para las plantas. A la profundidad de 20 a 25 cm todos los tratamientos presentan una disminución en K_l (Fig. 4) y CA (Fig. 5) por debajo el valor crítico. Esta dinámica de las incorporaciones

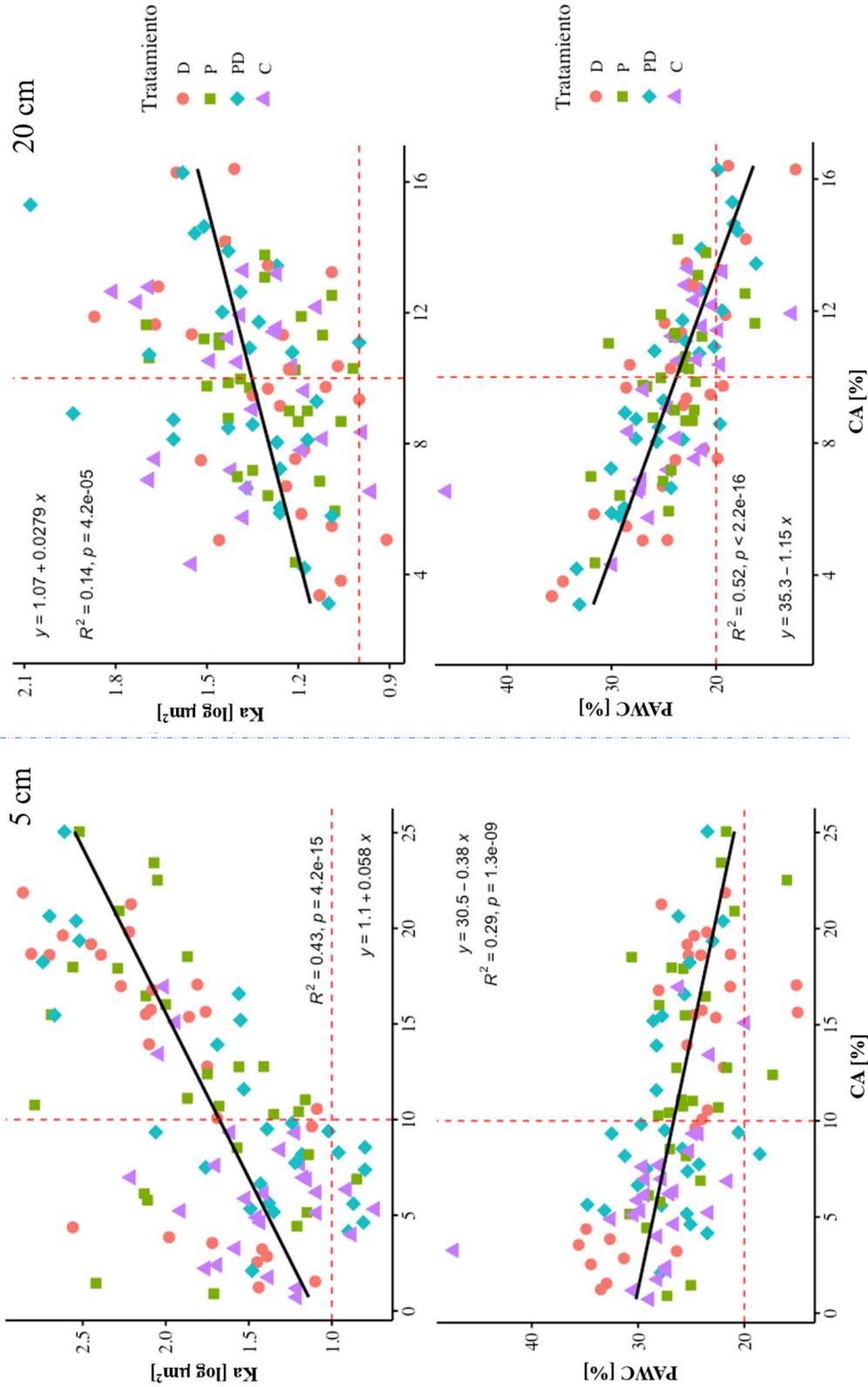


Fig. 6. Permeabilidad de aire (Ka) y contenido de agua disponible para las plantas (PAWC) en función de la capacidad de aire (CA). Las líneas rojas presentan los valores críticos relativos a la compactación de suelo según Reynolds et al. (2009).
 Fig. 6. Air permeability (Ka) and plant available water content (PAWC) as a function of air capacity (AC). The red lines present the critical values for soil compaction according to Reynolds et al. (2009).

de rastrojo y sus efectos sobre el suelo debe ser analizada en el tiempo, ya que como concluyeron Bustos et al. (2021), a través de mediciones de campo realizadas en el mismo estudio, el peso y el continuo tránsito de la maquinaria empleada para incorporar el rastrojo, provoca un aumento de la resistencia mecánica del suelo a la profundidad de 20 a 25 cm de profundidad, lo que refleja el efecto de compactación en el suelo por debajo de la profundidad de trabajo de las incorporadoras. Similares resultados fueron obtenidos para un Andisol de la Serie Valdivia en un experimento de compactación (Dörner et al., 2023).

Estos cambios, también afectan la función de soporte estructural del suelo (Vásquez et al., 2012), la cual disminuye por la incorporación. Sin embargo, al observar la Da desde la C.inicial, el suelo recupera su soporte estructural a pesar de las sucesivas incorporaciones en postcosecha. Ordóñez et al. (2018) y Zúñiga et al. (2015), indican que la destrucción de la arquitectura porosa por efectos de la labranza repercute negativamente en la conductividad de agua y del aire, pero a medida que comienzan los procesos de secado y humectación el suelo comienza a presentar mejoras o un aumento de estos parámetros. En esta línea, el comportamiento de un Andisol sometido a la labranza o pastoreo intensivo no presenta una respuesta consistente con suelos de distinta génesis, presentando gran capacidad de resiliencia (Negro et al., 2019). Esto se debe a su gran porcentaje de macroporos (Valle et al., 2018), la reactividad de su arcilla predominante (Clunes y Pinochet, 2021) y su alto contenido de materia orgánica estabilizada (Baumgarten et al., 2013), que explican su alta resiliencia al estrés mecánico (Ivelic et al., 2015) y el comportamiento de su cambio de distribución de poros luego de la labranza (Bravo et al., 2021).

Dörner et al. (2009), demostraron la alta capacidad de contracción de un Andisol (Typic Hapludand) en estudios sobre tres usos diferentes (pradera de un año, bosque nativo y pradera de 50 años). El presente estudio permite visualizar la alta capacidad de contracción de estos suelos incluso bajo una condición de rotación de cultivo con al menos 25 años de incorporación de rastrojos. Las incorporaciones de rastrojo en superficie (5 a 10 cm) aumentaron el grado de contracción desde C.Inicial a 3º Incorp., pero disminuyen en profundidad (P y PD disminuyeron sus medianas en al menos 20 unidades [-] de C.Inicial a 3º Incorp). Esta disminución de la contracción (COLE) puede ser producto de la transmisión en profundidad de la presión ejercida por los implementos de labranza (Jorajuria, 2005). Sin embargo, Ellies y Dörner (1999) determinaron que con cada tránsito el suelo se compacta

superficialmente y, debido a ello, disminuye la profundidad de penetración de las tensiones; aunque en este caso cada incorporación se hace por sobre un suelo cada vez más disgregado con lo que la penetración de las tensiones puede ser en una mayor profundidad. Finalmente, la capacidad de contracción de los suelos volcánicos está relacionada con su capacidad de almacenamiento de aire y agua (Valle et al., 2018). En este sentido, los resultados observados en este estudio mostraron esta relación, puesto que en los tratamientos con incorporación a la profundidad de 5 a 10 cm hay un marcado aumento de CA, PAWC y el COLE en P, D y PD. Sin embargo, el uso de distintas formas de incorporación de rastrojo no tiene efectos significativos sobre las propiedades dependientes de la estructura del suelo en la profundidad arable del suelo (Bustos et al., 2021).

CONCLUSIONES

No se observaron diferencias en las propiedades estructurales del suelo como respuesta del uso de distintas formas de incorporación de rastrojo en el periodo comprendido entre postcosecha y presembrado (7 meses). La incorporación de rastrojos disminuyó la densidad aparente del suelo y con ello mejoró su capacidad de aireación, independientemente del tipo de incorporación utilizada. Por otro parte, la funcionalidad del sistema poroso se benefició con la incorporación de rastrojo en la profundidad de 5 a 10 cm, porque aumentó la conductividad de aire por encima de los valores críticos reportados para aireación. Una baja aireación se asocia con problemas de compactación. En el tratamiento control sin labrar, los parámetros estudiados no experimentaron alteración en el tiempo; su capacidad de almacenamiento de agua se mantuvo elevada, pero la aireación fue limitada. En la profundidad de 20 a 25 cm, la funcionalidad del sistema poroso no se vio alterada significativamente por la incorporación de rastrojo independientemente de la forma de hacer la incorporación. La dinámica de las incorporaciones de rastrojo y sus efectos sobre el suelo debe ser analizada en periodos de tiempo más prolongados con el fin de mantener un sistema poroso funcional y continuo en el perfil de suelo.

LITERATURA CITADA

- Ball, B.C., M.F. O'Sullivan, and R. Hunter. 1988. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *Journal of Soil Science* 39: 327-339.

- Baumgarten, W., J. Dörner, and R. Horn. 2013. Microstructural development in volcanic ash soils from south Chile. *Soil Till. Res.* 129:48-60.
- Bear, J. 1972. *dynamics of fluids in porous media.* Elsevier, New York, 764 p.
- Biederbeck, V.O., H.H. Janzen, C.A. Campbell, and R.P. Zentner. 1994. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biol. Biochem.* 26:1674-1656.
- Bustos, T., D. Dec, S. Valle, J. Clunes, and J. Dörner. 2021. Variación temporal de la resistencia mecánica y contenido de humedad de un Eutric Fulvudands después de la incorporación de rastrojo de avena (*Avena sativa*), un estudio de caso. *Agro Sur* 49(2): 31-42. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2021.v49n2-04>
- Bravo, A., F. Zúñiga, S. Valle, O. Thiers, D. Dec, J. Clunes, and J. Dörner. 2021. Propiedades físicas de los agregados de suelos en bosques y praderas con régimen ácuico. *Agro Sur* 49(1):29-42. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2021.v49n1-05>
- CIREN. 2003. Estudio Agrológico X Región. Publicación CIREN No. 123. Centro de información de Recursos Naturales, Santiago, Chile. Disponible en <http://bosques.ciren.cl/handle/123456789/25572>
- Clunes, J., and D. Pinochet. 2021. Leucine retention by the clay-sized mineral fraction. An indicator of C storage. *Agro Sur* 48(3):37-46. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2020.v48n3-05>
- Clunes, J., J. Dörner, and D. Pinochet. 2021. How does the functionality of the pore system affects inorganic nitrogen storage in volcanic ash soils? *Soil Till. Res.* 205:104802. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104802>
- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particlesize analysis. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* 9:545-567.
- Dec, D., F. Zúñiga, O. Thiers, L. Paulino, S. Valle, V. Villagra, I. Tadich, R. Horn, and J. Dörner. 2017. Water and temperature dynamics of Aquands under different uses in southern Chile. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 17 (1):141-154. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000011>
- Dec, D., S. Bravo, R. Horn, D. Uteau, S. Peth, F. Zuniga, J. Clunes, S. Granda, Ó. Martínez, Ó. Balocchi, and M. Alonso. 2021. Analyzing the impact of grazing and short-term irrigation management on soil mechanical strength of a volcanic ash soil under different types of pastures. *Soil Till. Res.* 213:105130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105130>
- Descalzi, C., O. Balocchi, I. López, P. Kemp, and J. Dörner. 2018. Different soil structure and water conditions affect the growing response of *Lolium perenne* L. and *Bromus valdivianus* Phil. growing alone or in mixture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18(3):617-635. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005001901>
- Dörner, J., and R. Horn. 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the weichselian moraine region in N Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169:213-220. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521844>
- Dörner, J. and D. Dec. 2007. La permeabilidad del aire y la conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización de los poros del suelo. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 7(2):1-13. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912007000200001>
- Dörner, J., D. Dec, X. Peng, and R. Horn. 2009. Change of shrinkage behavior of an Andisol in southern Chile: effects of land use and wetting/drying cycles. *Soil Till. Res.* 106:45-53. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.013>
- Dörner, J., D. Dec, X. Peng, and R. Horn. 2010. Effect of land use change on the dynamic behaviour of structural properties of an Andisol in southern Chile under saturated and unsaturated hydraulic conditions. *Geoderma* 159:189-197. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.011>
- Dörner, J., Dec, D., Feest, E., Vásquez, N. and M. Díaz. 2012. Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage. *Soil Till. Res.* 125:52-60. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.019>
- Dörner, J., F., Zúñiga, and I. López. 2013. Short-term effects of different pasture improvement treatments on the physical quality of an andisol. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 13 (2): 381-399.
- Dörner, J., J. Huertas, J.G. Cuevas, C. Leiva, L. Paulino, and J.L. Arumí. 2015. Water content dynamics in a volcanic ash soil slope in southern Chile. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178(4):693-702. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500112>

- Dörner, J., F. Zúñiga, S. Valle, I. Martínez, C. Prat, and H. Óskarsson. 2020. Manejo sustentable de suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agro Sur* 47(3):1-3. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2019.v47n3-01>
- Dörner, J., S. Bravo, J. Clunes, R. Horn, D. Dec, S. Valle, F. Zúñiga, O. Wendroth, and J. Werth. 2023. Assessing Temporal Changes of the Soil Mechanical Strength of a Volcanic Ash Soil at Different Bulk Densities Under Pasture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01155-0>
- Ellies, A., and J. Dörner. 1999. Distribución de tensiones en un suelo palehumult ejercida con el tráfico de la maquinaria agrícola. *Agro Sur* 27(2):1-9.
- Forsythe, W. 1974. Física de suelos: manual de laboratorio. IICA, San José, Costa Rica.
- Groenevelt, P.H., B.D. Kay, and C.D. Grant. 1984. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma* 34:101-114.
- Haas, C., R. Horn, H.H. Gerke, D. Dec, F. Zúñiga, and J. Dörner. 2018. Air permeability and diffusivity of an Andisol subsoil as influenced by pasture improvement strategies. *Agro Sur* 46 (2):23-34. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2018.v46n2-05>
- Hartge, R., and R. Horn. 2009. Die physikalische untersuchung von böden. praxis messmethodenauswertung. 4. vollst. überarbeiteteauflage. schweizerbartvorlage, stuttgart.
- Hillel, D. 1998. environmental soil physics. Academic Press, London, p. 771.
- Horn, R., and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in northwest Germany at farm scale. *Soil Till. Res.* 102:201-208.
- Horn, R. and M. Kutilek. 2009. Intensity–capacity concept. How far is it possible to predict intensity values with capacity parameters. *Soil Till. Res.* 103:1-3.
- Ivelic-Sáez, J., F., Zúñiga, S., Valle, I., López, D., Dec, and J. Dörner. 2015. Functional resistance and resilience of the pore system of an andisol exposed to different strategies of pasture improvement under sheep grazing. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 15: 663-679.
- Jorajuría, D. 2005. Compactación del suelo agrícola inducida por tráfico vehicular. Una revisión. pp 39-55. En D. Jorajuría (ed.). Reología del suelo agrícola bajo tráfico. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Luzio, M. 2010. Suelos de Chile. Universidad de Chile, Santiago, Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182305>
- Navarro, G., D. Dec, O. Balocchi, I. López, J. Clunes, and J. Dörner. 2017. Efecto de la densidad de pastoreo sobre la capacidad de soporte y funcionalidad del sistema poroso de un Andisol. *Agro Sur* 45(1):63-73. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2017.v45n1-08>
- Negrón, M., I., López, and J. Dörner. 2019. Consequences of intensive grazing by dairy cows of contrasting live weights on volcanic ash topsoil structure and pasture dynamics. *Soil Till. Res.* 189:88-97. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.025>
- Ordóñez, I., I.F. López, P.D. Kemp, C.A. Descalzi, R. Horn, F. Zúñiga, D. Dec, and J. Dörner. 2018. Effect of pasture improvement managements on physical properties and water content dynamics of a volcanic ash soil in southern Chile. *Soil Till. Res.* 178:55-64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.013>
- Rabot, E., M. Wiesmeier, S. Schlüter, and H.J. Vogel. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314:122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Reszkowska, A., J. Krümmelbein, S. Peth, R. Horn, Y. Zhao, and L. Gan. 2011. Influence of grazing on hydraulic and mechanical properties of semiarid steppe soils under different vegetation type in Inner Mongolia, China. *Plant Soil* 340:59-72. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0405-3>
- Reynolds, W.D., C.F. Drury, C.S. Tan, C.A. Fox, and X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152:252-263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Ruiz, C. 2015. Rastrojos de cultivos y residuos forestales. boletín del INIA n°308. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7856>
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- RStudio Team, 2020. RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>
- Sandoval M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas, and D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chillan:Publicaciones–Departamento de Suelos y Recursos Naturales. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/59208>

- Seybold, C.A., M.J. Mausbach, D.L. Karlen, and H.H. Rogers. 1996. Quantification of Soil Quality. pp. 464. En R. Lal, B.A. Stewart (eds.). *Advances in soil science*. CRC Press, series 17.
- Schils, R., J.E. Olesen, K.C. Kersebaum, B. Rijk, M. Oberforster, V. Kalyada, M. Khitrykau, A. Gobin, H. Kirchev, V. Manolova, and I. Manolov. 2018. Cereal yield gaps across Europe. *Eur. J. Agron.* 101:109-120. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.09.003>
- Tosso, J. 1985. *Suelos volcánicos de Chile*, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/35623>
- Valle, S.R., J. Dörner, F. Zúñiga, and D. Dec. 2018. Seasonal dynamics of the physical quality of volcanic ash soils under different land uses in southern Chile. *Soil Till. Res.* 182:25-34. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.018>
- Vásquez, N., F. Salazar, and J. Dörner. 2012. Variabilidad temporal de las propiedades físico-mecánicas de un suelo derivado de cenizas volcánicas bajo labranza convencional. *Agro Sur* 40(3):1-13. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2012.v40n3-01>
- Zúñiga, F., J. Ivelic-Sáez, I. López, D. Huygens, and J. Dörner. 2015. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. *Soil Till. Res.* 145:233-241. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.014>