

Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: Caracterización, génesis y manejo

Carina R. Álvarez*

Introducción

Argentina, junto con Estados Unidos y Brasil, son los tres países del mundo con mayor superficie agrícola manejada bajo siembra directa (SD) (Derpsch, 2011; AAPRESID, 2011). Argentina en 2007/8 contaba con 25.8 Mha en SD; que representa el 85% de la superficie destinada a cultivos de grano. Esto genera un escenario de interés a nivel mundial para la evaluación de la evolución de la calidad de los suelos bajo SD y, también, a nivel país ya que prácticamente toda su producción se asienta sobre este sistema.

En la región pampeana argentina, como en otras regiones templadas del mundo, el reemplazo de labranza convencional (LC) por la SD resultó en un mejor control de la erosión, conservación del agua, ahorro de tiempo operativo y reducción del uso de combustibles fósiles.

A partir de este escenario surgen un conjunto de interrogantes en torno a la SD: ¿Cuál es el impacto de la SD sobre la calidad o salud del suelo? ¿La calidad del suelo en SD se diferencia de los suelos manejados con laboreo? ¿Cuáles son los principales problemas encontrados en SD? ¿Cómo pueden remediarse?

A partir de esta serie de preguntas nos propusimos realizar un diagnóstico del estado de calidad física de los suelos en SD en la Pampa Ondulada, profundizar en el estudio de los problemas detectados y proponer alternativas de manejo para su remediación y/o prevención (Figura 1).

Diagnóstico

Estado de la calidad de los suelos en la Pampa Ondulada

El concepto de calidad de suelo, estrechamente asociado al de sustentabilidad, se define como la capacidad del suelo para cumplir con un conjunto de funciones. Ellas son: el sostenimiento del crecimiento vegetal y animal, la retención de la materia orgánica (MO) y los nutrientes asociados, y la regulación del flujo de agua. La evaluación del estado de la calidad del suelo involucra la medición simultánea de un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo.

El movimiento de suelos prácticamente nulo en SD produce una serie de cambios en varias propiedades edáficas respecto de otros sistemas de labranza. Con el objetivo de evaluar el estado de calidad de los suelos

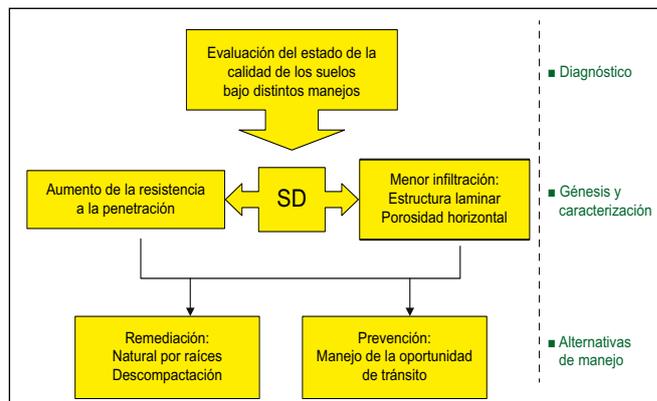


Figura 1. Organigrama del desarrollo del trabajo.

en la Pampa Ondulada, se muestrearon 45 situaciones (6 de ellas cuasi-prístinas, usadas como referencia); 18 bajo LC que en la región es labranza mínima o vertical y, finalmente, 21 situaciones en SD. Asimismo, los suelos muestreados abarcaban distintas texturas de suelos presentes en la región (franco, franco limosos y franco arcillo limosos; Álvarez et al., 2009; Álvarez et al., 2011).

La calidad de los suelos de referencia se diferenció marcadamente de los sitios agrícolas, fundamentalmente por un mayor contenido de carbono (C) orgánico, especialmente su fracción lábil (carbono orgánico particulado; >53 μm) y menor densidad aparente, compactación relativa e inestabilidad estructural (IE) (Tabla 1).

Por el contrario, los sistemas agrícolas sólo se diferenciaron por su IE y resistencia a la penetración (RP). La IE fue mayor bajo labranza (Tabla 1) y la RP mayor en SD (Figura 2). Los suelos manejados con SD presentaron mayor RP de 0 a 5 cm (0.77 MPa más alta). Sin embargo, esta mayor RP no estuvo asociada a una mayor densidad aparente. Esta falta de relación indica que no hubo cambios en el volumen total de poros. El aumento de RP debe ser entonces atribuido a un proceso de endurecimiento.

Uno de los hallazgos más importantes del muestreo realizado fue la interacción de la textura de los suelos y el manejo sobre la tasa de infiltración (Figura 3). Esto significa que pueden esperarse mejoras en la tasa de infiltración en los suelos francos bajo SD, pero no así en los suelos franco-limosos y franco-arcillo-limosos. Las menores tasas de infiltración en los suelos limosos manejados con SD estuvieron asociadas con la presencia de estructuras laminares en los primeros centímetros de los suelos.

* Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: alvarezc@agro.uba.ar

Tabla 1. Componentes orgánicos del suelo (0-30 cm) y propiedades físicas según el manejo (0-15 cm). Referencia (situaciones cuasi-prístinas), siembra directa (SD) y labranza convencional (LC). Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre manejos ($p < 0.05$).

| | Referencia | SD | LC |
|--|------------|----------|---------|
| Carbono orgánico (Mg ha^{-1}) | 65.04 a | 51.87 b | 54.93 b |
| Nitrógeno total (Mg ha^{-1}) | 6.31 a | 4.80 b | 4.98 b |
| Carbono orgánico particulado (Mg ha^{-1}) | 18.34 a | 9.93 b | 10.37 b |
| Carbono orgánico resistente (Mg ha^{-1}) | 46.69 a | 41.94 a | 44.56 a |
| Nitrógeno orgánico particulado (Mg ha^{-1}) | 1.81 a | 0.88 b | 0.90 b |
| Nitrógeno orgánico resistente (Mg ha^{-1}) | 4.50 a | 4.10 ab | 3.90 b |
| Espesor horizonte A (cm) | 30.3 | 26.0 | 26.8 |
| Inestabilidad estructural (mm) | 0.317 b | 0.573 ab | 0.723 a |
| Densidad aparente (Mg m^{-3}) | 1.10 b | 1.19 a | 1.19 a |
| Densidad aparente máxima (Mg m^{-3}) | 1.41 | 1.42 | 1.41 |
| Compactación relativa (%) | 77.5 b | 83.6 a | 83.7 a |

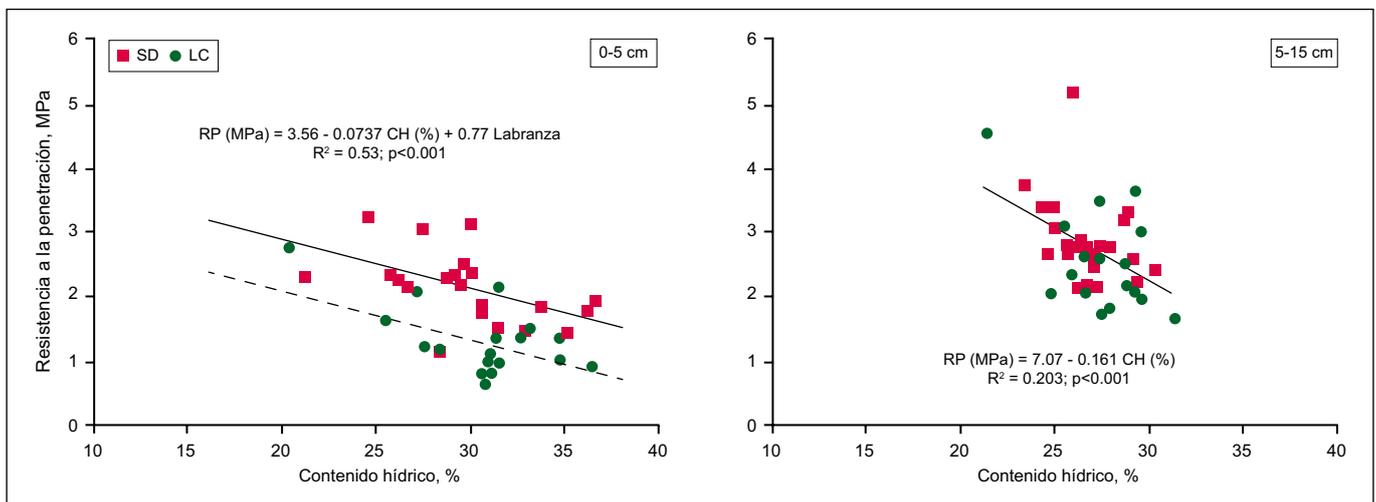


Figura 2. Resistencia a la penetración (MPa) y su relación con el contenido hídrico (CH, %) del suelo para dos profundidades de muestreo. Siembra directa (SD) y labranza convencional (LC). Labranza: variable *Dummy* o ficticia con valor 1 para SD y valor 0 para LC.

Opuesto a lo encontrado aquí, varios autores hallaron aumentos de tasa de infiltración por SD, los cuales fueron atribuidos a la formación de bioporos estables, lo cual comienza a ser hallado a partir de 5 años de implementación de SD (Hubert et al., 2007). El impacto negativo de la SD sobre la tasa de infiltración hallado en nuestro trabajo va en similar dirección que otros trabajos de años recientes (Sasal et al., 2006; Strudley et al., 2008). En ellos se halló que a pesar que la estabilidad estructural suele ser mayor en SD, no necesariamente ello da lugar a la formación de mayor macroporosidad y, correspondientemente, mayor tasa de infiltración. Sasal et al. (2006) compararon la tasa de infiltración de suelos laboreados y manejados con SD en tres ensayos de larga duración localizados en el INTA Pergamino. En dos de ellos, la infiltración fue 25% mayor en los suelos laboreados, mientras que en el tercer ensayo los tratamientos de labranzas no se diferenciaron entre sí. Las diferencias se debieron a la escasa presencia

de macroporos orientados verticalmente en los suelos manejados con SD.

En referencia al componente orgánico, si bien como se dijo anteriormente SD y LC no difirieron en sus contenidos, en SD se observó una marcada estratificación (relación C0-5 cm : C5-15 cm) del C orgánico particulado y C potencialmente mineralizable, alcanzando valores similares a las referencias (Figura 4).

Franzluebbbers (2002) concluye que las elevadas relaciones de estratificación en SD generan efectos favorables en las propiedades físicas y que sería un indicador de un mayor secuestro de C orgánico en el suelo. Contrariamente a lo afirmado por Franzluebbbers (2002), sólo la IE copió dicha tendencia favorable, pero no lo hicieron ni la tasa de infiltración, ni el C orgánico total 0-30 cm (expresado en masa equivalente), ni la RP. A partir de nuestros resultados sugerimos no generalizar

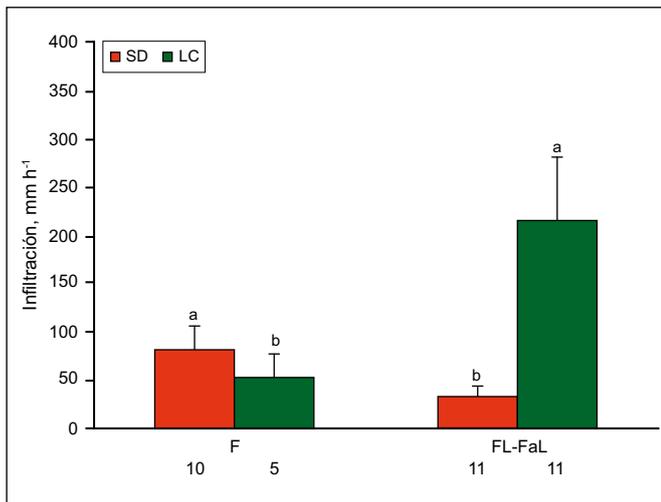


Figura 3. Tasa de infiltración para los distintos suelos (F = francos y FL-FaL = franco-limoso y franco-arcillo-limosos) y manejos. Los números debajo de las barras indican el número de situaciones para cada suelo/manejo. La letra indica las diferencias de manejo dentro de cada clase textural ($p \leq 0.05$). Siembra directa (SD) y labranza convencional (LC).

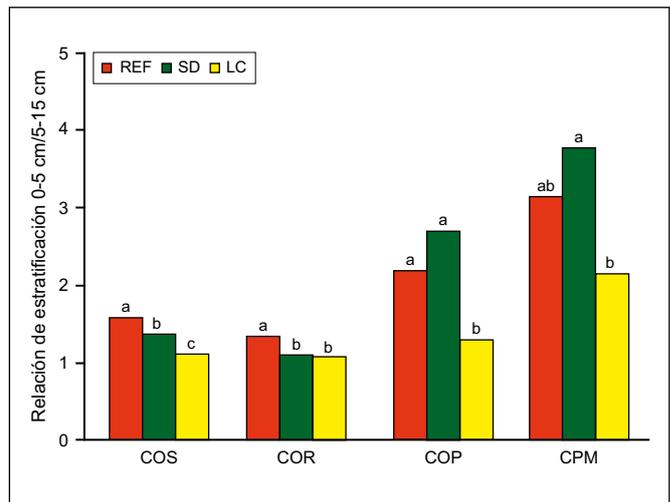


Figura 4. Relaciones de estratificación de los valores de los distintos componentes orgánicos. C orgánico del suelo (COS), C orgánico resistente (COR), C orgánico particulado (COP), y C potencialmente mineralizable (CPM). Letras distintas indican diferencias significativas entre manejos ($p \leq 0.05$). Suelos de referencia (REF), siembra directa (SD) y labranza convencional (LC).

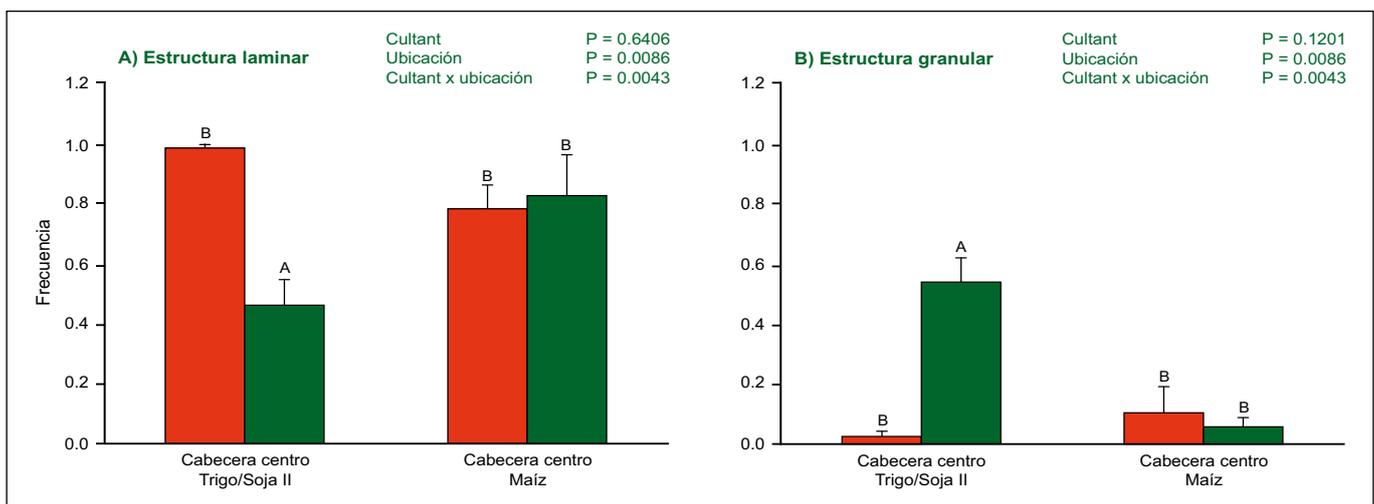


Figura 5. Frecuencia de estructura laminar (A) y granular (B) para cultivo antecesor (Cultant) y ubicación en el lote (Ubicación). Letras distintas indican diferencias significativas entre centro y cabecera para cada antecesor evaluado.

sobre una evolución favorable de estas propiedades a partir de una adecuada relación de estratificación.

Génesis y caracterización de la estructura laminar

Con el objetivo de profundizar en el estudio de la estructura superficial laminar encontrada en SD se realizó un censo de la estructura presente en varios lotes que diferían en los años bajo SD, cultivos antecesores inmediatos antes de la medición y materia orgánica (Álvarez et al., 2012). Dentro de estos lotes se delimitó una zona de mayor tránsito (cabecera) y otra de menor tránsito (centro de lote). La frecuencia de estructura laminar presentó una interacción entre el cultivo antecesor y el tránsito. La condición que presentó menor frecuencia de láminas y mayor estructura granular correspondió al centro del lote (< tránsito) y el doble cultivo trigo-soja de II como antecesor (Figura 5a, b).

En la Figura 6 se puede apreciar los dos tipos de estructura descriptos en muestras de micromorfología correspondientes a la condición de doble cultivo en cabecera y centro.

La estructura laminar está sumamente extendida en la región y, a su vez, generalizada en los suelos evaluados (Figura 5). Esta abundancia fue atribuida a que, en ausencia de laboreo, colapsan los macroporos creados previamente en forma mecánica. Se produce así el asentamiento y re-consolidación del suelo, conformando una estructura planar con clara dominancia de porosidad horizontal (Kay et al., 1985). Estos autores sugieren que la formación abiótica de estos agregados está relacionada con los ciclos congelamiento-descongelamiento, propios de los sistemas productivos donde trabajaron. Estos ciclos terminarían consolidando este tipo de estructura laminar, debido a las lenguas de hielo que se forman dentro de estos poros.

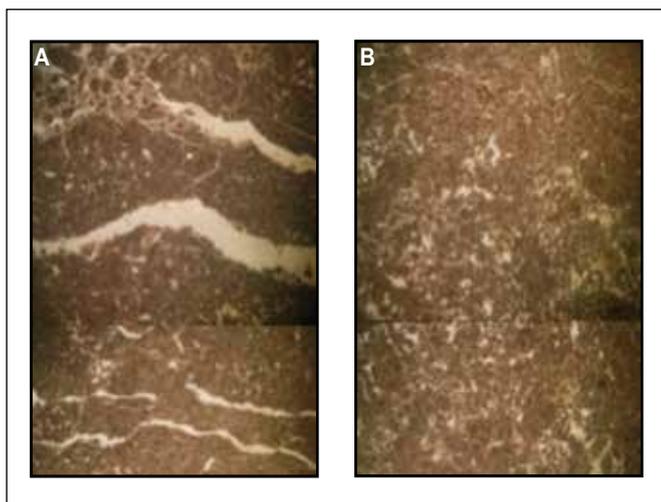


Figura 6. Imágenes micromorfológicas del suelo con trigo/soja de segunda en la zona de cabecera (A; > tránsito) y centro de lote (B; < tránsito) (Álvarez et al., 2012).

En las condiciones ambientales de la Pampa Ondulada, carentes de ciclos de congelamiento-descongelamiento, el proceso puede ser atribuido a la formación de grietas durante la alternancia de ciclos de humedecimiento-secado. Dexter (1988) plantea que el mecanismo de hinchamiento diferencial por humedecimiento repentino se basa en la generación de estreses de tensión por el contacto entre el agua y capas superficiales de suelo muy seco. Como resultado, se generan presiones de aire atrapado en los poros, que dan lugar a la formación de grietas orientadas en forma paralela al frente de humedecimiento.

La mayor presencia de estructura laminar y de mayor espesor en las cabeceras de los lotes independientemente del cultivo antecesor, lleva a considerar al tránsito como un factor adicional que favorece el desarrollo y persistencia de este tipo de estructura. Slowinska-Jurkiewiczy y Domzal (1991) observan la conformación de este tipo estructural en imágenes micromorfológicas como consecuencia del tránsito reiterado. Por otro lado, Horn et al. (2003) midieron con sensores el desplazamiento horizontal del suelo en la capa superficial resultante del rodado que resulta en estructura de tipo laminar.

Se observó que cuanto mayor fue el espesor o desarrollo de la capa con estructura laminar menor fue la infiltración ($r = -0.3373$; $p < 0.05$) y mayor la resistencia al corte ($r = 0.2969$; $p < 0.05$). Por lo tanto, se pone en evidencia el efecto negativo de este tipo de estructura sobre la dinámica de ingreso de agua al suelo como fue observado en el muestreo regional.

Remediación

Acción de las raíces

Los resultados presentados en el apartado anterior muestran que la presencia de raíces en forma continua durante todo el año en el doble cultivo trigo/soja de II, aumentó la proporción de agregación granular. Ello

resalta la importancia del enredado por raíces en suelos limosos con arcillas poco expansibles como mecanismo de formación de agregados. Esto fue confirmado en un censo de tipo de estructura realizado en una pastura, en el tercer año a partir de su implantación. Independientemente de la cabecera o centro, se observó agregación granular producto del enredado de las raíces.

Sin embargo, este tipo de mecanismo de agregación no persiste en el tiempo, por lo que se sugiere como práctica agronómica maximizar la presencia de raíces vivas en estos sistemas productivos. Una alternativa muy valiosa es la incorporación de cultivos de cobertura (CC) que cumplan con esta función y a su vez, al no ser cosechados, el tránsito es menor que en el caso del doble cultivo productivo. Se ha demostrado que los CC reducen la compactación del suelo e incrementan la macroporosidad, facilitando la infiltración y la aireación del suelo. Además, si las raíces de los CC son capaces de atravesar capas compactas, podrían constituir una alternativa de corto plazo para regenerar la estructura, sin necesidad de recurrir a la remoción del suelo. Sería de interés evaluar su acción sobre la orientación de los poros en superficie, buscando aquellos cultivos que favorezcan la reversión de la estructura laminar.

Remoción mecánica de estructuras desfavorables

La detección de compactación o endurecimiento superficial en SD y una menor infiltración –visualizada en forma de encharcamiento temporal– ha llevado a proponer el uso de descompactadores.

Durante tres campañas se llevaron adelante en la Pampa Ondulada 12 ensayos con el objetivo de evaluar el impacto de la descompactación sobre el cultivo de maíz, las propiedades edáficas y su perdurabilidad en el tiempo (Álvarez et al., 2007; Álvarez et al., 2009 a; Álvarez, 2009). Los suelos evaluados fueron los suelos agrícolas más representativos de la región: Hapludoles y Argiudoles Típicos. Los mismos presentan variaciones en el contenido de limo (27-69%), arena (1-57%) y MO (2.7-3.9%) de 0-20 cm. Los suelos fueron descompactados entre 30 y 118 días antes de la siembra.

Durante los ensayos, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo presentaron diferencias entre las campañas (**Figura 7**), especialmente en el mes de diciembre. En las campañas 2004/05 y 2006/07, las precipitaciones durante ese mes superaron ampliamente la media de la región, mientras que en la campaña 2005/06 las mismas fueron 50% inferiores a dicho valor.

En la **Figura 7** se presentan los principales resultados obtenidos en los ensayos. La tasa de infiltración al momento de la siembra del maíz fue 7 veces mayor en el tratamiento descompactado que en el testigo. Las diferencias en la tasas de infiltración entre tratamientos disminuyeron notablemente al momento de la cosecha del maíz, y sólo en un sitio resultó estadísticamente significativa.

La RP fue muy sensible a la práctica de descompactación, mostrando una importante reducción a la siembra en los suelos descompactados. La RP se redujo en promedio el 40% de 0-20 cm y 20% de 20-40 cm por la descompactación. Dicha diferencia entre tratamientos se sostuvo hasta el momento previo a la cosecha del maíz. Los promedios de RP, en general, no superaron los umbrales críticos máximos en los testigos. Teniendo en cuenta que el nivel de humedad edáfica era en general adecuado en todas las situaciones y profundidades no debe descartarse que los umbrales sean sobrepasados en condiciones de suelo más seco (Gupta y Allmaras, 1987; Glinski y Lipiec, 1990).

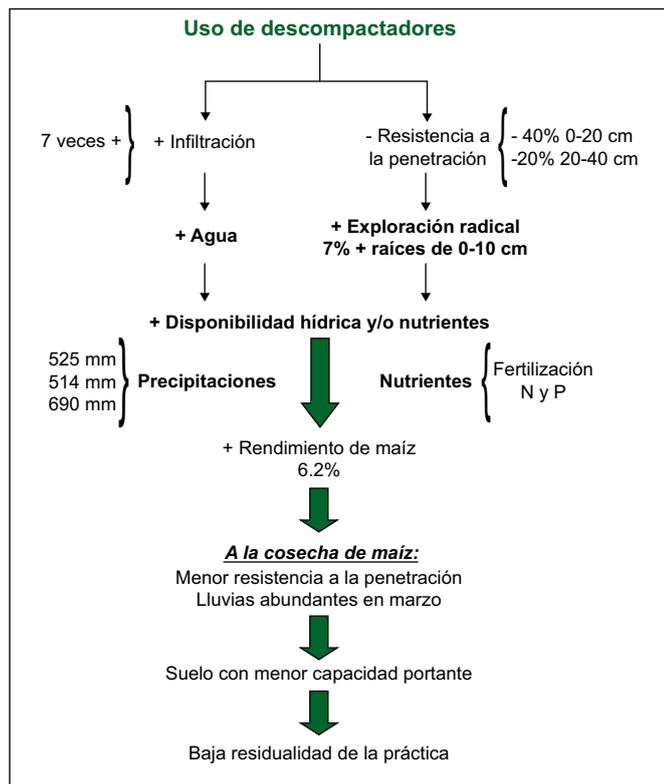


Figura 7. Resumen de los resultados del presente apartado. Las precipitaciones (pp) corresponden a los ciclos de maíz evaluados.

En las dos primeras campañas se evaluó la abundancia radical hasta el metro de profundidad. Sólo se encontró diferencia en la abundancia radical en el estrato integrado de 0-10 cm, siendo 7% mayor en el tratamiento descompactado. Se puede por lo tanto, suponer una mejora en el acceso a recursos (agua y nutrientes).

Cabe destacar que en todas las situaciones se observó presencia de raíces hasta el metro de profundidad, y un importante descenso de la abundancia con la profundidad, independientemente de las diferencias texturales de los suelos. La abundancia de raíces en maíz difiere con lo observado en soja. En esta última se observó que la abundancia era cercana a cero con contenidos de arcilla de 35% (Micucci y Taboada, 2006). Esto puede estar relacionado con la diferente arquitectura radical de ambos cultivos, pivotante y en cabellera. Dardanelli et al. (2003) observaron crecimiento de raíces en forma aglutinada entre las grietas de los horizontes Bt fuertemente texturales.

El rendimiento de maíz fue mayor en el tratamiento descompactado (**Figura 8A, 8B**). El incremento medio fue de 754 kg ha⁻¹; o expresado en forma relativa 6.2 %. El incremento medio varió entre -328 y 1896 kg ha⁻¹ y el relativo entre -2.9% y 17.9%. En términos generales, las campañas evaluadas contaron con una adecuada disponibilidad de lluvias durante el ciclo, a excepción del 2005, donde las lluvias en el periodo crítico fueron sustantivamente menores a las precipitaciones históricas. Los resultados obtenidos encuadran dentro de aquellos antecedentes que hallaron beneficios por parte de la labor de descompactación (Botta et al., 2004; Sadras et al., 2005).

En tres de los sitios se evaluó la RP en el momento de la siembra de la soja de primera o segunda según el caso. En ese momento, más de un año desde la descompactación, los tratamientos no se diferenciaban,

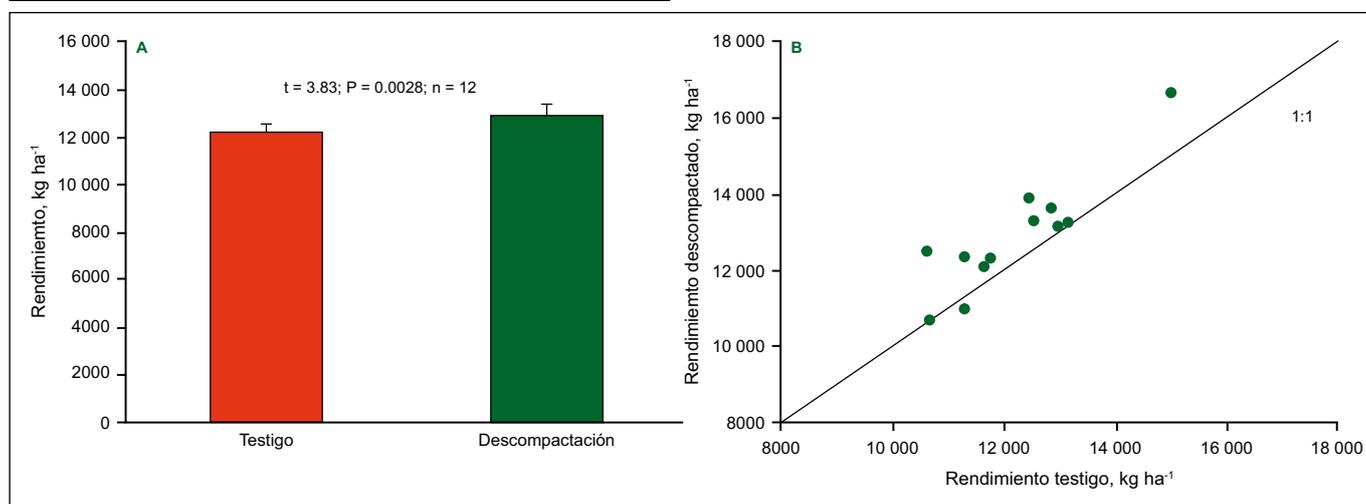


Figura 8. Rendimiento promedio de maíz para los tratamientos testigo y descompactado (A) y rendimiento del tratamiento descompactado vs. testigo (B) . Las barras en A indican el error estándar. La línea llena en B indica la relación 1:1.

sino que por el contrario el tratamiento descompactado presentaba un valor levemente superior al testigo de 0 a 5 cm. Uno de los efectos negativos de una labor de descompactación es dejar al suelo más vulnerable (menor capacidad portante) a la aplicación de nuevos estreses compactantes. El tiempo de re-compactación depende del manejo posterior del tránsito. En el momento previo a la cosecha del cultivo de maíz (abril de 2007), el suelo presentaba aún efectos de la labor de descompactación realizada meses atrás. El escenario hídrico a cosecha de ese cultivo de maíz fue extremadamente húmedo pues las precipitaciones en marzo alcanzaron los 250 mm. Por lo tanto, la cosecha del cultivo se efectuó con el suelo con mínima capacidad portante. Un escenario de alta intensidad de tránsito no controlado y altos rendimientos del maíz pudo haber contribuido a determinar una baja residualidad de la práctica de descompactación. De los resultados obtenidos, surge la importancia de practicar una estrategia preventiva de la re-compactación luego del pasaje del implemento, para extender la residualidad de la práctica. Entre ellos, cabe mencionar evitar el tránsito con baja capacidad portante del suelo (se tratará en el próximo apartado), el control de tránsito (minimizar el área transitada) y la consolidación de estructura a partir del enredado de raíces.

Prevención

Funciones de pedotransferencia para estimar la compactabilidad de los suelos

La compactación es mayor cuando se transita con el suelo húmedo y/o se utilizan neumáticos de alta presión en los equipos pesados. El riesgo de compactación de un suelo puede ser predicho a través del test de compactabilidad de Proctor que se realiza en laboratorio (ASTM, 1982). Este procedimiento estandarizado de ingeniería de suelos determina los cambios de la densidad aparente del suelo en función de su contenido de humedad en respuesta a la aplicación de una energía y procedimiento de compactación estandarizados. Los principales parámetros derivados del test de Proctor son la densidad aparente máxima y el contenido hídrico crítico. En la **Figura 9** se presenta una curva teórica resultante del test de Proctor con los parámetros principales. La densidad máxima se alcanza a un contenido específico de humedad del suelo llamado contenido hídrico crítico. Resulta de interés conocer el contenido hídrico crítico, ya que debe evitarse transitar en esa condición ya que se provoca la mayor compactación del suelo. La realización de este Test es complicada y por lo tanto, resulta importante generar alguna ecuación de edafotransferencia, que permita estimar sus parámetros a partir de propiedades del suelo fáciles de medir (textura, materia orgánica, etc.).

Se analizaron situaciones que comprenden datos propios de lotes de producción (62 casos) y otros de

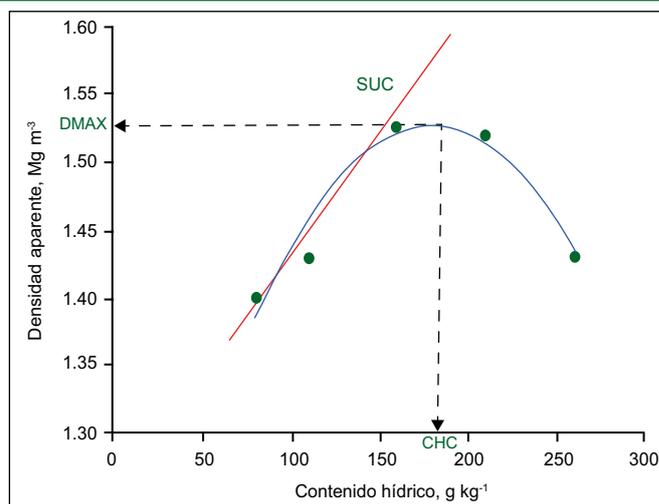


Figura 9. Curva teórica de densidad aparente vs. contenido hídrico del suelo obtenida a partir del Test de Proctor. Densidad aparente máxima alcanzada (DMAX) en el contenido hídrico crítico (CHC). Susceptibilidad a la compactación (SUC) o pendiente de la rama seca.

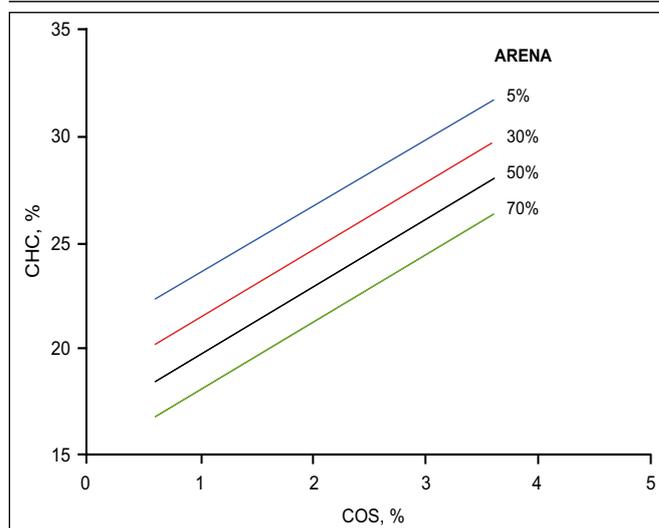


Figura 10. Variación del contenido de humedad crítico (CHC) con el C orgánico del suelo (COS) y el contenido de arena según modelo presentado en la Tabla 2.

trabajos previos publicados de la región (35 casos) (Kruger, 1996; Aragón et al., 2000; Álvarez et al., 2011). Los sitios analizados están distribuidos a lo largo de la región pampeana. Los suelos en su mayoría son Molisoles (Argiudoles Típicos, Abrúpticos y Vérticos; Hapludoles Típicos y Enticos) y, en menor proporción, Entisoles y Vertisoles.

Se ajustaron diferentes modelos para predecir los parámetros del Test de Proctor (**Tabla 2**). Para la densidad aparente máxima, el modelo más simple incluye al C orgánico del suelo como variable predictiva. El contenido de C orgánico del suelo explica aproximadamente la mitad de la variación de la densidad aparente máxima de los suelos ($R^2 = 0.501$). El ajuste (R^2) aumenta un 15.8% con la incorporación del contenido de arena como segunda variable independiente en el modelo de regresión múltiple. Un modelo más complejo fue

Tabla 2. Modelos obtenidos a partir del training set. C orgánico del suelo (%) (COS); densidad aparente máxima (DMAX) según Test de Proctor; contenido de humedad crítico (CHC) donde se alcanza la DMAX. A: contenido de arena (%); M: manejo del suelo, pastura, parques, monte y siembra directa = 0 y 1 para suelos laboreados. Número de muestras = 73. Cuadrado medio del error (CME).

| | Modelos | R ² | CME | P |
|-------------------------------|---|----------------|--------|---------|
| DMAX (Mg m ⁻³) | = 1.6246 - 0.0748 COS (%) | 0.501 | 0.0056 | p<0.001 |
| | = 1.50343 - 0.0649 COS (%) + 0.000273 A (%) | 0.659 | 0.0039 | p<0.001 |
| | = 1.4756 - 0.0599 COS (%) + 0.000275 A (%) + 0.0539 M | 0.711 | 0.0034 | p<0.001 |
| CHC (%) | = 17.1 + 0.3483 COS (%) | 0.465 | 1413 | p<0.001 |
| | = 20.8 + 0.3176 COS (%) - 0.008441 A (%) | 0.530 | 1260 | p<0.001 |
| | = 24 + 0.2776 COS (%) - 0.009166 A (%) - 24.8 M | 0.561 | 1193 | p<0.001 |

obtenido con la incorporación de una variable *dummy* como tercer variable independiente. Esta variable distingue entre las situaciones sin laboreo (suelos no cultivados y SD; valor de la variable *dummy* = 0) y los suelos laboreados (LC, valor de la variable *dummy* = 1). Esta regresión múltiple con tres variables explica alrededor del 70% de la variación de densidad aparente máxima (R² = 0.71).

Las mismas variables independientes predicen el contenido hídrico crítico, pero con signos opuestos. Sin embargo, se obtuvieron menores ajustes para el contenido hídrico crítico, lográndose una explicación de la mitad de variación del mismo (R² = 0.56) con el modelo de regresión múltiple que incluye tres variable independientes.

Los modelos fueron validados con un set de datos independientes y los ajustes obtenidos fueron aún mayores que los logrados con el conjunto de datos usados para obtener los mismos. El mejor modelo predictivo para densidad aparente máxima fue el que incluyó las tres variables; mientras que en el caso del contenido hídrico crítico, se descartó el modelo que incluía la variable *dummy* o ficticia de manejo (0 ó 1), teniendo en cuenta el R² y cuadrado medio del error. El modelo que mejor predijo las variaciones del contenido hídrico crítico fue el que incluyó el C orgánico del suelo y el contenido de arena.

En conclusión, se obtuvieron ecuaciones de edafotransferencia para la región pampeana, mediante las cuales se pueden estimar los parámetros del Test de Proctor a partir de variables de fácil determinación. Adicionalmente, este estudio brinda nueva información sobre el comportamiento de los suelos bajo SD cuando son sometidos a un estrés de tránsito. La compactación del suelo puede ser evitada si se reduce el tránsito, o bien se aumenta la resistencia del suelo para soportar las cargas aplicadas - capacidad portante. En este último caso, se reduce la densidad aparente máxima al aumentar el C orgánico del suelo y con la utilización

de SD. Asimismo, el productor debe evitar transitar el suelo (cosecha, aplicaciones de protección) con valores de contenido hídrico cercanos al contenido hídrico crítico. En la **Figura 10** se presentan los distintos valores de contenido hídrico crítico de suelos con distintos contenidos de C orgánico y arena, de modo de que los productores y técnicos puedan de manera rápida conocer el valor contenido hídrico crítico de sus suelos, y operar considerando el mismo.

Recomendaciones

A partir de los datos emergentes de este trabajo se sugiere para un buen manejo de la calidad física de los suelos en SD:

- Monitorear la evolución de la resistencia a la penetración y la infiltración en planteos de SD continua.
- Propiciar la presencia de raíces vivas que aseguren la agregación por enredado o entramado radical, el cual parece ser un mecanismo de importancia para la buena estructuración de suelos limosos con arcillas no expandibles. Surge de este trabajo que el suelo debería contar con raíces vivas a lo largo de todo el año (CC, doble cultivo).
- Aplicar prácticas tendientes a aumentar o mantener el contenido de MO del suelo, las cuales son las mismas que asegurarían maximizar la agregación por enredado.
- Aplicar medidas preventivas de la compactación como el control del tránsito agrícola y transitar con buena capacidad soporte del suelo (altos contenidos de MO, no transitar el suelo cerca del contenido hídrico crítico).
- Si se aplican medidas correctivas como la descompactación, asegurar su persistencia con un buen manejo pos-práctica aplicando todas las medidas preventivas posibles descriptas en el ítem anterior.

Bibliografía

- AAPRESID. 2011. Asociación Argentina de productores en Siembra Directa. http://www.aapresid.org.ar/images/cms/assets/docs/aapresid.evolucion_sd_en_argentina_2009.pdf. Acceso: 1/4/2011.
- Álvarez, C.R., M.A. Taboada, C. Bustingorri, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2006. Descompactación de suelos manejados en siembra directa bajo cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo*, 24:1-10.
- Álvarez, C.R., M.A. Taboada, F.H. Gutiérrez-Boem, A. Bono, P.L. Fernández, y P. Prystupa. 2009a. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1242-1250.
- Álvarez, C.R., M. Torres Duggan, E.R. Chamorro, D. D'Ambrosio, y M.A. Taboada. 2009b. Efectos a corto plazo y residual de la descompactación en suelos franco limosos en siembra directa cultivados con maíz. *Ciencia del Suelo* 27:159-170.
- Álvarez, C.R. 2009c. Uso de descompactadores en planteos de siembra directa: efecto sobre el suelo y el cultivo en la Región Pampeana. III Taller de Física de Suelos. Organizado por la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba.
- Álvarez, C.R., F.G. Micucci, C. Bustingorri, y M.A. Taboada. 2010. Prediction of Proctor test parameters in the Pampas region of Argentina. *Revista Brasileira do Ciencia do Solo*, 34:1787-1793.
- Álvarez, C.R., A.O. Costantini, A. Bono, M.A. Taboada, F.H. Gutierrez-Boem, P.L. Fernández, y P. Prystupa. 2011. Distribution and vertical stratification of carbon and nitrogen in soil under different managements in the Pampean Region of Argentina. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 35:1985-1994. ISSN 0100-0683.
- Álvarez, C.R., M.A. Taboada, S. Perelman, y H.J.M. Morras. 2012. Topsoil structure in no-tilled silty loam soils in the Rolling Pampas, Argentina. 19th ISTRO Conference, Uruguay.
- Aragón, A., M.G. García, R.R. Filgueira, y Y.A. Pachepsky. 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: The relationship with organic carbon and water content. *Soil Tillage Res.* 56:197-204.
- Botta, G.F., D. Jorajuria, R. Balbuena, M. Ressia, C. Ferrero, H. Rossato, y M. Tourn. 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil Till. Res.* 91:164-172.
- Dardanelli, J.L., M.A. Calmon, J.W. Jones, M.P. Andriani, M.P. Díaz, y D.J. Collino. 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *Trans. ASAE*, 46:1265-1275.
- Derpsch, R. 2011. Situación general de la siembra directa en el mundo. <http://www.rolf-derpsch.com/>. Acceso: 1/4/2011.
- Dexter, A.R. 1988. Advances in the characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11:199-238.
- Franzluebbers, A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66:95-106.
- Glinski, J., y J. Lipiec. 1990. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida. 250 p.
- Gupta, S.C., y R.R. Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6:65-100.
- Horn, R., T. Way, y J. Rostek. 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil Till. Res.* 73:101-106.
- Hubert, F., V. Hallaire, P. Sardini, L. Caner, y D. Heddadj. 2007. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. *Geoderma* 142:226-236.
- Kay, B.D., C.D. Grant, y P.H. Groenevelt. 1985. Significance of ground freezing on soil bulk density under zero tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:973-978.
- Krüger, H.R. 1996. Compactación en Haplustoles del sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 14:104-106.
- Micucci, F.G., y M.A. Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max* Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 86:152-162.
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56:377-400.
- Sadras, V.O., G.J. O'Leary, y D.K. Roget. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91:131-148.
- Sasal, M.C., A.E. Andriulo, y M.A. Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research* 87:9-18.
- Slowińska-Jurkiewicz, A., y H. Domżał. 1991. The structure of the cultivated horizon of soil compacted by wheels of agricultural tractors. *Soil Till. Res.* 19:215-226.
- Strudley, M.W., Green, T.R., Ascough II, J.C. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Tillage Res.* 99:4-48.
- Taboada, M.A., O.A. Barbosa, M.B. Rodríguez, y D.J. Cosentino. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123:233-244.
- Taboada, M.A., O.A. Barbosa, y D.J. Cosentino. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Sci.* 173:130-142.★