

## Capítulo 12

### **Compactación de suelos en el centro-sur de Córdoba: causas, consecuencias y manejo**

### **Soil compaction in south-central Córdoba: causes, consequences and management**

Carmen Cholaky<sup>1</sup>  
*ccholaky@ayv.unrc.edu.ar*

Elena Bonadeo

*\* Autor de contacto*

---

<sup>1</sup> Departamento de Ecología Agraria, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto

## ÍNDICE CAPÍTULO 12

|  |     |
|--|-----|
| ■ RESUMEN .....  | 377 |
| ■ ABSTRACT .....   | 378 |
| ■ INTRODUCCIÓN .....   | 379 |
| Características de los suelos del centro – sur de Córdoba .....                          | 380 |
| Susceptibilidad a la compactación .....  | 385 |
| Condición de superficie: sellos y costras .....  | 387 |
| Efectos del encostramiento .....   | 388 |
| Compactaciones superficiales y subsuperficiales .....                                    | 390 |
| Efecto sobre las propiedades de los suelos .....   | 390 |
| Estructura .....   | 390 |
| Densidad aparente e indicadores de susceptibilidad a la compactación .....               | 393 |
| Resistencia a la penetración.....  | 396 |
| Dinámica hídrica .....   | 397 |
| Efecto sobre la exploración de raíces.....   | 398 |
| Comportamiento de raíces homorizas y alorizas.....                                       | 398 |
| Relaciones entre densidad de longitud de raíces<br>y propiedades físicas del suelo ..... | 401 |
| Compactación asociada a siembra directa .....  | 401 |
| Consecuencias de la alteración de los patrones de exploración de raíces .....            | 402 |
| Efectos sobre el rendimiento .....   | 404 |
| Experiencias de manejo de la compactación subsuperficial por laboreo .....               | 404 |
| ■ CONCLUSIONES .....   | 408 |
| ■ CONSIDERACIONES FINALES: REVERSIÓN, PREVENCIÓN, ATENUACIÓN .....                       | 409 |
| ■ LA VISUALIZACIÓN Y PERCEPCIÓN DEL PROBLEMA .....                                       | 409 |
| ■ BIBLIOGRAFIA.....  | 409 |

## ■ RESUMEN

En los suelos de uso agrícola y agrícola ganadero del centro sur de la provincia de Córdoba, la compactación es un proceso que ocurre desde hace muchos años y ha adquirido una intensidad lo suficientemente elevada como para generar impedancias que afectan negativamente el comportamiento de los principales cultivos del área. En los suelos se ha reducido notoriamente la infiltración, favoreciendo el escurrimiento superficial y la erosión hídrica. En la presente revisión se discute la historia del uso y manejo de estos suelos y se describen las principales características de los mismos, haciendo hincapié en aquellas relacionadas al proceso de compactación. Se establecen los fundamentos por los cuales estos suelos son altamente susceptibles a la compactación. Seguidamente se muestra cómo la compactación superficial y subsuperficial afecta a las propiedades de los suelos, como estructura, resistencia a la penetración y dinámica hídrica. Posteriormente se discute el efecto de la compactación sobre los procesos de emergencia y enraizamiento de los cultivos, puntualizando el efecto sobre los patrones de distribución de las raíces de los principales cultivos del área. Se describen experiencias de manejo de las compactaciones subsuperficiales y cómo afectaron el perfil cultural, la resistencia a la penetración y la erosión hídrica. Se hace especial mención a los efectos de la compactación/descompactación sobre la funcionalidad del suelo. Se concluye enumerando los principales factores que determinan la susceptibilidad a la compactación, el efecto sobre los principales cultivos del área y las posibilidades de recuperación.

### Palabras clave

compactación, descompactación,  
infiltración, escurrimiento,  
resistencia a la penetración.

## ■ ABSTRACT

In the agricultural and livestock farming soils of the southern center of the province of Córdoba, compaction is a process that has occurred for many years and has acquired an intensity high enough to generate alterations that negatively affect the behavior of the main crops of the area, such as the infiltration of water into the soil, favoring surface runoff and water erosion. The present review discusses the history of the use and management of these soils and describes the main characteristics of the soils with emphasis on those related to the compaction process. It establishes the fundamentals by which these soils are highly susceptible to compaction. It also shows how surface and subsurface compaction affect soil properties, such as structure, resistance to penetration and water dynamics. Then, the effects of compaction on the emergence and rooting processes of the crops are discussed, focusing on its effect on root distribution patterns. Experiences of management of subsurface compaction and its effect on cultural profile, resistance to penetration and water erosion are described. Special mention is made of the effects of compaction / decompression on the functionality of the soil. It is concluded by enumerating the main factors that determine the susceptibility to compaction, the effect on the main crops of the area and the possibilities of recovery.

### Keywords

soil compaction,  
soil alleviation, infiltration rate,  
surface runoff, soil penetration resistance.

## ■ INTRODUCCIÓN

En los suelos de uso agrícola y agrícola ganadero del centro sur de la provincia de Córdoba, la compactación es un proceso que ocurre desde hace muchos años y ha adquirido una intensidad lo suficientemente elevada como para generar impedancias que afectan negativamente el comportamiento de los principales cultivos del área. También incide en la calidad del ambiente local y regional, por su efecto sobre la dinámica hídrica de los suelos. La causa más importante de esta problemática es el uso y manejo a los que se ha sometido a los suelos a través de los años. En esta área, las primeras actividades agrícolas se remontan hacia fines del siglo XIX con la llegada de los primeros colonos que comenzaron a cultivar la tierra. Por esos años, los principales cultivos eran de ciclo invernal como lino y trigo y también alfalfa, cultivos que protegían la superficie del suelo del efecto de las precipitaciones y su implantación se realizaba con laboreos que no modificaban sustancialmente la condición física de los suelos.

Entre los años 1940 y 1960 se reemplaza gran parte de los cultivos de invierno por maíz y maní y se comienza así a exponer el suelo desnudo al efecto de las precipitaciones y, por otro lado, se produce un gran refinamiento superficial del suelo con la preparación de camas de siembra y control mecánico de malezas. El equilibrio biológico de los suelos es afectado por aumento de la velocidad de mineralización primaria y baja restitución de materia orgánica por rastros. En los 10 años subsiguientes, entre 1960 y 1970, ya el 50% de las tierras se utiliza para cultivos de cosecha estacionales anuales, se generaliza la mecanización, se incrementa la capacidad de trabajo, y se comienzan a utilizar equipos de labranza y cosecha de gran peso. Además es en este período donde los procesos de erosión hídrica y eólica pasan a ser relevantes.

Entre 1970-1990 aumenta aún más la superficie sembrada con cultivos anuales, irrumpe la soja en forma importante, se incrementa notoriamente el área sembrada con maní, y consecuentemente disminuyen las pasturas. Se destaca el efecto del cultivo de maní sobre el suelo, por su época de siembra, Noviembre, quedando el suelo expuesto hasta ese momento a períodos de alta agresividad climática y sujeto a numerosas prácticas de preparación (se registran hasta 19 labores de presembrado). Aumenta también el número de labores de repaso y continúa en aumento el peso de las maquinarias. Es en este periodo donde se intensifica marcadamente el deterioro de la condición física de los suelos y por ende la formación de pisos de arado y degradación superficial.

Con posterioridad, la irrupción masiva de la siembra directa trae aparejado cambios que si bien se manifiestan en incrementos del contenido de materia orgánica en los primeros centímetros de suelo, comienza en muchos casos, el proceso de compactación del horizonte superficial por el tránsito de maquinarias sobre horizontes "A" de baja estabilidad estructural.

Los efectos nocivos de laboreo y tránsito sobre estos suelos se magnifican por la susceptibilidad intrínseca de los mismos a la compactación, aspecto que se discute seguidamente.

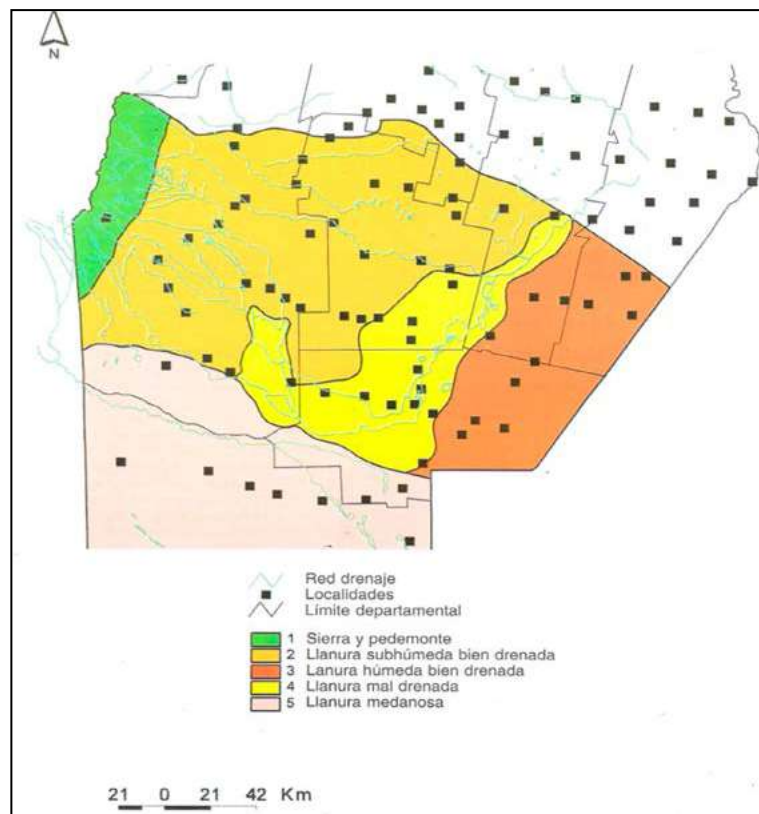
Los primeros registros de compactación de suelos corresponden a estudios realizados por Cantero Gutiérrez *et al.* (1987 a) quienes mencionaban la necesidad de mejorar la condición física de 763.000 ha, solamente en el Dpto. Río Cuarto y cinco años más tarde Bricchi *et al.* (1992) hacían referencia a la importancia de este proceso al mencionar que los principales subgrupos de suelo del Departamento Río Cuarto se encontraban afectados.

En el año 1992, en un informe realizado sobre la cuenca de General Deheza, Becerra *et al.* (1992) mencionan la existencia de compactación a diferentes profundidades, a partir de los 8-10 cm, denominada “pie de rastra”, y a partir de los 18-22 cm, “pie de arado”, y se relaciona la compactación más superficial con excedentes hídricos debido a la disminución de la velocidad de infiltración y el consecuente escurrimiento y a la más profunda con alteraciones de la exploración de raíces y menor rendimiento de los cultivos de la cuenca.

Numerosos estudios posteriores, relacionados a las causas de la compactación, a la modificación de las propiedades de los suelos y a sus efectos sobre los cultivos del área, como así también experiencias relacionadas al manejo de las compactaciones, permiten realizar una síntesis de esta problemática, exponer el grado de conocimiento que se posee hasta la actualidad y plantear aspectos relacionados a su evolución. Previo a ello, es de importancia mencionar que a partir de estudios realizados por el equipo de investigadores del área de Suelos de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UNRC, se desarrolla y patenta un prototipo de subsolador alado, denominado “reja cero”, con el objeto de aplicar una tecnología de manejo que fisure las capas compactadas, removiendo mínimamente la cobertura superficial (Cisneros *et al.*, 1998), que permitió atenuar el efecto de la compactación sobre los cultivos.

### Características de los suelos de centro – sur de Córdoba

En la región del centro-sur de Córdoba se diferencian 5 unidades ambientales (Cantero *et al.*, 1998) **Figura 1**. Seguidamente se presentan las características relevantes y los suelos representativos de las mismas, con énfasis en las unidades donde la problemática de la compactación es de jerarquía **Tabla 1**.



**Figura 1:** Mapa de Unidades ambientales del centro-sur de la provincia de Córdoba (Cantero *et al.*, 1998).

**Figure 1:** Map of environmental units of central southern Córdoba (Cantero *et al.*, 1998).

**Tabla 1:** Características principales de las Unidades Ambientales del centro-sur de Córdoba.**Table 1:** Main characteristics of the environmental units of the center south of Córdoba.

| Unidad Ambiental                      | Superficie (Ha)       | Relieve  | Suelos   | Proceso de compactación  |
|---------------------------------------|-----------------------|--|--|--|
| <b>Sierra y Pedemonte</b>             | 1,8 10 <sup>5</sup>   | Excesivo con afloramientos rocosos y fuertemente ondulado en Pedemonte   | Hapludoles típicos/ enticos y Udhorthentes líticos en laderas (muy someros), textura franca gruesa<br>Udifluventes típicos en valles, Argiudoles y Hapludoles típicos/líticos en pampas de altura y pedemonte , textura franca arenosa                             | Jerárquicamente poco importante, siendo la erosión hídrica el problema más relevante.                              |
| <b>Llanura subhúmeda bien drenada</b> | 2,5 10 <sup>6</sup>   | Normal fuertemente ondulado al oeste, con pendientes cortas y gradientes mayores al 1,5 %<br>Normal a subnormal suavemente ondulado y plano al este. | Hapludoles/ustoles típicos y énticos y Argiudoles/ustoles típicos, textura franca arenosa y franca al oeste a franca limosa al este<br>(Perfiles representativos en <a href="#">Tablas 2, 3 y 4</a> ).   | Importante, asociado al proceso de erosión hídrica   |
|                                       | 2,35 10 <sup>5</sup>  | Subunidad Planicies del sur, suavemente onduladas con pendientes largas y muy largas de gradientes de hasta el 1,5%                                  | Argiustoles y Haplustoles údicos/típicos y enticos<br>Textura franco arenosa muy fina a franca<br>(Perfil representativo en <a href="#">Tabla 5</a> )  | Muy importante   |
| <b>Llanura húmeda bien drenada</b>    | 0,8 x 10 <sup>6</sup> | Normal a subnormal, muy suavemente ondulado  | Hapludoles y Argiudoles típicos en las zonas altas y planas, textura franca limosa y Natralboles y Natracuoles en los bajos.<br>(Perfil representativo en <a href="#">Tabla 6</a> )  | Muy importante en zonas altas y planas   |
| <b>Llanura mal drenada</b>            | 1,2 10 <sup>6</sup>   | Plano a cóncavo.   | Haplustoles enticos franco arenosos a arenoso francos con y sin influencia de la capa freática en profundidad en sectores elevados y Natracuoles y Natralboles, textura franca a franca a franca arenosa muy fina en las planicies y en depresiones salino-sódicas | Jerárquicamente subordinada a los procesos de salinización, alcalinización, anegamiento, inundación, sedimentación |
| <b>Llanura medanosa bien drenada</b>  | 1,8 10 <sup>6</sup>   | Zona de médanos antiguos con paisaje de lomas redondeadas con pendientes medias y largas (2-4%)  | Ustortentes típicos en lomas y Haplustoles típicos y enticos en los bajos, textura arenosa franca con frecuente presencia de gravillas.  | Poco importante, frente al proceso de erosión eólica.  |
|                                       |                       | Zona de médanos modernos y planicies entre médanos   | Ustipsamientos típicos y Haplustoles enticos, textura arenoso franca fina a arenoso fina. (Perfil representativo en <a href="#">Tabla 7</a> ).   | Importante   |

**Tabla 2:** Características de un Hapludol entico, representativo de tierras de loma del oeste de la Llanura subhúmeda fuertemente ondulada (Zona Rodeo Viejo) (Cantero *et al.*, 1984).

**Table 2:** Characteristics of an Entic Hapludoll, representative of the highlands of the western highly undulating sub-humid plains (Rodeo Viejo Zone). (Cantero *et al.*, 1984).

| Variable/Horizonte                     | Ap                                   | A   | AC                                    | C                                     | Ck                                    |
|--|--------------------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Espesor (cm)                           | 0-10                                 | 10-23                                     | 23-32                                 | 32-43                                 | +43                                   |
| Textura                                | Franco arenoso                       | Franco arenoso                            | Franco arenoso                        | Areno franco a franco arenoso         | Areno franco a franco arenoso         |
| Estructura                             | Bloques aplanados medios débiles     | Bloques subang. medios débiles            | Bloques subang. medios débiles        | Masivo apedal                         | Masivo apedal                         |
| Consistencia                           | Duro friable no plástico no adhesivo | Lig. duro friable no plástico no adhesivo | Blando suelto no plástico no adhesivo | Blando suelto no plástico no adhesivo | Blando suelto no plástico no adhesivo |
| CO g kg <sup>-1</sup>                  | 7,2                                  | 9,2                                       | 2,8                                   | 2,4                                   |                                       |
| Arcilla <2 µ g kg <sup>-1</sup>        | 69                                   | 69  | 76                                    | 79                                    | 69                                    |
| Limo 2-20 µ g kg <sup>-1</sup>         | 113                                  | 98  | 116                                   | 124                                   | 120                                   |
| Limo 2-50 µ g kg <sup>-1</sup>         | 225                                  | 183                                       | 238                                   | 238                                   | 209                                   |
| Arena 50-450 µ g kg <sup>-1</sup>      | 706                                  | 749                                       | 686                                   | 683                                   | 722                                   |
| Ca <sup>++</sup> cmol kg <sup>-1</sup> | 5,3                                  | 5,5                                       | 6,3                                   | 8,5                                   |                                       |
| Mg <sup>++</sup> cmol kg <sup>-1</sup> | 0,5                                  | 1,0                                       | 1,3                                   | 1,3                                   |                                       |
| K <sup>+</sup> cmol kg <sup>-1</sup>   | 2,3                                  | 1,6                                       | 2                                     | 2,1                                   | 1,6                                   |
| Na <sup>+</sup> cmol kg <sup>-1</sup>  | 0,1                                  | 0,2                                       | 0,1                                   | 0,1                                   | 0,2                                   |
| CIC cmol kg <sup>-1</sup>              | 13,0                                 | 11,7                                      | 11,2                                  | 11,1                                  | 10,2                                  |

**Tabla 3:** Características de un Hapludol típico, representativo de tierras de bajo del oeste de la Llanura fuertemente ondulada (Zona Spernanzoni) (Cantero *et al.*, 1984).

**Table 3:** Characteristics of a typical Hapludolt, representative of the lowlands of the western much undulated Plains (Speranzoni Zone) (Cantero *et al.*, 1984).

| Variable/Horizonte                     | Ap                                  | A                                   | Bw1                                     | Bw2                                 | Bw3                                 | BC  | C                                       |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Espesor (cm)                           | 0-3                                 | 3-18                                | 18-27                                   | 27-39                               | 39-48                               | 48-62                                     | 62-100                                  |
| Textura                                | franco                              | Franco arenoso                      | franco                                  | Franco arenoso                      | franco arenoso                      | franco arenoso                            | franco arenoso                          |
| Estructura                             | Bloques aplan. medios moder.        | Bloques subang. medios moder.       | Bloques subang. gruesos a medios moder. | Bloques subang. medios moder.       | Bloques subang. medios moder.       | Bloques subang. finos débiles             | Masivo apedal                           |
| Consistencia                           | Duro friable lig. plástico y adhes. | Duro friable lig. plástico y adhes. | Duro friable lig. plástico y adhes.     | Duro friable lig. plástico y adhes. | Duro friable lig. plástico y adhes. | Blando muy friable lig. plástico y adhes. | Blando muy friable no plástico y adhes. |
| CO g kg <sup>-1</sup>                  | 22,6                                | 10,5                                | 10,5                                    | 7,5                                 | 5,2                                 | --  | --                                      |
| Arcilla <2 µ g kg <sup>-1</sup>        | 117                                 | 103                                 | 147                                     | 113                                 | 93                                  | 81  | 79                                      |
| Limo 2-20 µ g kg <sup>-1</sup>         | 286                                 | 209                                 | 272                                     | 206                                 | 177                                 | 152                                       | 157                                     |
| Limo 2-50 µ g kg <sup>-1</sup>         | 397                                 | 323                                 | 410                                     | 324                                 | 331                                 | 256                                       | 287                                     |
| Arena 50-450 µ g kg <sup>-1</sup>      | 486                                 | 574                                 | 443                                     | 563                                 | 577                                 | 664                                       | 634                                     |
| Ca <sup>++</sup> cmol kg <sup>-1</sup> | 8,2                                 | 7,4                                 | 9,8                                     | 8,5                                 | 8,8                                 | 7,0                                       | 7,3                                     |
| Mg <sup>++</sup> cmol kg <sup>-1</sup> | 1,8                                 | 1,3                                 | 1,0                                     | 1,5                                 | 1,0                                 | 1,8                                       | 2,5                                     |
| K <sup>+</sup> cmol kg <sup>-1</sup>   | 3,8                                 | 2,8                                 | 2,4                                     | 2,5                                 | 2,5                                 | 1,9                                       | 1,9                                     |
| Na <sup>+</sup> cmol kg <sup>-1</sup>  | 0,2                                 | 0,1                                 | 0,2                                     | 0,1                                 | 0,1                                 | 0,2                                       | 0,2                                     |
| CIC cmol kg <sup>-1</sup>              | 20,9                                | 14,8                                | 19,6                                    | 17,4                                | 15,7                                | 13,9                                      | 12,6                                    |



**Tabla 4:** Características de un Haplustol típico representativo de tierras planas a suavemente onduladas del este de la Llanura bien drenada subhúmeda (Zona de General Deheza) (Cantero *et al.*, 1984).

**Table 4:** Characteristics of a typical Haplustoll representative of the flatlands to gently undulating lands of the east of the well-drained sub-humid Plain (General Deheza Area). (Cantero *et al.*, 1984).

| Variable/Horizonte                          | Ap  | A12   | Bw1  | Bw2   | Bw3  | Ck  |
|---|---|---|--|---|--|---|
| Espesor (cm)                                | 0-16  | 16-21   | 31-34  | 34-57   | 57-78  | +78   |
| <b>Textura</b>                              | franco  | franco  | franco a franco arenoso                        | franco arenoso a franco                       | franco arenoso a franco                                | franco arenoso a franco                           |
| <b>Estructura</b>                           | Bloques subang. medios a finos moder. a débiles   | Bloques subang. medios moder.                     | Bloques subang. medios moder.a débiles         | Bloques subang. medios a finos muy débiles    | Bloques subang. finos débiles a muy débiles            | Bloques subang. medios y gruesos débiles a moder. |
| <b>Consistencia</b>                         | Duro a lig. Duro friable lig. plástico y adhesivo | Lig. duro a duro friable lig. plástico y adhesivo | Lig. duro muy friable lig. plástico y adhesivo | Lig. duro muy friable lig plástico y adhesivo | Lig. duro a suelto muy friable no plástico no adhesivo | Blando muy friable no plástico no adhesivo        |
| <b>CO g kg<sup>-1</sup></b>                 | 11,9  | 8,3   | 5,3  | 4,2   | 2,4  | 1,0   |
| <b>Arcilla &lt;2 µ g kg<sup>-1</sup></b>    | 130   | 125,8   | 99   | 84,3  | 76,4   | 76,4  |
| <b>Limo 2-20 µ g kg<sup>-1</sup></b>        | 166,4   | 155,0   | 140,8  | 126,7   | 104,8  | 108,1   |
| <b>Limo 2-50 µ g kg<sup>-1</sup></b>        | 436,6   | 432,1   | 373,2  | 365,9   | 337,1  | 344,5   |
| <b>Arena 50-450 µ g kg<sup>-1</sup></b>     | 475,9   | 483,0   | 570,3  | 589,8   | 624,4  | 617,7   |
| <b>Ca<sup>++</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b> | 8,50  | 8,50  | 8,60   | 8,70  | 7,75   | 9,00  |
| <b>Mg<sup>++</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b> | 2,20  | 2,69  | 3,09   | 3,05  | 2,79   | 2,38  |
| <b>K<sup>+</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b>   | 2,56  | 1,64  | 1,43   | 1,33  | 0,88   | 1,23  |
| <b>Na<sup>+</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b>  | 0,22  | 0,26  | 0,22   | 0,29  | 0,27   | 0,74  |
| <b>CIC cmol kg<sup>-1</sup></b>             | 14,89   | 15,10   | 13,75  | 13,45   | 12,62  | 12,17   |

**Tabla 5:** Características de un Haplustol udico representativo de lomas extendidas del sur de la Llanura bien drenada subhúmeda (Zona de Malena) (Cantero *et al.*, 1984).

**Table 5:** Characteristics of an udic Haplustoll representative of lands with extended hills of the south of the well-drained subhumid Plain (Zone of Malena).

| Variable/Horizonte                          | Ap   | Bw1  | Bw2   | Bw3   | BC  | C  | Ck  |
|---|--|--|---|---|---|--|---|
| Espesor (cm)                                | 0-20   | 20-34  | 34-52   | 52-72   | 72-110  | 110-143                                    | +143                                      |
| <b>Textura</b>                              | Franco   | Franco   | Franco  | Franco arenoso                                | Franco arenoso  | Franco arenoso                             | Franco arenoso                            |
| <b>Estructura</b>                           | Bloques ang. medios moder.                                 | Bloques ang. medios a gruesos moder.                       | Bloques subang. medios moder.                       | Bloques subang. medios a finos débiles        | Bloques subang. finos débiles a muy débiles             | Bloques subang. medios gruesos muy débiles | Bloques subang. Muy finos muy débiles     |
| <b>Consistencia</b>                         | Duro a muy duro firme a friable plástico y adhesivo a lig. | Duro a muy duro firme a friable plástico y adhesivo a lig. | Duro a lig. duro friable plástico y adhesivo a lig. | Lig. duro muy friable lig plástico y adhesivo | Lig. duro a suelto muy friable lig. plástico y adhesivo | Blando muy friable no plástico y adhesivo  | Blando muy friable no plástico y adhesivo |
| <b>CO g kg<sup>-1</sup></b>                 | 16,2   | 11,6   | 5,2   | 2,9   | 2,3   | 1,7  | 1,1                                       |
| <b>Arcilla &lt;2 µ g kg<sup>-1</sup></b>    | 200  | 225,8  | 200,9   | 170,1   | 170,5   | 125,0                                      | 100,1                                     |
| <b>Limo 2-20 µ g kg<sup>-1</sup></b>        | 175,4  | 165,0  | 152,3   | 151,5   | 120,9   | 125,6                                      | 124,0                                     |
| <b>Limo 2-50 µ g kg<sup>-1</sup></b>        | 351,0  | 372,0  | 320,6   | 321,4   | 281,2   | 284,0                                      | 291,0                                     |
| <b>Arena 50-450 µ g kg<sup>-1</sup></b>     | 440,0  | 400,1  | 470,1   | 520,1   | 550,6   | 585,6                                      | 600,1                                     |
| <b>Ca<sup>++</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b> | 6,00   | 9,20   | 9,50  | 9,23  | 8,51  | 7,01                                       | 7,01                                      |
| <b>Mg<sup>++</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b> | 2,50   | 3,52   | 4,03  | 4,50  | 4,52  | 3,02                                       | 3,04                                      |
| <b>K<sup>+</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b>   | 2,50   | 2,03   | 1,51  | 1,52  | 1,49  | 2,01                                       | 2,01                                      |
| <b>Na<sup>+</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b>  | 0,2  | 0,2  | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,1  | 0,05                                      |
| <b>CIC cmol kg<sup>-1</sup></b>             | 16,0   | 17,05  | 17,04   | 15,14   | 15,20   | 12,50                                      | 12,00                                     |

**Tabla 6:** Características de un Argiudol típico, representativo de tierras altas y planas (Monte Buey, Provincia de Córdoba) de la Llanura húmeda bien drenada. (INTA, 1978).

**Table 6:** Characteristics of a Typic Argiudoll, representative of high and flat lands (Monte Buey, Province of Córdoba) of the well-drained sub-humid plain. (INTA, 1978).

| Variable/Horizonte                          | A1                                  | B21t                               | B22                                     | B3                                    | C1                                      | C2ca                                    |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------------------|---|---|
| Espesor (cm)                                | 0-22                                | 22-43                              | 43-60                                   | 60-92                                 | 92-104                                  | 104+                                    |
| <b>Textura</b>                              | Franco limoso                       | Franco arcillo limoso              | Franco limoso                           | Franco limoso                         | Franco limoso                           | Franco limoso                           |
| <b>Estructura</b>                           | Bloques subang. medios moder.       | Prismas irregul. medios moder.     | Bloques subang. gruesos a medios moder. | Bloques subang. finos débiles         | masivo                                  | masivo                                  |
| <b>Consistencia</b>                         | Duro friable lig. plástico y adhes. | Muy duro friable plástico y adhes. | Duro friable plástico y adhes.          | Blando friable lig. plástico y adhes. | Blando muy friable no plástico y adhes. | Blando muy friable no plástico y adhes. |
| <b>CO g kg<sup>-1</sup></b>                 | 17,7                                | 7,1                                | 4,0                                     | 2,4                                   | 1,9                                     | 1,3                                     |
| <b>Arcilla &lt;2 µ g kg<sup>-1</sup></b>    | 241                                 | 300                                | 259                                     | 229                                   | 187                                     | 178                                     |
| <b>Limo 2-50 µ g kg<sup>-1</sup></b>        | 624                                 | 518                                | 540                                     | 578                                   | 551                                     | 536                                     |
| <b>Arena 50-250 µ g kg<sup>-1</sup></b>     | 135                                 | 182                                | 201                                     | 213                                   | 260                                     | 261                                     |
| <b>Ca<sup>++</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b> | 11,8                                | 14,0                               | 13,1                                    | 12,5                                  | 13,9                                    |   |
| <b>Mg<sup>++</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b> | 4,0                                 | 5,7                                | 5,7                                     | 4,1                                   | 4,7                                     |   |
| <b>K<sup>+</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b>   | 2,4                                 | 2,5                                | 2,3                                     | 2,2                                   | 2,4                                     | 2,6                                     |
| <b>Na<sup>+</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b>  | 0,3                                 | 0,4                                | 0,4                                     | 0,3                                   | 0,3                                     | 0,5                                     |
| <b>CIC cmol kg<sup>-1</sup></b>             | 20,8                                | 26,1                               | 22,3                                    | 20,3                                  | 20,0                                    | 17,3                                    |

**Tabla 7:** Características de un Ustipsamente típico, representativo de tierras planas entre médanos (Washington, Provincia de Córdoba) en la zona de médanos modernos (Cantero *et al.*, 1984).

**Table 7:** Characteristics of a Typic Ustipsament representative of flat lands between dunes (Washington, Province of Córdoba) in the zone of modern dunes. (Cantero *et al.*, 1984).

| Variable/Horizonte                          | Ap  | AC1   | AC2   | C1                                   | C2  |
|---|---|---|---|--------------------------------------|---|
| Espesor (cm)                                | 0-14                                      | 14-24   | 24-45   | 45-67                                | +67   |
| <b>Textura</b>                              | Arenoso a arenoso franco                  | Arenoso a arenoso franco                                    | Arenoso a arenoso franco                                    | Arenoso                              | Arenoso                                     |
| <b>Estructura</b>                           | Bloques subang. Muy finos muy débiles     | Bloques subang. medios muy débiles                          | Bloques subang. medios muy débiles                          | Masivo apedal                        | Masivo apedal                               |
| <b>Consistencia</b>                         | Suelto muy friable no plástico y adhesivo | Suelto a blando muy friable a suelto no plástico y adhesivo | Suelto a blando muy friable a suelto no plástico y adhesivo | Suelto suelto no plástico y adhesivo | Suelto Blando suelto no plástico y adhesivo |
| <b>CO g kg<sup>-1</sup></b>                 | 10,0                                      | 7,2   | 3,2   | 3,2                                  | 1,9   |
| <b>Arcilla &lt;2 µ g kg<sup>-1</sup></b>    | 39,3                                      | 47,4  | 40,3  | 34,0                                 | 31,7  |
| <b>Limo 2-20 µ g kg<sup>-1</sup></b>        | 36,5                                      | 21,0  | 35,5  | 36,7                                 | 25,4  |
| <b>Limo 2-50 µ g kg<sup>-1</sup></b>        | 81,6                                      | 71,5  | 77,0  | 68,3                                 | 68,9  |
| <b>Arena total g kg<sup>-1</sup></b>        | 879,1                                     | 881,0   | 882,7   | 897,2                                | 899,4                                       |
| <b>Ca<sup>++</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b> | 2,20                                      | 2,20  | 2,60  | 2,60                                 | 2,70  |
| <b>Mg<sup>++</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b> | 1,57                                      | 1,30  | 1,23  | 1,36                                 | 1,29  |
| <b>K<sup>+</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b>   | 1,12                                      | 1,23  | 0,76  | 0,78                                 | 0,42  |
| <b>Na<sup>+</sup> cmol kg<sup>-1</sup></b>  | 0,08                                      | 0,08  | 0,09  | 0,09                                 | 0,09  |
| <b>CIC cmol kg<sup>-1</sup></b>             | 6,08                                      | 5,65  | 5,65  | 5,21                                 | 4,78  |

## Susceptibilidad a la compactación

Si bien, una de las principales causas de la compactación de los suelos del área bajo estudio es el uso y manejo al que han estado sometidos, cabe reconocer que la susceptibilidad a la compactación elevada es una constante, que se manifiesta en diferentes grados según la proporción de macroporosidad, el tipo de granulometría y mineralogía y el contenido de materia orgánica, entre los aspectos más relevantes de los suelos.

La elevada macroporosidad, asociada principalmente a texturas areno francas y franco arenosas de elevada frecuencia en el área abordada, colapsa ante la aplicación de fuerzas y presiones a los suelos, y en estas condiciones texturales la disminución de la porosidad persiste en el tiempo (Lopez *et al.*, 2016; Schmidt & Amiotti, 2015).

La susceptibilidad a la compactación varía con la granulometría y diferentes autores citan a este factor como uno de los más relevantes, según concluye Imhoff *et al.* (2004). Lozano *et al.* (2002) sostienen que la mayor susceptibilidad ocurre con elevada proporción de partículas de baja cohesión (2 - 250 µm) en las capas superficiales y subsuperficiales. En la región de referencia, Cantero *et al.*, (1987 a) mencionan que para los principales subgrupos de suelos, el análisis granulométrico muestra que las fracciones limo (2 a 50 µm) y arena muy fina (50-100 µm), constituyen entre el 60 y 82% de las partículas sólidas. Estas partículas presentan muy baja cohesión entre ellas (Cosentino y Pecorari, 2002), y ante la aplicación de fuerzas y presiones sobre el suelo pueden migrar, reorientarse y lograr un acomodamiento muy estrecho. Esta inestabilidad de agregados en suelos limosos ha sido observada por Ferreras *et al.* (2007).

Otro factor relacionado a la susceptibilidad a la compactación es el contenido de materia orgánica. En el área de referencia es muy importante la disminución del contenido de materia orgánica del suelo (MOS) respecto a condiciones prístinas. Registros desde hace más de 20 años muestran reducciones del 78% en Haplustoles típicos maniseros, siendo la fracción de la materia orgánica joven la más afectada (Moreno *et al.*, 1996). Posteriormente Moreno (2000); Bricchi *et al.* (2000); Cantú *et al.* (2007) y Aoki *et al.* (2014) determinan disminuciones entre el 60 y 80% en Haplustoles típicos y énticos y Hapludoles bajo agricultura. Si bien la siembra directa ha incrementado el contenido de MOS en los primeros centímetros del horizonte superficial, por la presencia de raíces, hifas de hongos y residuos en superficie, no sería suficiente para evitar el aumento de la compactación.

Respecto de la evolución de la materia orgánica en el tiempo, simulaciones realizadas para los próximos 50 años por De Grazia (2010) para los suelos de las unidades ambientales de la **Figura 1**, bajo uso y sistemas de manejo similares a los de 2010, muestran que la MOS disminuiría un 21% en la Llanura bien drenada, 14% en la Llanura medanosa y 6% en la Sierra y Pedemonte y Llanura mal drenada y la menor disminución se daría en la Llanura ondulada (1,4%). Como conclusión surge que la disminución de la MOS sería un factor que continuaría contribuyendo al aumento de la compactación de los suelos, aunque a una tasa menor de la registrada entre situación prístina y la actualidad.

Un aspecto que debe ser considerado es la capacidad de auto regeneración de la estructura luego de sufrir compactación. Para el área bajo estudio, los suelos de textura franco limosa con baja cohesión entre partículas, estrecho acomodamiento y bajo contenido de coloide, determinan baja capacidad de formar grietas y fisuras (Guerif *et al.*, 2002 y Sasal *et al.*, 2006).

La perdurabilidad de las capas compactadas puede asociarse al tipo de arcilla predominante. Estudios realizados por Grumelli *et al.* (2008) han determinado presencia de arcillas illíticas en Argiudoles típicos limosos gruesos en todos los horizontes y en algunos de ellos escasa proporción de caolinitas y en una toposecuencia de Haplustoles típicos – Argiudoles típicos de La Carolina del Potosí (Hampp, 2003) encontró predominancia de illitas – vermiculitas, 2:1. Estas arcillas le brindan a los suelos escasa capacidad de contracción – dilatación y por ello escasa habilidad para la regeneración de su estructura, confiriéndole muy baja potencialidad de auto-mullido (Cosentino & Pecorari, 2002; Sasal *et al.*, 2006). Estos autores sostienen además, que el comportamiento de estas arcillas es rígido, manifestando un cambio de volumen muy leve a medida que se modifica el nivel de humedad. De acuerdo a Kay (1990) la regeneración de la porosidad del suelo está fuertemente relacionada a la formación de microgrietas durante el proceso de humedecimiento-secado.

Otra cuestión a tener en cuenta, es la progresiva disminución del calcio intercambiable de los suelos considerados (Hampp *et al.*, 1987; Bonadeo *et al.*, 2016), asociado a la continua extracción por leguminosas, principalmente soja y en menor grado alfalfa, lo que contribuye también al proceso de degradación estructural.


En síntesis, el alto contenido de partículas entre 2-100 micras, la baja concentración de arcilla con predominancia de illita y el bajo contenido de MOS, conducen a que ni los medios abióticos (expansión-contracción) ni los biológicos (lombrices, raíces), de acuerdo a Domínguez *et al.* (2009), sean efectivos para revertir los procesos de degradación física. Además, debe considerarse en el análisis, el grado de deterioro actual que presenta el suelo.

## Condición de superficie: sellos y costras

La formación de sellos y costras son procesos frecuentes en los suelos que se consideran en este escrito. Se define como sello a una capa de pocos milímetros de espesor, elevada densidad aparente, baja porosidad, principalmente no comunicante y como costra a una capa delgada muy compacta, con estructura laminar, densidad aparente elevada y baja porosidad no comunicante. Esta última se origina a partir de la pérdida de humedad del sello (Taboada & Alvarez, 2008; Porta *et al.*, 2014).

Entre los factores que predisponen a la formación de costras se mencionan, lluvias de alta intensidad con elevado potencial de energía cinética, suelos con escasa o nula cobertura superficial y baja estabilidad estructural y además se aclara que deben concurrir los tres factores (Taboada & Alvarez, 2008).

De acuerdo al régimen monzónico que caracteriza a las precipitaciones de la región, alrededor del 70% de los 800 mm de promedio anual, se producen en el período primavera-verano. Especialmente en las unidades ambientales de Sierra-pedemonte y oeste de la Llanura subhúmeda bien drenada, se producen precipitaciones de elevada frecuencia e intensidad de hasta  $100 \text{ mm h}^{-1}$ . La intensidad de las precipitaciones tiende a disminuir hacia el este de la región, mientras que la cantidad total anual de lluvias se incrementa en esa dirección, es decir hacia la Llanura húmeda bien drenada y disminuye hacia el sur de la región, en la Llanura medanosa.

El otro factor, la cobertura superficial, está asociado al tipo de cultivo, su rendimiento y manejo de los residuos de cosecha. El pastoreo de rastrojos y sistema de laboreo utilizado condicionan el grado de cobertura producido, de modo que las labranzas cero y mínima, las más frecuentes en la actualidad, son las que generan mayor cobertura superficial a partir de los restos de cosecha. La acumulación de la cubierta vegetal se logra en áreas planas y levemente onduladas con rotaciones que incluyen cultivos de gramíneas en la secuencia pero se transforma en algo difícil de lograr en áreas onduladas, debido a que el material es arrastrado y redistribuido por el viento y agua de escurrimiento **Figura 2** .



**Figura 2A:** Cobertura de maíz en área de llanuras bien drenadas (Cuatro Vientos) y **B:** en el área fuertemente ondulada donde es depositada por el agua y el viento en el alambrado (Estación Achiras).

**Figure 2A:** Maize stubble in well drained plains area (Cuatro Vientos) and **B:** in the highly undulating area **B:** where it is deposited by water and wind on fences (Achiras Station).

Finalmente, la estabilidad de los agregados es considerada como uno de los factores críticos de resistencia al deterioro estructural de la superficie del suelo (Taboada & Álvarez, 2008). Para la región



bajo análisis las texturas predominantes, areno franco, franco arenosa y franca, y el contenido de materia orgánica son factores claves en la determinación de la estabilidad de los agregados.

Los contenidos de materia orgánica han disminuido notoriamente respecto de situaciones prístinas, tal cual lo expuesto en el apartado sobre susceptibilidad abordado en el presente capítulo. Estas marcadas reducciones afectan la estabilidad de los agregados especialmente en los suelos de textura areno-franca muy fina.

En la **Figura 3** se observa como el desmonte ha dejado expuesto el suelo de textura areno franca de muy baja estabilidad estructural. El elevado contenido de arena muy fina de estos suelos, el bajo contenido de arcilla y de materia orgánica, determinan que exista una susceptibilidad natural a la formación de sellos y costras débiles, ocasionando problemas de emergencia en cultivos muy sensibles. Esta problemática se da hacia el sudoeste de la región, en el límite entre las unidades de Llanura subhúmeda bien drenada y Llanura medanosa.

Hacia el este de la Llanura subhúmeda bien drenada, con suelos de textura franco arenosa predominante, es más frecuente la formación de sellos y costras y la problemática es más relevante que en el caso anterior, si bien, las costras constituidas por placas gruesas son generalmente débiles y sin grietas dado el escaso contenido de arcilla y fundamentalmente a su mineralogía illítica. Bonadeo *et al.* (1983) citan para Argiudoles/ustoles típicos, Hapludoles/ustoles típicos y énticos de esta unidad ambiental, la facilidad para el desarrollo de estructuras pseudolaminares en superficie, “costras”, que en general son continuas y con resistencia de hasta 16 bares.



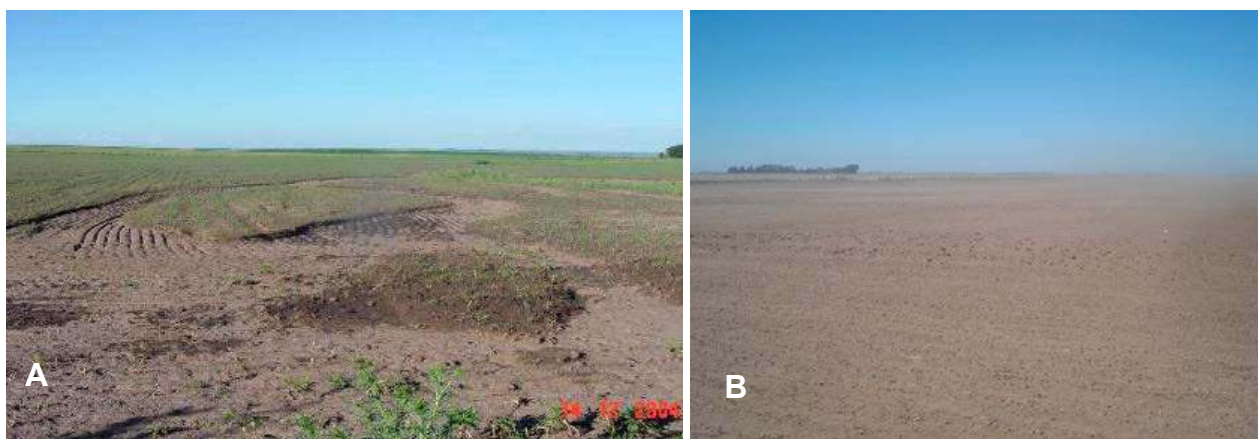
**Figura 3:** Desmonte en Haplustol entico arenoso franco del límite de Córdoba y San Luis, a la altura de la Ruta Nacional 8.

**Figure 3:** Deforestation in an Entic Haplustoll between Córdoba and San Luis on route 8.

## Efectos del encostramiento

Aquí se debe considerar el efecto sobre la infiltración de agua al suelo y sobre la emergencia de las plántulas en general. De gran importancia es la consecuencia que ejerce el encostramiento sobre la entrada de agua al suelo ya que desencadena procesos erosivos de importante magnitud con la

consecuente pérdida de agua para los cultivos. Parte de los grandes deterioros de los suelos como la erosión por surcos y por cárcavas se han visto incrementados por el desarrollo de sellos que disminuyen marcadamente la entrada de agua al suelo y al haber pendiente se generan grandes volúmenes de agua que escurren produciendo erosión hídrica. Así también, cuando el sello se seca, las partículas quedan sujetas a procesos de erosión eólica **Figura 4** ☉.



**Figura 4 A:** Erosión hídrica laminar y en surcos en ambiente suavemente ondulado, con sello superficial .

**B:** Erosión eólica luego de la formación y secado del sello superficial .

**Figure 4 A:** Laminar and furrow erosion in an undulating environment, with surface seal

**B:** Wind erosion after formation and drying of the surface seal.

El encostramiento afecta la emergencia de los principales cultivos del área en forma diferenciada siendo la soja uno de los más afectados **Figura 5** ☉ como también el sorgo y la alfalfa, atribuible en parte, a su pequeño tamaño de semilla.



**Figura 5 A:** Levantamiento de placa de suelo encostrado por cultivo de soja; **B:** detalle de estructura de costra en suelo franco.

**Figure 5 A:** Emergence of soybean seedlings in crusted soil; **B:** superficial crust of a loam soil.

Bricchi *et al.* (1997) en un estudio realizado sobre un Haplustol típico franco grueso, evaluaron la susceptibilidad a la formación de sello superficial en diferentes situaciones con siembra directa y labranza convencional y las compararon con una situación de referencia con mínima alteración. Observaron, que en esta última no se formó sello, a diferencia de lo ocurrido en los tratamientos de manejo en donde sí se produjo la formación de sello superficial reduciendo hasta 6 veces el flujo de agua y condicionando marcadamente a la velocidad de infiltración.

## Compactaciones superficiales y subsuperficiales

### Efecto sobre las propiedades de los suelos

La compactación es el proceso que conduce a la densificación del suelo cuando se le aplican fuerzas o presiones. Como resultado se incrementa la densidad aparente, se reduce la porosidad total y cambia la distribución de tamaños de poros, afectando la funcionalidad global del perfil de suelo. Se altera el espacio para la exploración radicular, la infiltración, almacenaje y utilización del agua por las plantas, el intercambio gaseoso y flujos térmicos, la disponibilidad y absorción de nutrientes al producir condiciones inadecuadas para la actividad biológica del suelo. Esta disfuncionalidad no solo ocasiona problemas en la producción de los cultivos sino también trae como consecuencia incrementos en procesos de erosión, especialmente hídrica (Cisneros *et al.*, 2012; Cisneros *et al.*, 2015) y en los requerimientos de potencia para revertirla mediante labores mecánicas (Cholaky *et al.*, 2010).

### Estructura

La estructura edáfica presenta marcadas modificaciones como consecuencia de la compactación. Se producen alteraciones en el tipo, clase y grado de las unidades estructurales así como en el arreglo y organización de las mismas, cambiando de este modo el espacio poroso dentro y entre agregados.

Las características de la estructura de las capas compactadas se constituyen entonces en indicadores adecuados de la degradación física presente. Terrones grandes, duros y muy duros, con caras de debilidad lisas, sin porosidad visible son los rasgos comunes de la estructura de estas capas, que generalmente se ubican en los primeros 30 cm de profundidad **Figura 6** ©.



**Figura 6:** Unidades estructurales y crecimiento de raíces en capas subsuperficiales compactadas de Molisols del centro-sur de Córdoba.

**Figure 6:** Soil peds and root growth in subsuperficial plows pans of Mollisols in Córdoba.



En los principales suelos de la región se presentan alteraciones morfológicas no genéticas. Inmediatamente por debajo de la superficie se aprecia en algunos casos el desarrollo de estructura pseudo laminar y, en otros como en Hapludoles típicos, el tipo de estructura es en bloques angulares aplanados y los límites entre horizontes son abruptos (Bonadeo *et al.* 1983). Cantero Gutiérrez *et al.* (1987 b), registraron alteraciones morfológicas no genéticas superficiales y subsuperficiales con incremento de densidad aparente que a veces modificaba todo el solum, así como también susceptibilidad para el desarrollo de estructuras seudo laminares y disminución de la velocidad de entrada y posterior redistribución de agua al suelo **Figura 7** ☉.



**Figura 7 A:** Estructura en bloques aplanados y pseudo laminar en superficie en Molisoles del centro-sur de Córdoba.

**Figure 7 A:** Soil Structure in flattened and pseudo-laminar blocks in the surface of Molisols of central - south of Córdoba.

En Haplustoles típicos y enticos compactados del área estudiada, la estructura del perfil cultural, entendiendo como tal al espesor del suelo afectado por el manejo (labranzas, tránsito), se ve alterada marcadamente (Bricchi, 1993; Cholaky *et al.*, 2005). Desde la superficie hasta los 30 cm de profundidad aproximadamente, es común encontrar una secuencia de capas en sentido vertical y horizontal, diferenciadas por su estructura. Desde superficie hasta aproximadamente unos 8 cm de profundidad, se observa una elevada desagregación, con presencia de pequeños bloques aplanados, finos y muy finos, menores a 10 mm, muy débiles, acompañados de abundantes partículas esqueléticas. Estas características de la estructura superficial definen una elevada susceptibilidad a la formación de sellos como se mencionó precedentemente, especialmente cuando el suelo está descubierto.

Por debajo de aquella capa, comienza otra de mayor espesor, que se extiende hasta aproximadamente los 30 cm de profundidad y que se encuentra muy compactada. En ella las unidades estructurales presentan elevada cohesión en seco y en húmedo, poseen dimensiones que promedian los 80-100 mm, y se organizan de forma masiva, con baja porosidad intra-agregados, siendo muy difíciles de diferenciarlas entre sí **Figura 8** ☉

Cholaky *et al.* (2005) observaron que esta capa densificada, se presentó uniformemente compactada desde los 12 a 30 cm de profundidad aproximadamente, abarcando en promedio un 64% de la superficie total evaluada. El espesor de esta capa, según lo expresado por Jorajuría *et al.* (1996) y Mckyes (1985), indicaría que esta compactación podría ser el resultado del efecto aditivo del pasaje de implementos de labranza como el arado de rejas y vertedera o rastras, ocasionando “pisos de arado” o

más superficialmente “pisos de rastra” y de la compactación inducida por el tráfico de tractores y otros equipos agrícolas. En este último caso, de acuerdo a estos autores, no sólo el peso del equipo influye en la densificación generada por su tránsito, sino también el número de pasadas que realiza el mismo, con lo que aumenta progresivamente la profundidad y el ancho del volumen de suelo compactado.



**Figura 8A:** Perfil cultural de un Haplustol típico en siembra directa continua. Nótese la capa superficial y el resto del perfil correspondiente a la capa compactada; **B:** “Piso de arado” (b).

**Figure 8B:** Cultural profile of a Typical Haplustoll in continuous no tillage. Note the surface layer and the rest of the profile corresponding to the compacted layer; **B:** “Plow pan” (b)

De acuerdo a Cholaký (2003) el diámetro medio ponderal (DMP) de agregados en el perfil cultural de un Haplustol típico degradado de General Deheza, fue de 12,1 mm, 22,4 mm, 81,2 mm y 44,5 mm para los espesores de 0-6 cm, 6-12 cm, 12-28 cm y + 28 cm, respectivamente y la distribución de tamaños de agregados difirió marcadamente entre capas. Es de remarcar que el espesor con mayor DMP corresponde al “piso de arado”, dimensiones que resultan excesivas, si se considera que los tamaños óptimos para la funcionalidad física oscilan entre 0,1 y 16 mm (Braunack & Dexter, 1989) y el tamaño de agregados de 1-4 mm se asocia con mejores propiedades biológicas e hidráulicas (Noellemeyer *et al.*, 2008), debidas a una estructura de poros estables, continuos e interconectados (Wiermann & Horn, 2000).

La gran magnitud de los terrones podría explicarse a partir de la unión de pequeños agregados inestables y partículas que se desprenden de ellos y migran durante periodos de humedecimiento del perfil (Winkelblech, 1961), desarrollándose así las unidades estructurales de grandes dimensiones. La fuerza de unión entre partículas es la cohesión y es la que explica el incremento de la resistencia que presentan estas capas (Utomo & Dexter, 1981).

En relación a la estabilidad de la estructura, Moreno *et al.* (1996) encontraron que el índice de estabilidad de agregados en un Haplustol típico del área agrícola manisera de Córdoba fue del 14,89 % respecto del suelo del monte natural y la distribución de tamaños de agregados cambió sustancialmente entre ambas situaciones, presentando el suelo agrícola un 58% de agregados pequeños de 0,1 mm, mientras que en el monte natural el 77% de ellos correspondió a los tamaños entre 8 y 3 mm.

Por otro lado, otra causa que puede explicar el deterioro de la estructura de los suelos, es la que estudiaron Hampp *et al.* (1997). A partir de la caracterización de la condición físico-química de Haplustoles y Hapludoles típicos de las planicies del sur y este de la Llanura subhúmeda bien drenada, observaron que en los horizontes Ap, Ad y Bw de 7 suelos representativos de la región, con rotaciones que incluían pasturas de alfalfa, el pH osciló en 5,5 en todos los horizontes y la saturación con  $\text{Ca}^{+2}$  fue

baja, especialmente en los dos primeros horizontes, oscilando entre el 30,8% y el 55,4%, habiendo una relación entre ambas variables. Todos los casos manifestaron estado de dispersión del coloide atribuyéndolo a la pérdida de bases, particularmente de  $\text{Ca}^{+2}$ , indicando que el complejo órgano mineral de estos suelos, especialmente en los horizontes afectados por acción antrópica, se encontraba al límite mínimo de la floculación.

## Densidad aparente e indicadores de susceptibilidad a la compactación

La densidad aparente es una variable sensible, indicadora de la compactación edáfica. En las capas compactadas del suelo esta variable se incrementa en detrimento de la porosidad, hasta alcanzar niveles críticos para la exploración radicular y el ingreso y la circulación del agua y del aire.

La macroporosidad es la porción de tamaño de poros más susceptible a la degradación (Gil, 2015; Noellemeyer *et al.*, 2008) produciéndose disminuciones cercanas al 50 % en Molisoles con historia agrícola, régimen de humedad údico y ústicos (Bricchi, 1993; Lopez *et al.*, 2016, respectivamente), respecto a sitios naturales. Este tamaño de poros ( $>30 \mu\text{m}$ ) incide en la velocidad de infiltración y drenaje y en la aireación del perfil. Por el contrario, el tamaño correspondiente a los mesoporos pequeños y microporos ( $< 10 \mu\text{m}$ ) se incrementa hasta en un 30% debido al proceso de compactación (Bricchi, 1993).

Hace 30 años, Cantero *et al.* (1987) ya informaban que en los principales subgrupos de suelos de la región, la densidad aparente (DAP) variaba entre 1,06 y 1,63  $\text{Mg m}^{-3}$ , con valores medios de 1,25  $\text{Mg m}^{-3}$ , correspondiendo los valores más bajos a horizontes superficiales de poca alteración y que si se tomaban como referencia, se podía demostrar que para texturas similares había incrementos de densidad de hasta el 40%, lo que se manifestaba en reducciones de porosidad total del orden del 55–60%.

El área manisera de Córdoba, corresponde a una región especialmente afectada por procesos de compactación de los suelos (Haplustoles típicos y enticos). Cisneros *et al.* (1997) evaluaron indicadores físicos de un Haplustol típico franco arenoso de la Serie General Deheza, en una condición con Agricultura continua por más de 80 años y la compararon con otra de referencia bajo Monte natural de algarrobo (*Prosopis nigra*). Observaron que en la primera situación la DAP de 7-15 cm y de 20-30 cm de profundidad presentaba incrementos del 28,6% y 24,5%, respectivamente, respecto a similares espesores de la situación con mínimo disturbio.

Los mismos autores encontraron una relación inversa entre la densidad aparente y la conductividad hidráulica saturada. Lopez *et al.* (2016) en Haplustoles del sur bonaerense, observaron similar relación entre la macroporosidad y la densidad aparente. Si se consideran estas relaciones entre indicadores de la condición física de los suelos, y se las asocia a las características del clima y al uso y manejo de las tierras, discutidas en la introducción de este capítulo, se podría explicar, en parte, la elevada proporción de las lluvias que no infiltra y escurre (Cisneros *et al.*, 2012; Gil, 2015) y la erosión hídrica laminar y en cárcavas presentes en lotes productivos y caminos, así como procesos de sedimentación e inundación en poblaciones de la región manisera (Becerra *et al.*, 1992; Cisneros *et al.*, 2004).

En esta región manisera, en un estudio también realizado sobre un Haplustol típico de General Deheza, Domínguez *et al.* (2010) atribuyeron una reducción significativa en la macrofauna del suelo, especialmente lombrices, y en la velocidad de descomposición de residuos vegetales en la que ella, junto a la micro y mesofauna, tiene un rol importante, al incremento de la densidad aparente de 1,22  $\text{Mg m}^{-3}$  a 1,33  $\text{Mg m}^{-3}$  y a la disminución de la materia orgánica del suelo (MOS) de 35,1  $\text{g kg}^{-1}$  a 25,8  $\text{g kg}^{-1}$  del horizonte superficial.



La intensa reducción en MOS tiene un efecto marcado sobre la compactación y la susceptibilidad a la compactación de los suelos. Cisneros *et al.* (1997) evaluaron la compactabilidad de un Haplustol típico franco arenoso con uso agrícola prolongado y una situación de monte natural, a través de los indicadores densidad máxima (DAm<sub>ax</sub>) (obtenidos mediante el ensayo Proctor) y contenido de agua crítico (HC). La DAm<sub>ax</sub> de las capas del suelo agrícola (1,67 Mg m<sup>-3</sup> y 1,70 Mg m<sup>-3</sup> de 7-15 cm y 20-30 cm, respectivamente) superó ampliamente a la alcanzada en el perfil de monte natural (1,39 Mg m<sup>-3</sup> de 0-15 cm), indicando que ambas situaciones presentan condiciones físicas y biológicas diferentes y que la situación agrícola podría presentar condiciones de resistencia y porosidad más desfavorables que la situación prístina y en el espesor de 20-30 cm este efecto sería aún mayor. Estas diferencias guardan una estrecha relación con la MOS de ambas situaciones. La HC fue 180 g kg<sup>-1</sup> y 240 g kg<sup>-1</sup> en las capas del suelo agrícola y del suelo del monte natural, respectivamente.

Resultados similares fueron obtenidos por Principi (2011) al comparar la capa superficial (10 cm) de un Hapludol típico del oeste de Río Cuarto, Córdoba, con agricultura continua en base a maíz-soja en siembra directa durante 15 años, con similar espesor de una situación con mínimo disturbio, siendo la MOS en las mismas situaciones y momento de evaluación, de 18,2 g kg<sup>-1</sup> y 61,9 g kg<sup>-1</sup> (Natali, 2013), respectivamente. Por su parte, Parra *et al.* (2011), estudiaron la relación entre carbono orgánico (COS) y DAm<sub>ax</sub> en Haplustoles típicos del área de General Deheza, Córdoba y observaron que esta relación se manifestó solamente cuando el COS fue mayor a 10 g kg<sup>-1</sup> y atribuyeron el efecto positivo del COS al incremento en la estabilidad estructural y en la retención de agua del suelo, que actuarían como amortiguador de las partículas minerales durante la compactación. Cholaký (2003) informa valores de densidad máxima y contenido de agua crítico para un Haplustol típico franco arenoso muy fino de General Deheza, Córdoba, con historia agrícola por más de 100 años. La Densidad máxima y el contenido de agua crítico de los horizontes Ap<sub>2</sub> y Ad<sub>1</sub> y Ad<sub>2</sub> son coincidentes con los informados por Cisneros *et al.* (1997) y Parra *et al.* (2011). La materia orgánica, raíces, hifas de hongos, residuos en superficie incrementan la resistencia a la compactación del suelo, efecto que es necesario tener en cuenta en el diseño de estrategias de manejo de la compactación.

Cabe destacar que en este suelo, la HC es similar o levemente superior al contenido de agua a capacidad de campo, condición que puede también contribuir a la compactación que presentan las capas del perfil cultural, debido a la coincidencia con el contenido de agua óptimo para la labranza (consistencia friable).

De acuerdo a Díaz-Zorita & Grosso (2000) quienes estudiaron las propiedades físicas de tres grupos texturales de suelos de la región pampeana, sostienen que en los suelos arenoso francos y francos el contenido de agua crítico es mayor que el de capacidad de campo, mientras que en suelos franco limosos es al revés, siendo estos últimos los más susceptibles a la compactación. En relación a ello, puede sostenerse que en los suelos del área centro-sur de Córdoba, en donde la proporción de limos se incrementa desde el suroeste al noreste, la susceptibilidad a la compactación se incrementa en esta dirección, coincidiendo con las tierras de mayor capacidad de uso agrícola de la región.

Complementariamente a las características de los suelos que definen su compactabilidad, los aspectos del manejo de los mismos tienen elevada incidencia sobre ella. En este sentido, las características del tráfico agrícola, como carga por eje del vehículo, presión de contacto, número de pasadas, entre otros aspectos, así como contenido de agua y nivel de aflojamiento que presenta el suelo al momento del tránsito, son de relevancia para el efecto sobre la condición física que presentan los suelos.

En relación a ello, la superficie transitada por los rodados de los equipos agrícolas supera el 60% del área total bajo agricultura en cada campaña (Gerster & Bacigalupo, 2016; Duttman, 2014). Dentro de un lote, la proporción de la superficie del suelo afectada durante la cosecha es alta, solamente los rodados de las cosechadoras cubren entre un 30 y 35% de la misma, el tránsito de las tolvas cargadas afecta alrededor del 40% de la superficie y alrededor del 25% del área es transitada por la cosechadora y la tolva (Duttmann, 2014). El contenido de agua que presenta el perfil en el momento que se le aplican las cargas y presiones es uno de los principales factores que inciden en la compactación del mismo.

En la región, las lluvias de final de verano y principios de otoño, en ocasiones generan condiciones de excesiva humedad del perfil al momento de cosecha de los granos, lo que produce un intenso “huelado” en superficie producto de la deformación plástica del suelo en las zonas de aplicación de fuerzas

**Figura 9** ©.



**Figura 9:** Huella en la superficie de Hapludol típico del oeste de Río Cuarto generada por el tránsito de maquinarias agrícolas en condiciones de excesiva humedad.

**Figure 9:** Footprint on the surface of a Typic Hapludoll of the west of Río Cuarto generated by agricultural machinery in conditions of excessive humidity.

Con el objeto de evaluar el efecto del contenido de agua del suelo al momento del tránsito en un Hapludol típico franco arenoso del oeste de Río Cuarto, Glamuzina (2008) llevó a cabo una experiencia que consistió en la realización de ocho pasadas de tractor consecutivas sobre la misma huella, con tres contenidos de agua promedio de los primeros 10 cm de suelo: seco ( $110 \text{ g kg}^{-1}$ ), húmedo, levemente por encima de capacidad de campo ( $210 \text{ g kg}^{-1}$ ) y mojado ( $260 \text{ g kg}^{-1}$ ) y un testigo que no fue transitado. Sobre la superficie había alrededor de  $14.000 \text{ kg}$  de materia seca  $\text{ha}^{-1}$  de un rastrojo de maíz que generaba una cobertura del 91%. Observó que la densidad aparente se incrementó significativamente hasta los 25 cm de profundidad con el tránsito en condición de suelo mojado, alcanzando una compactación relativa del 90%, mientras que en las condiciones de menor contenido de agua se apreció un leve incremento no significativo hasta los 15 cm aproximadamente, donde la compactación relativa fue del 75%.

A medida que el contenido de agua del suelo se incrementa, ante la aplicación de una fuerza, este se comprime y dicha compactación perdura una vez retirada la fuerza. Como resultado se incrementa la densidad aparente. Este efecto se hace más intenso a medida que aumenta la proporción de arcilla en el suelo, en donde la consistencia plástica incrementa la deformación. Si bien los contenidos de arcilla en los primeros 0,3 m del perfil cultural de Haplustoles/udoles y Argiustoles/udoles de la región central

de Córdoba oscilan entre 100 g kg<sup>-1</sup> y 250 g kg<sup>-1</sup> aproximadamente y la evaluación de las constantes de Atterberg indican ausencia de plasticidad especialmente en los primeros grupos de suelos, resulta evidente que en ellos también se produce deformación o cambio físico cuando son sometidos a presión y el contenido de agua es excesivo (Campbell, 1976).

Resultados similares obtuvieron Cabrera *et al.* (2011) en un Hapludol típico al evaluar el efecto del pisoteo animal en el pastoreo de un verdeo invernal. El estudio comprendió cargas animales crecientes (0,5 - 2,4 kg peso vivo m<sup>-2</sup>) en dos contenidos de agua del suelo al momento del pisoteo, suelo seco (110 g agua kg suelo<sup>-1</sup>) y suelo húmedo por sobre capacidad de campo: (180 g agua kg<sup>-1</sup> suelo). La DAP de 0-5 cm y 5-10 cm se incrementó significativamente con cargas animales elevadas (1,5 y 2,4 kg peso vivo m<sup>-2</sup>), respecto al testigo sin pastoreo, resultando significativamente superior este incremento en el suelo húmedo.

A modo de síntesis, se puede sostener que propiedades intrínsecas de estos suelos como granulometría, contenido de materia orgánica y capacidad de retención de agua a baja succión, así como el uso y manejo histórico y actual de los mismos, ha incidido en pérdida de estabilidad de la estructura y del coloide orgánico a través del tiempo, constituyendo las causas principales del deterioro físico por compactación.

## Resistencia a la penetración

Las capas compactadas presentan elevada dureza, lo cual constituye un obstáculo para la exploración radicular. Esta dureza disminuye con el contenido de agua del suelo y es frecuentemente evaluada a través de la resistencia a la penetración (RP). La reducción del espacio poroso, el acomodamiento, acercamiento e interacción entre partículas del suelo, incrementan la fuerza de cohesión y la fricción, dando como resultado un aumento de la resistencia dichas capas (Schjonning, 1990).

En relación a ello, a partir de ensayos triaxiales desarrollados por Fantini (2003), sobre capas compactadas de un Haplustol típico de General Deheza y de un Haplustol entico de General Cabrera se obtuvieron valores de cohesión y de ángulo de fricción interna que variaron con el contenido de agua del suelo **Tabla 8** Además, observó que la resistencia al corte de dichas capas se incrementó a medida que el suelo se desecó, teniendo mayor peso sobre la misma las variaciones producidas en la cohesión que en el ángulo de fricción interna entre partículas.

**Tabla 8:** Cohesión y Ángulo de fricción interna de capas compactadas de Haplustol típico y entico.

**Table 8:** Cohesion and internal friction angle of compacted layers of Typic and Entic Haplustoll.

| Variable                             | Haplustol típico |        | Haplustol entico |        |
|--------------------------------------|------------------|--------|------------------|--------|
| Materia orgánica g kg <sup>-1</sup>  | 11,2             |        | 9,5              |        |
| Arcilla g kg <sup>-1</sup>           | 162              |        | 112,6            |        |
| Limo g kg <sup>-1</sup>              | 307,8            |        | 203,7            |        |
| Arena muy fina g kg <sup>-1</sup>    | 450,5            |        | 500,9            |        |
| Arena fina g kg <sup>-1</sup>        |                  |        | 162,5            |        |
| Densidad aparente Mg m <sup>-3</sup> | 1,49             |        | 1,43             |        |
| Contenido de agua g kg <sup>-1</sup> | 104,40           | 172,30 | 108,00           | 199,50 |
| Cohesión kg cm <sup>-2</sup>         | 0,42             | 0,13   | 0,35             | 0,05   |
| Ángulo de fricción °                 | 38,17            | 34,27  | 35,17            | 32,53  |

La resistencia a la penetración es un buen indicador de la presencia de capas compactadas en perfiles bajo agricultura, presentando elevada sensibilidad para detectar cambios de dureza en la profundidad del perfil. Cisneros *et al.* (1997) compararon el perfil de RP de un Haplustol típico franco arenoso bajo agricultura con el de una situación de monte natural, con similar contenido de agua, mostrando un marcado incremento de esta variable en el espesor compactado del suelo agrícola con valores que superaron los 5 MPa, mientras que en la situación bajo monte la RP fue homogénea en toda la profundidad estudiada y de menor magnitud (levemente superior a 2 MPa) que en la primera.

La resistencia varía según el contenido hídrico del suelo. Para el horizonte A (0 a 20 cm) de un Hapludol típico de Río Cuarto, Bonadeo (1997) encontró una relación inversa entre ambas variables e identificó que cuando el contenido hídrico del suelo es de  $90 \text{ g kg}^{-1}$ , correspondiente a un potencial de 150 kPa, se produce un punto de inflexión en la curva de ajuste entre ambas variables. Cuando el contenido de agua es menor a ese valor la pendiente de la recta de ajuste es muy marcada indicando que pequeñas variaciones de contenido hídrico se traducen en grandes variaciones de RP, mientras que si el contenido de agua del suelo es mayor a  $90 \text{ g kg}^{-1}$ , la pendiente es notoriamente menor. Bonadeo *et al.* (2003) estudiaron la misma relación para la profundidad comprendida entre 20-30 cm de un Hapludol típico, con tres niveles de densidad aparente: 1,29, 1,36 y  $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$  y observaron que la mayor pendiente se correspondió con la situación de mayor densidad aparente, lo que evidencia que a mayor DAP más decisiva en la influencia del contenido hídrico sobre la resistencia del suelo, lo que se puede asociar a una menor distancia interparticular y a un aumento de las fuerzas cohesivas cuando el suelo se deseca.

De igual manera Cisneros *et al.* (1998) obtuvieron regresiones significativas entre la RP y el contenido de agua del suelo para diferentes capas de un Haplustol típico sin remoción profunda del suelo (*i.e.*, siembra directa y labranza con arado múltiple y rastra doble acción). La mayor pendiente de las rectas de ajuste correspondió a la capa más compactada del perfil indicando que estos pisos de arado son los horizontes que mayor condicionamiento físico ejercen para la exploración de raíces, tanto por su mayor resistencia absoluta, como por el incremento en RP que se opera en el proceso de desecamiento del perfil.

## Dinámica hídrica

Bricchi (1993) trabajó sobre un Hapludol típico franco grueso de la Llanura subhúmeda bien drenada y al comparar una situación con compactación subsuperficial respecto a otra de referencia bajo monte con escasa alteración, observó cambios marcados en la organización macro y microestructural que se tradujeron en disminuciones de hasta el 90% en la conductividad hidráulica en el perfil con deterioro físico, respecto a la situación de referencia.

Similares resultados obtuvieron Cisneros *et al.* (1997) en un Haplustol típico franco arenoso cercano a la localidad de General Deheza con uso agrícola por más de 80 años y con monte natural, donde registraron disminuciones de la conductividad hidráulica del orden de 96,5 y 88 % para las profundidades de 7-15 cm (piso de rastra) y para 20-30 cm (piso de arado) respectivamente, y en la velocidad de infiltración medida con doble anillo, del 98% en relación a la situación de monte

**Tabla 9** .

**Tabla 9:** Variables hídricas de un Haplustol típico bajo agricultura continua y monte natural.**Table 9:** Water variables of a Typic Haplustoll under continuous agriculture and on natural forest.

| Variable   | Agrícola  | Monte natural   |
|--|---|---|
| Conductividad hidráulica 7-15 cm mm h <sup>-1</sup>  | 1,34  | 37,90   |
| Conductividad hidráulica 20-30 cm mm h <sup>-1</sup> | 5,26  | 42,28   |
| Velocidad de infiltración mm h <sup>-1</sup>         | 7,4   | 312   |
| Coefficiente de escurrimiento                        | 0,33<br>(intensidad de lluvia = 90 mm h <sup>-1</sup> ) | 0<br>(intensidad de lluvia = 180 mm h <sup>-1</sup> ) |

Cantero *et al.* (1987) evaluaron la conductividad hidráulica saturada en Argiudoles y Hapludoles de la Llanura bien drenada y citan disminuciones de hasta 44 veces en suelos muy degradados respecto de suelos bajo monte con mínima alteración. Los mismos autores citan menor contenido hídrico a bajos valores de succión para los horizontes muy compactados.

## Efecto sobre la exploración de raíces

### Comportamiento de raíces homorizas y alorizas

En la Llanuras bien drenada es muy frecuente que las raíces sufran algún grado de alteración por la presencia de compactaciones superficiales o subsuperficiales. Como se indicó precedentemente entre los efectos más relevantes de la compactación se encuentra la disminución de la porosidad, especialmente los poros de mayor diámetro. Se conoce que las raíces para avanzar en su crecimiento deben hacerlo a través de poros cuyo tamaño no debe ser menor a 2/3 del diámetro de la raíz en crecimiento (Scott Russell, 1977) pero cuando no alcanza el diámetro suficiente, las raíces tienden a generar mecanismos de adaptación para poder sortear la impedancia, como ensanchamientos y bifurcaciones, entre otros. Pero si el avance es fuertemente restringido o impedido, ocurren exclusiones determinando la existencia de importantes volúmenes de suelo sin raíces

**Figura 10** .





**Figura 10:** Raíces de maíz concentradas en el horizonte Ap con escasa profundización (Haplustol entico Serie Olaeta).

**Figure 10:** Corn roots concentrated in the Ap horizon with limited depth (Entic Haplustoll Serie Olaeta).

Esta exclusión de raíces por las capas compactadas, que generalmente poseen varios años, ya que se generaron por implementos como rastras o arados y actualmente se encuentran bajo siembra di-




recta, determina que las raíces se concentren en el horizonte superficial. Esta situación es muy frecuente de encontrar en el área bajo análisis y es muy evidente en raíces homorizas. Es oportuno aclarar que el incremento de raíces en el primer horizonte es marcado y puede atribuirse a crecimiento compensatorio, fenómeno observado por Bonadeo *et al.* (1997) en raíces de maní en un Haplustol típico de la Llanura bien drenada.

La gravedad del problema reside en que los poros del suelo son poco deformables debido al bajo contenido de arcilla del mismo ( $100 \text{ g Kg}^{-1}$  de arcilla en el perfil de la **Figura 10** ), y la probabilidad de avance de las raíces, está asociada a ciclos húmedos que disminuyan la resistencia de la capa, o a la presencia de planos de debilidad. La presencia de planos de debilidad, grietas o discontinuidades en su mayoría de orientación vertical o inclinada, facilitan el proceso de avance de las raíces, pero dada la dureza de la matriz del suelo no permiten el crecimiento de raíces de ordenes más altos y pelos radicales de crecimiento horizontal, con una función de absorción de agua y nutrientes más relevante que las raíces de crecimiento vertical. Esta funcionalidad edáfica disminuida tiene un efecto marcado sobre la productividad de los cultivos, especialmente en condiciones de estrés hídrico o de baja utilización de tecnología de insumos. Una elevada proporción de las raíces crece en un volumen de suelo reducido, similar al ofrecido por una maceta **Figura 11** .



**Figura 11:** Concentración de raíces de gramíneas en la capa supraadyacente al pan compactado (Hapludol típico franco limoso, Serie Oncativo).

**Figure 11:** Concentration of grass roots in the layer above to compacted layer (Typical Hapludoll silty loam Serie Oncativo)

Esta problemática también ocurre en los suelos correspondientes a la Llanura mal drenada, siendo posiblemente situaciones diferentes y de mayor complejidad, ya que su condición física degradada no solo se atribuye a la acción antrópica sino a su génesis sódica. Se observan en esta unidad suelos con elevada densidad aparente ( $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$  o más) a escasa profundidad, con exclusión casi total de raíces **Figura 12** .



**Figura 12:** Raíces de trigo concentradas en los primeros 10 cm de un Natracuaf típico franco limoso de la Llanura mal drenada.

**Figure 12:** Wheat roots concentrated in the first 10 cm of a silty loam Typic Natracuaf in the poorly drained Plain.

En el caso de sistemas alorizos la problemática también existe y aquí es oportuno destacar las alteraciones morfológicas notorias a que está sujeta la raíz principal y es frecuente observar variaciones en el diámetro de la raíz principal o cambios de dirección crecimiento de las raíces en busca de poros o planos de debilidad **Figura 13** ©.



**Figura 13 A:** Cambios de sección en raíz de alfalfa en un Hapludol típico **B:** cambios de dirección en raíces de soja en un Haplustol éntico **C:** y de alfalfa en un Hapludol típico franco limoso, Serie Oncativo.

**Figure 13 A:** Section changes in alfalfa root in a Typic Hapludoll **B:** changes of direction in soybean roots in an Entic Haplustoll **C:** and alfalfa, in a loamy Typic Hapludoll, Serie Oncativo.

Estas alteraciones morfológicas producen muchas veces afecciones al sistema de transporte de sustancias hacia la parte aérea. Al respecto, Kraus *et al.* (2000), encontraron que en las raíces con alteraciones morfológicas como consecuencias de capas compactadas en un Haplustol típico franco arenoso cercano a Rio Cuarto, se reducía el diámetro de vasos, el área xilemática y el número de elementos conductores respecto del mismo suelo sin capa compactada. Según los autores la menor área xilemática debe necesariamente estar ocupada por parénquima, lo que no implica menor absorción de agua ya que la mayor proporción de parénquima le permite realizar a la raíz mayores fuerzas y presiones pudiendo explorar mayor proporción de suelo.

También Kraus *et al.* (1997) estudiaron el efecto de las variaciones del contenido de humedad del suelo sobre el sistema xilemático y concluyeron que pequeñas variaciones de humedad en suelos con horizontes densificados pueden producir modificaciones estructurales del xilema. Además, en el mismo suelo Basconsuelo *et al.* (1997) observaron que la mayor disponibilidad hídrica determinaba un mayor grado de ramificación, mayor longitud y menos desviaciones de la dirección normal de crecimiento. Todo esto pone en evidencia la estrecha relación entre las características de cada sistema de raíces con el contenido hídrico del suelo cuando existen capas compactadas.

Por su parte, Malpassi *et al.* (1999), evaluaron el efecto del encalado con  $\text{CO}_3\text{Ca}$  sobre la resistencia mecánica de un Hapludol típico compactado ubicado al NO de Río Cuarto y la anatomía de raíces de maní (*Arachis hypogaea* L.), comparándolo con una situación sin enmienda cálcica. El  $\text{CO}_3\text{Ca}$  fue aplicado un año antes previo a la siembra del cultivo y mezclado en el horizonte superficial con la labranza, para que durante dicho período se movilizara hacia la capa compactada subsuperficialmente. Observaron que en las parcelas con  $\text{CO}_3\text{Ca}$  la resistencia mecánica se redujo significativamente, respecto a la situación testigo sin enmienda, lo que generó un medio edáfico más favorable para la exploración y desarrollo radical, produciéndose un aumento significativo en el área total y xilemática de las raíces principales debido a un aumento en el número de vasos conductores y no como se mencionó precedentemente, a un aumento del parénquima como ocurre en raíces que atraviesan capas compactadas (Kraus *et al.*, 2000).

### **Relaciones entre densidad de longitud de raíces y propiedades físicas del suelo**

Hace 20 años, estudios realizados por Bonadeo & Cantero (1987), mostraban estrechas relaciones entre los perfiles de densidad de longitud de raíces (DLR) de maíz con los perfiles de resistencia mecánica y peso específico aparente en Hapludoles/ustoles típicos físicamente degradados de la llanura sub-húmeda bien drenada.

Bonadeo (1997) evaluó perfiles de DLR de maní a los 47, 98 y 138 días después de la siembra en un Haplustol típico de la llanura bien drenada con tres niveles de densidad aparente ( $1,29$ ,  $1,36$  y  $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ ) en la base del horizonte "A". Los resultados no mostraron diferencias significativas de DLR entre los niveles de compactación para los primeros 20 cm de profundidad (horizonte A) en ninguna de los momentos evaluados, pero si arrojaron diferencias significativas de DLR en la profundidad comprendida entre 20-135 cm en la última fecha evaluada. La falta de diferencias significativas se explica por los elevados coeficientes de variación registrados, que alcanzaron valores de hasta el 53%. Este estudio permite concluir que la presencia de pisos de labor afecta la distribución de la densidad de raíces en el perfil en horizontes que se encuentran por debajo de la capa compactada y que el grado de afección aumenta a medida que se avanza en el ciclo del cultivo.

### **Compactación asociada a siembra directa**

En el área bajo estudio, es frecuente registrar compactación superficial y sub-superficial, originadas, la primera por la siembra directa continua y la segunda por el laboreo convencional realizado con anterioridad. Esta "doble" restricción determina una condición muy desfavorable para la exploración de raíces.

El proceso de exploración de raíces se afecta notoriamente cuando la siembra directa se realiza sobre suelos físicamente degradados. Hace ya 30 años, cuando recién se comenzaba a implementar la siembra directa, Bonadeo & Cantero (1987) encontraron importantes diferencias en la distribución de las raíces de maíz en un Hapludol típico franco, según el laboreo fuese convencional con arado múltiple, reducido con cincel o siembra directa. En floración se observó que en los primeros 15 cm había un 46,9 %, 47,5% y 78,5% de las raíces contadas en labranza convencional, reducida y siembra directa, respectivamente, con menor profundidad máxima en esta última condición. Ello también ocurre actualmente. Se registra una elevada concentración de raíces en los primeros cm (efecto maceta) y posterior profundi-



zación por planos de debilidad **Figura 14** ☉. Estas situaciones determinan que la absorción de agua y nutrientes se concentre en los primeros centímetros y se reduzca a un mínimo a mayores profundidades.



**Figura 14:** Raíces de cultivo de maíz bajo siembra directa en Hapludol típico físicamente degradado del centro-oeste de la Llanura bien drenada.

**Figure 14:** Maize root under direct seeding in a Typic Hapludoll physically degraded of the central-west of the well-drained plain.

### Consecuencias de la alteración de los patrones de exploración de raíces

Las alteraciones en la distribución de raíces tienen efecto sobre el abastecimiento hídrico y de nutrientes, procesos estrechamente vinculados con el rendimiento de los cultivos.


En un Hapludol típico del centro de la Llanura bien drenada sembrado con maní, se registraron reducciones de la evapotranspiración del 21% y aumentos del período de restricción hídrica, atribuidos a un piso de arado por debajo de los 20 cm. Se determinó menor DLR, menor profundidad de raíces, alteración del patrón de distribución y posiblemente menor capacidad absorbente (Bonadeo, 1997).

El confinamiento de raíces en grietas o planos de debilidad **Figura 15** ☉ delimitadas por terrones de gran tamaño está asociado a una baja eficiencia en la absorción de agua. Al respecto, Taboada & Alvarez (2008) citan al tamaño de agregados como un factor esencial para una correcta exploración de raíces y absorción de agua.



**Figura 15 A:** Raíces de girasol creciendo sobre planos de debilidad y **B:** sin explorar el interior de los mismos en un Haplustol típico.



**Figure 15 A:** Sunflower roots growing on planes of weakness and **B:** without exploring the interior of them in a typical Haplustoll.

Alteraciones en el abastecimiento hídrico se registraron en maíz cultivado en la llanura subhúmeda bien drenada durante la campaña 2010-11, cuando ocurrió un importante déficit hídrico. En las **Figura 16** , se visualiza el impacto de la sequía sobre el cultivo implantado en un Haplustol típico con tres manejos diferentes del suelo y del cultivo.



**Figura 16:** Aspecto visual de cultivo de maíz durante la sequía 2010 -11. **A:** Implantado bajo siembra directa, maní como cultivo antecesor, ausencia de cobertura y elevada compactación a partir de los 5 cm. **B:** Implantado bajo labranza convencional (arado y escardillo) similares condiciones que **A-C:** Siembra directa, presencia de cobertura, suelo sin restricciones para exploración de raíces (Degioanni *et al.*, 2013).

**Figure 16:** Visual appearance of maize crop during drought 2010 -11. **A:** Implanted under direct seeding, peanut as an ancestor crop, absence of cover and high compaction from 5 cm. **B:** Implanted under conventional tillage (plow and spur) similar conditions as **A-C:** Direct seeding, presence of cover, unrestricted soil for root exploration (Degioanni *et al.*, 2013).

Las **Figura 16A** y **B**  muestran el fuerte impacto de la sequía en un cultivo de maíz sembrado luego de un cultivo de maní en condiciones de suelo descubierto, compactado desde los 5 cm, con elevada resistencia mecánica en siembra directa y labranza convencional (arado y escardillo), respectivamente y la **Figura 16C**  muestra una condición de suelo sin restricciones físicas que permitió que las raíces alcanzaran 1,2 m de profundidad (Degioanni *et al.*, 2013). Si bien no puede atribuirse el estado general del cultivo en su totalidad al efecto de la compactación, puede concluirse que manejos de cultivos y de suelos que incluyan una profunda y profusa exploración de raíces son relevantes y determinantes del rendimiento de cultivos como maíz, en ciclos de crecimiento con marcado déficit hídrico.

Otro aspecto de relevancia en muchas tierras de la región, es que la presencia de capas compactadas evita el acceso de las raíces al suelo húmedo como consecuencia del ascenso capilar a partir de napas freáticas. Esta situación se ha registrado en Haplustoles típicos de textura franco – arenosa con capas freáticas a 1,50 m de profundidad al sur de Río Cuarto. En este análisis debe considerarse que las raíces de mayor diámetro como la de los sistemas alorrizos son las que tienen mayor capacidad para “perforar” las capas compactadas a diferencia de los sistemas homorizos que solo avanzan por fisuras o planos de debilidad.

Respecto del proceso de absorción de nutrientes, en forma general debe decirse que el fenómeno comúnmente observado en toda el área abordada, de concentración de raíces en horizontes superficiales, determina que sea el primer horizonte el principal abastecedor de nutrientes por la mayor asimilabilidad y genera la necesidad de aplicación de fertilizantes en superficie para lograr elevados rendimientos.

Este proceso se acentúa cuando el cultivo se realiza en siembra directa, ya que la concentración de raíces es aún más superficial.

Si bien es conocido que alteraciones del sistema radical comprometen la absorción de nutrientes poco móviles como el fósforo y el potasio, es oportuno mencionar que en los suelos de esta área, especialmente Haplustoles enticos ubicados en la Llanura medanosa, puede ocurrir que el nitrógeno en forma de nitratos sea lixiviado por el agua a través de las capas compactadas hacia a zonas profundas, ya que estas no impiden el paso del agua sino que disminuye su velocidad de avance, lo que determina que los nitratos se ubiquen por debajo de las capas compactadas y las raíces por encima de las mismas, lo que genera que este nutriente no pueda ser absorbido por las raíces por inaccesibilidad física.


### Efectos sobre el rendimiento

El efecto de la compactación sobre el rendimiento de los cultivos es variable y está supeditado a las condiciones hídricas que prevalecen durante el ciclo de los mismos. En el caso del cultivo de maní ya en el año 1992 (Pedelini, 1992) se cita a la degradación física como una de las causas de disminución del rendimiento potencial de maní. Para el mismo cultivo Bonadeo *et al.* (1990) y Bonadeo (1997) registran disminuciones de materia seca mayores al 50% en etapas reproductivas, reducciones del peso de grano del orden del 40% y del tamaño de grano en maní, cuando comparan en un Haplustol típico de la llanura bien drenada situaciones edáficas con capas subsuperficiales de densidad aparentes de 1,29 Mg m<sup>-3</sup> respecto a otras con capas compactadas de densidad 1,42 Mg m<sup>-3</sup>.

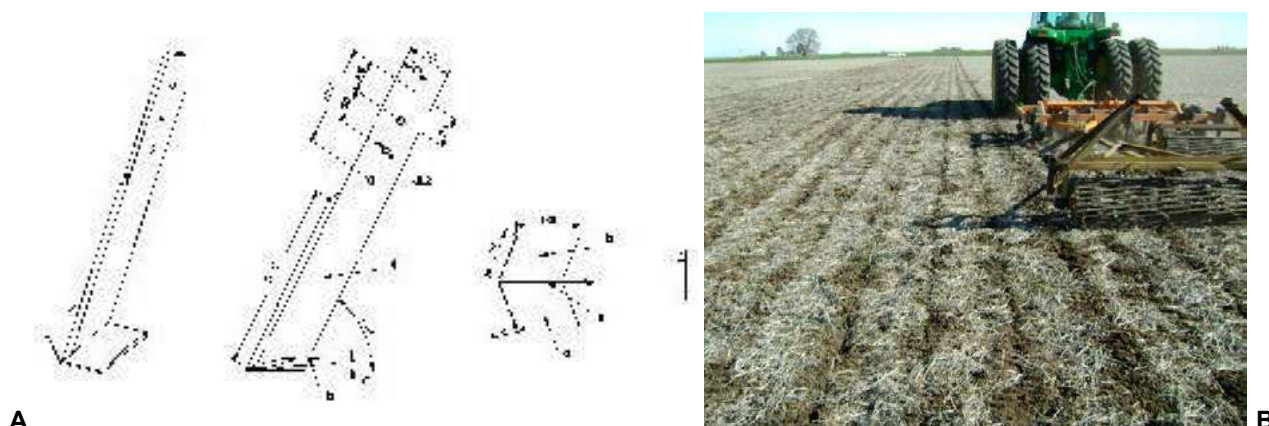
### Experiencias de manejo de la compactación subsuperficial por laboreo

El manejo mecánico de las capas subsuperficiales compactadas, utiliza herramientas de corte vertical, aunque de acuerdo a Balbuena *et al.* (2009), las mismas no actúan por corte sino que lo hacen a partir de ejercer en el suelo presión desde abajo y por el frente del órgano activo de la herramienta, hacia la superficie, de modo que todo el espesor trabajado queda fisurado, produciendo mínima alteración de la superficie.

Esta alternativa de manejo requiere considerar aspectos como profundidad y espesor de la capa densificada, contenido de agua del perfil cultural al momento de realizar la labor, tipo de herramienta y geometría de la misma, distanciamiento entre órganos activos, dirección de labor, potencia requerida, tránsito posterior a la labor, entre otros.

La herramienta para descompactar desarrollada y patentada por la Universidad Nacional de Río Cuarto, denominada “reja cero”, se caracteriza por tener forma de T invertida, el timón es recto, rígido, posee filo longitudinal y en la base presenta una rejita alada **Figura 17** . Estas características le confieren elevada capacidad de fisuramiento de las capas densificadas con mínima remoción de la cobertura superficial. El enterramiento de rastrojo en labores con descompactadores similares a la “reja cero”, varía entre el 6% y el 20% (Bergesio, 2011; Cholaky, 2003, respectivamente) y con descompactador tipo paraplow es del orden del 15% (Erbach *et al.* 1992), dependiendo de la velocidad de trabajo, nivel de humedad antecedente, geometría de la herramienta (*i.e.*, ancho del timón, ángulo de ataque).





**Figura 17 A:** Esquema del subsolador alado “reja cero”. Medidas en mm;

**B:** Vista de la condición de superficie del suelo posterior a la labor.

**Figure 17 A:** Outline of the winged subsoiler “zero grid”. Units in mm; **B:** View of soil surface condition after work.

En experiencias de descompactación en Haplustoles típicos con escarificadores alados, similares a la “reja cero”, desarrolladas por Cholaky (2003), Cacciavillani (2009), Bergesio (2011), se observaron cambios en la estructura del perfil cultural hasta la profundidad de trabajo de la herramienta. El espesor de la capa originalmente compactada aparece fragmentado, mostrando un incremento en la proporción de agregados pequeños (menores a 11 mm), fácilmente discernibles, aunque con estado interno “Δ”, caracterizado por una alta cohesión, caras de ruptura lisas, ausencia de porosidad visible, producto de que la acción meramente mecánica que ejerce la herramienta no incidiría en la organización de las partículas dentro del ped, al menos en el corto plazo.

La evaluación del perfil cultural previo y posterior a la labor permite diagnosticar claramente cuál es el espesor de la capa compactada, cuál fue la profundidad de trabajo efectiva y si la misma permitió el fisuramiento de todo el espesor densificado.

Cholaky (2003) estudió la descompactación de un Haplustol típico de la Llanura bien drenada y evaluó el efecto de la humedad antecedente, sobre el cambio producido en la densidad aparente (DAP) del perfil. Los niveles de agua en el suelo fueron 90, 140 y 190 g kg<sup>-1</sup> en condición de suelo seco (SS), húmedo (SH) y mojado (SM), respectivamente. Inmediatamente posterior a la labor, observó que en SH, en el que el suelo se encontraba friable, se produjo la mayor reducción de la DAP y que la labor en SM ocasionó compactación en la capa superficial. En relación a estos resultados Baver *et al.* (1972) sostienen que la friabilidad es la facilidad que presenta el suelo para desmenuzarse, siendo la consistencia óptima para este tipo de trabajos mecánicos.

En otras experiencias de descompactación realizadas sobre Hapludoles típicos (Gomez, 2011; Principi, 2011) no se observaron cambios marcados en DAP luego de transcurridos 7 meses posteriores a la labor, pudiéndolo atribuir a que al momento en que se realizó la evaluación habría ocurrido la recompactación de las capas, o de acuerdo a Alakukku (1997), a que esta variable resulta poco sensible para evaluar cambios atribuidos a la labranza, especialmente luego de transcurrido un tiempo después de la labor.

Cisneros *et al.* (1998), luego de tres años de experiencia con rotaciones y labranzas en un Haplustol típico de General Deheza, con elevado grado de degradación física, muestran tendencias hacia una mayor uniformización del perfil de resistencia mecánica en los suelos que fueron sometidos a laboreos verticales, lográndose una ampliación de la profundidad de fácil enraizamiento, especialmente con el uso

de subsolador alado, respecto a los tratamientos sin remoción vertical. En estos últimos se destaca la presencia de pisos a partir de 10 cm de profundidad, con valores de resistencia que igualan o superan el umbral 2 a 2,5 MPa (Vepraskas & Miner, 1986; Vepraskas & Waggoner, 1989), aún cuando el contenido hídrico del suelo se encuentre cercano a capacidad de campo ( $200 \text{ g kg}^{-1}$ ). Por ello, los autores sostienen, que durante ciclos secos, es de esperar que existan fuertes condicionamientos a la penetración radical tanto en siembra directa como en los sistemas de laboreo sin labranza vertical.

Caccivigliani (2009), en una experiencia de descompactación con subsolador, en un Haplustol típico de Alcira Gigena, en la Llanura subhúmeda bien drenada, estudió la dinámica de la resistencia mecánica a lo largo del ciclo de un cultivo de maíz y observó que los valores de resistencia fueron significativamente inferiores a los de siembra directa durante todo el ciclo del cultivo.

Bergesio (2011), en un Haplustol típico, de la misma zona que la experiencia anterior y Brusasca (2013) en un Hapludol típico del oeste de Río Cuarto, evaluaron el grado de aflojamiento (GDA) producido por una labor de descompactación con subsolador alado, utilizando el modelo propuesto por Tola (2000), donde:  $GDA = (1 - \text{Resistencia mecánica postlabor} / \text{Resistencia mecánica prelabor}) * 100$ , observando que el mismo fue del 70% en el espesor del perfil más compactado y menos de 50% en la capa superficial. En las zonas más compactadas del perfil se genera un aumento en la tensión de ruptura, produciendo con ello una mayor propagación de las grietas y fisuras respecto a las capas menos densificadas (Snyder & Miller, 1989). Similar comportamiento observó Cholaky (2003) al obtener menor densidad aparente y resistencia mecánica en el espesor correspondiente al “piso de arado” que en las capas superficiales del perfil laboreado con subsolador alado.

En un ensayo de larga duración realizado en Haplustoles énticos de General Cabrera, en la Llanura subhúmeda bien drenada, Uberto *et al.* (2001) evaluaron la velocidad de infiltración final, medida con doble anillo, en tres sistemas de labranza, y observaron que el laboreo reducido que incluía una labor de descompactación, mostraba una mayor velocidad de infiltración que el laboreo convencional y siembra directa.

En experiencias de descompactación desarrolladas en la misma unidad ambiental, por Zaniboni (2015) en un Haplustol típico y por Rovera *et al.* (2013) en un Haplustol údico, donde evaluaron la profundidad del frente de humedecimiento de la lámina aplicada en ensayos de infiltración, observaron que la misma fue aproximadamente el doble en situaciones con descompactación respecto a las que no tuvieron esta labranza. Estos resultados conducen a sostener que las labores de descompactación impactan sobre la redistribución del agua que ingresa al perfil, contribuyendo a su almacenamiento y posterior captación por las raíces, disminuyendo su pérdida por evaporación y escurrimiento.

Marelli *et al.* (2006) en Argiudoles típicos de Marcos Juárez, en ensayos con simulador de lluvia, observaron que las labores de descompactación subsuperficial disminuyeron el escurrimiento superficial al mejorar la condición de permeabilidad del suelo, y con ello disminuyó la pérdida de suelo. En el mismo sentido, Rovera *et al.* (2013), posterior a la cosecha de maíz, con un 75% de cobertura superficial, evaluaron el efecto combinado de la dirección de siembra y la labranza con y sin descompactación en un Haplustol údico de la Llanura bien drenada suavemente ondulada (0,5 %-0,7% de gradiente de pendiente) al sur-este de Río Cuarto y observaron que el mayor impacto sobre la velocidad de infiltración lo tuvo la labranza, ya que la situación descompactada con escarificador tipo “paratill” mantuvo la velocidad relativamente constante y similar a la intensidad de la lluvia simulada ( $60 \text{ mm h}^{-1}$ ) durante todo el



período de medición, independientemente de la orientación de la línea de siembra, mientras que en la situación sin labor de descompactación la velocidad decayó marcadamente a partir de los 45 minutos de iniciada la lluvia, registrando velocidades de infiltración entre 40 y 30 mm h<sup>-1</sup>. La lámina escurrida resultó significativamente inferior en las situaciones descompactadas respecto a aquellas que no tuvieron esta labor, así como la pérdida de suelo por erosión (10,58 kg ha<sup>-1</sup> y 45,58 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) durante la precipitación simulada.

Al evaluar la persistencia de los efectos producidos por una labor de descompactación, en un Haplustol típico franco arenoso muy fino, Cholaky *et al.* (2010), evaluaron el perfil cultural de una situación en la que se había realizado una labor de descompactación dos años antes de la medición y observaron que se había producido la recompactación de las capas previamente fisuradas, atribuyéndolo a que un suelo descompactado ofrece escasa resistencia ante las presiones que se le ejercen posterior a la labor (Koch *et al.*, 2008), ya sea por tránsito con cargas elevadas o de acuerdo a Balbuena *et al.* (2009), por el tránsito reiterado sobre la misma senda.

Esta recompactación es también el resultado de la incidencia de factores naturales como las precipitaciones, que al ingresar en el perfil desmoronan los terrones inestables, arrastrando partículas hacia la base del área fisurada donde se reacomodan (Barber, 1994) para producir nuevamente la capa compactada.

Cacchiavillani (2009) en un Haplustol típico franco arenoso comparó la resistencia mecánica del suelo en sectores con y sin tránsito posterior a una labor de descompactación subsuperficial y observó que la cosecha, que se realizó a un contenido de humedad por debajo de capacidad de campo (130 g kg<sup>-1</sup>), fue la operación de labranza que produjo el mayor impacto sobre la recompactación del suelo posterior a la labor. En los sitios transitados la resistencia mecánica de las parcelas descompactadas se incrementó a valores por encima de los críticos para la exploración radicular e igualó a los de siembra directa, mientras que en los sectores no transitados los efectos de la descompactación perduraban con valores marcadamente inferiores al resto. Zaniboni (2015) obtuvo resultados similares en una experiencia realizada sobre un Haplustol típico de la zona de Bulnes, Córdoba y observó además que en el suelo descompactado la cosechadora dejó huellas de 4,68 cm de profundidad, mientras que en el suelo en siembra directa tuvieron una profundidad media de 1,92 cm, aún cuando en ambas situaciones la consistencia era friable.

La prevención de procesos de compactación y recompactación en suelos previamente fisurados debe apuntar a la disminución de los pesos y cargas aplicados, así como del tránsito repetido por los mismos sectores de un lote. El tránsito controlado ha sido estudiado y probado por Botta *et al.* (2007) y Koch *et al.* (2008), como alternativa eficiente para el mantenimiento de la funcionalidad física e hídrica del perfil.

En una experiencia desarrollada en un Hapludol típico de General Deheza, Cholaky *et al.* (2010) evaluaron el desempeño de un subsolador alado similar al prototipo “reja cero” (Cisneros *et al.*, 1998), montado en un bastidor de un arado de reja y vertedera con cinco cuerpos distanciados a 0,305 m. Las variables experimentales fueron dos condiciones de compactación: alta, con siembra directa continua (AC) y baja, con labores de descompactación previas (BC) y tres contenidos de agua del suelo: mojado (SM), húmedo (SH) (consistencia friable) y seco (SS). Concluyen que en condición de AC y SS la labor resulta ineficiente ya que consume elevada potencia y la profundidad de trabajo resulta escasa e irregu-

lar. En SH la potencia consumida es menor y se produce el fisuramiento del perfil hasta la profundidad deseada. En BC tanto SS como SH permiten realizar una labor eficiente, al lograr un adecuado fisuramiento en toda la profundidad, sin mostrar diferencias en la potencia consumida. Independientemente del nivel de compactación, cuando la labor se realiza en SM, si bien la potencia consumida es menor o igual que en los restantes contenidos de agua del suelo, no se produce un fisuramiento adecuado de la capa compactada.

## ■ CONCLUSIONES

Si bien son necesarios más estudios que cuantifiquen en forma precisa el proceso de compactación, su importancia areal y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos, hay suficientes investigaciones parciales y evidencias que permiten concluir que las capas compactadas son un problema relevante en la región considerada en este escrito.

- El alto contenido de arena muy fina y limo, la baja concentración de arcilla y materia orgánica conducen a condiciones de alta compactación y alta susceptibilidad a la compactación.
- La presencia de minerales de illita como tipo dominante de arcilla no predispone a los procesos de expansión-contracción lo que ayudaría a revertir la compactación.
- La recuperación de las capas compactadas debería encararse desde la biología del suelo (macro y meso fauna) y desde la “perforación” de las capas compactadas por las raíces en forma complementaria con la recuperación mecánica, ya que se ha demostrado que esta última no es suficiente por sí sola.
- La presencia de compactaciones produce concentración de raíces en la porción de suelo por encima de la capa compactada, efecto muy evidente en raíces homorizas, en las que puede ocurrir crecimiento compensatorio lo que genera una muy elevada demanda de agua y nutrientes en esa capa y una no utilización de estos recursos por debajo de la capa compactada.
- Las capas compactadas tienen incidencia sobre la velocidad de ingreso y transmisión interna del agua en el suelo, aspecto que tiene consecuencias sobre la pérdida de agua y suelo por escurrimiento superficial y erosión.
- La siembra directa, en muchos casos, ha producido sobre las capas compactadas subsuperficiales, compactaciones superficiales lo que ha empeorado las condiciones físicas debido a que el espesor de suelo compactado es mayor.
- En raíces alorizas son muy evidentes las alteraciones morfológicas producidas por la compactación, como bifurcaciones, cambios de dirección o estrechamientos, afectando el sistema de transporte de agua y solutos hacia la parte aérea de la planta.
- Los cultivos perennes de raíces alorizas pueden ser una alternativa interesante de recuperación biológica de capas compactas, debido al mayor tiempo para poder penetrarlas o para encontrar zonas débiles.

## ■ CONSIDERACIONES FINALES: REVERSIÓN, PREVENCIÓN, ATENUACIÓN

En relación a la reversión mecánica de la compactación, surge con claridad la dificultad de lograr efectos perdurables, como el aglutinamiento del suelo y la acción mecánica de las raíces tipo red, ya que estos procesos de feedback positivos se logran escasamente en los suelos abordados, dada la baja cantidad de planos de debilidad y la elevada densidad que poseen.

Según lo planteado por Kay & Angers (2000) citados por Taboada & Alvarez (2008) quienes combinan la vulnerabilidad y la resiliencia del suelo como indicadores de la temática abordada, se puede concluir que en el caso específico de los suelos franco arenosos de esta región se está ante una situación de alta vulnerabilidad y baja resiliencia.

Además las mejoras que se logren están sujetas a procesos de recompactación por tránsito. De allí surge que la prevención es fundamental. La disminución de pesos y cargas aplicados al suelo así como el control del tránsito son relevantes.

Se considera importante que se continúe investigando y cuantificando el efecto de las capas compacta el efecto de las capas compactas sobre aspectos morfológicos y fisiológicos de raíces homorizas y alorizas, así como su efecto sobre el rendimiento de los cultivos en ciclos secos y en ciclos húmedos.

Opciones que deben ser investigadas son aquellas que proponen diversos autores (GRDC, 2009) de utilizar un primer cultivo que tenga raíces con capacidad de perforar capas compactadas, con el propósito específico de mejorar la porosidad del suelo para beneficios de los cultivos siguientes, avanzando así en la atenuación del problema. El cultivo de alfalfa aparece como una alternativa interesante, especialmente por su sistema de raíces alorizas y su ciclo de crecimiento perenne.

## ■ LA VISUALIZACIÓN Y PERCEPCIÓN DEL PROBLEMA

Un aspecto que debe resaltarse es la escasa visualización y percepción del problema por parte de los productores y técnicos de la región, atribuido a diversas causas, pero una de las que se debe mencionar, es que tanto el proceso de compactación subsuperficial como sus consecuencias sobre la exploración de raíces no se observan, salvo con técnicas muy específicas y laboriosas. En este punto también debe considerarse el mejoramiento genético de cultivares de soja y maíz que son los más frecuentes en el área, proceso que ha enmascarado la degradación de los suelos en general y la compactación en particular, ya que la disminución de rendimientos no ha reflejado la intensidad del proceso de degradación. Esto se agrava aún más porque en ocasiones el mejoramiento genético se realiza en base a modificaciones del índice de cosecha, lo que trae aparejado una reducción en la cantidad de residuos de cosecha que quedan en el suelo, y con ello se reduce el aporte a la materia orgánica.

## ■ BIBLIOGRAFIA

- Alakukku, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil and Till Res* 37: 211-222.
- Aoki, AM; MR Ateca & HP Apezteguía. 2014. Indicadores de calidad de suelo en el centro-norte de Córdoba Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas" Producción sustentable, Bahía Blanca, Argentina, 4p.

- Balbuena, RH; GF Botta & ER Rivero. 2009. Herramientas de Labranza para la descompactación del suelo agrícola. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, Argentina. 205 pp.
- Barber, RG. 1994. Persistence of loosened Horizons and Soybean yield increases in Bolivia. *Soil Sci Soc Am J* 58: 943-950.
- Basconsuelo, S; M Grosso; T Kraus; R Malpassi; C Bianco & E Hampp. 1997. Relaciones entre la disponibilidad de agua del suelo y las características morfológicas de sistemas radicales de *Arachis hypogaea* L. IV Jornadas Científico Técnicas. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC. Argentina.
- Baver, LD; WH Gardner & WR Gardner. 1972. Física de suelos. UTEHA - México. 529 pp.
- Becerra, V.; A Becker; D Biole; M Blarasin; M Cantú; O Campanella; J Cantero; J. Cisneros; C Cholaky; A Degioanni; J De Prada; N Doffo; C Eric; O Giayetto; H Gil; J Gonzalez; J Marcos; C Nuñez; D Origlia; M Reyner & G Sagripanti. 1992. Ordenamiento y Manejo Integral de Aguas y Tierras para la Cuenca de General Deheza, Córdoba – Argentina. Informe convenio de Cooperación UNRC-Municipalidad de General Deheza, Argentina.
- Bergesio, L. 2011. Persistencia del aflojamiento producido por una labor de descompactación en un sistema de producción mixto en un Haplustol típico del sur cordobés. Trabajo Final de grado, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.
- Bonadeo, E; E Bricchi & A Cantero. 1983. Caracterización física de udoles del oeste de Río Cuarto. Primeras Jornadas Científico Técnicas de la Escuela Superior de Ciencias Agronómicas. UNRC. Argentina.
- Bonadeo, E & A Cantero. 1987. Distribución de raíces de maíz desarrollado en un Hapludol típico bajo tres tipos de laboreo. II Jornadas Científico Técnicas de la Facultad de Agronomía y Veterinaria. UNRC. Argentina.
- Bonadeo, E; A Cantero; L. Sabanes; C Cholaky & J. Conti. 1990. Influencia de la densificación subsuperficial de Hapludoles típicos del sur de Córdoba sobre disponibilidad de agua y producción de materia seca y grano de maní (*Arachis hypogaea* L.) V Jornada Nacional del Maní. General Cabrera, Córdoba, Argentina.
- Bonadeo, E. 1997. Efectos de la compactación subsuperficial de un Hapludol típico del sur de Córdoba, sobre el comportamiento del cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.). Tesis maestría. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Bonadeo, E.; A Cantero Gutiérrez e I Moreno. 2003. Relación entre la compactación subsuperficial y la resistencia a la penetración de un Hapludol típico con las raíces del maní (*Arachis hypogaea* L.). *Rev. UNRC* 23 (1-2):23-36.
- Bonadeo, E; A Degioanni; S Amin; Y Chilano; M Bongiovanni; R Marzari; L Mattalia; E Masseda & A Cantero 2016 Guía para Reconocimiento de Suelos. Gira Edafológica XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Libro digital UniRío Editora, 2017., ISBN 978-987-688-215-6
- Botta, GF; O Pozzolo; M Bomben; H Rosatto; D Rivero; M Ressia; M Tourn; E Soza & J Vazquez. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil Till Res* 96: 145–154.
- Braunack, MV & AR Dexter. 1989. Soil aggregation in the seedbed: a Review II. Effect of aggregate sizes on plant growth. *Soil Till Res* 14: 281-298.
- Bricchi, E; A Cantero; E Bonadeo & J De Prada. 1992. Caracterización física de los principales subgrupos de suelos y su relación con cultivos y sistemas de labranzas en el Sur-Oeste de Córdoba. II Jornadas Científico Técnicas de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UNRC; Río Cuarto, Argentina.
- Bricchi, E. 1993. Cambios en la organización morfológica del suelo por efectos culturales. IVX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza. Argentina.
- Bricchi, E; F Formia & J Cisneros. 1997. Relación entre la condición superficial y el régimen hídrico en un Haplustol típico bajo diferentes manejos. IV Jornadas Científico Técnicas. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC. Argentina.
- Bricchi, E; J Cisneros; F Formia; C Cholaky; M Uberto & G Vega. 2000. Evaluación del efecto del sistema de producción sobre las propiedades químicas y físicas en suelos con escaso desarrollo. 11º International Soil Conservation Conference. Buenos Aires, Argentina. 22 pp.
- Brusasca, D. 2013. Evolución del efecto de descompactación subsuperficial en un Hapludol típico manejado en siembra directa con mínimo tráfico agrícola. Trabajo Final de Grado, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.

- Cabrera, FS; C Cholaky & A Becker .2011. Propiedades hidrofísicas de un Hapludol típico de Córdoba en relación al pisoteo animal. *Ciencia del Suelo* 29 (2): 141-150.
- Cacciavillani, M. 2009. Evolución del comportamiento de un suelo Haplustol típico de Córdoba bajo dos sistemas de laboreo. Trabajo Final de grado. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.
- Campbell, DJ. 1976. Plastic limit determination using a drop-cone penetrometer. *J Soil Sci*, 27: 295-300.
- Cantero Gutierrez, A; E Bricchi; V Becerra; J Cisneros & H Gil. 1984. Zonificación y Descripción de las Tierras del Dpto. Río Cuarto (Córdoba). Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC; Argentina. 117 pp.
- Cantero, A; E Bricchi & E Bonadeo. 1987 a. Propiedades físicas de los principales subgrupos de suelos del Centro sur oeste de Córdoba. II Jornadas Científico Técnicas de la Facultad de Agronomía y Veterinaria. UNRC; Argentina.
- Cantero Gutierrez, A; E Bricchi; V Becerra; J Cisneros & H Gil. 1987 b. Aplicación de un índice de aptitud relativa a las tierras del Departamento Río Cuarto. Actas de las II Jornadas Científicas-Técnicas, de la FAV, UNRC, Argentina.
- Cantero, A.; Bonadeo, E. y J. De Prada 1992 Caracterización física de los principales subgrupos de suelos y su relación con los sistemas de labranza en el sur oeste de Córdoba. III Jornadas Científico Técnicas. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC. Argentina
- Cantero, A; M Cantú; J Cisneros; J Cantero; M Blarasín; A Degioanni; J. González; V Becerra; H Gil; J De Prada; S Degiovanni; C Cholaky; M Villegas; A Cabrera & C ERIC .1998. Las Tierras y Aguas del Sur de Córdoba- Propuestas para un manejo sustentable. Edit. UNRC, Argentina. 119 pp.
- Cantú, M; Becker A; Bedano JC & H F Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25 (2): 173-178.
- Cholaky, C. 2003. Efectividad y persistencia de una labor de descompactación con subsolador alado en función de la compactación y humedad antecedentes. Tesis de Maestría. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC. Argentina.
- Cholaky, C; J Cisneros & RH Balbuena. 2005. El perfil cultural: una herramienta para discriminar modificaciones en la estructura edáfica producidas por una labor profunda. *Revista de la Universidad Nacional de Río Cuarto* 25 (1): 53-83.
- Cholaky, C; R Balbuena & J Cisneros. 2010. Field performance of a winged scarifier as a function of soil compaction and water content. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70, N° 1: 150-158.
- Cisneros, JM; C Cholaky; E Bricchi, O Giayetto & JJ Cantero. 1997. Evaluación del efecto del uso agrícola sobre propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. *Rev. UNRC* 17(1):13-22.
- Cisneros, J; C Cholaky; O Giayetto; E Bricchi; J Marcos & G Cerioni. 1998. Homogeneidad física, resistencia a la penetración y humedad del suelo en sistemas de labranza para el área manisera de Córdoba. En: R Balbuena, S H Benez & D Jorajuria (Eds.) Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en el ámbito Latinoamericano. Editorial de la UNLP. La Plata, Argentina. 120-128 pp.
- Cisneros, JM, JD De Prada; A Degioanni; A Cantero Gutierrez; H Gil; MA Reynero; F Shah & B Bravo Ureta. 2004. Erosión hídrica y cambio de uso de los suelos en Córdoba. Evaluación mediante el modelo RUSLE 2. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná- Entre Ríos, Argentina.
- Cisneros, JM; C Cholaky; A Cantero Gutierrez A; J Gonzalez; MA Reynero; A Diez & L Bergesio. 2012. Erosion hídrica. Principios y técnicas de manejo. Uni Río Ed. Río Cuarto, Argentina.
- Cisneros, JM; AJ Degioanni; JG Gonzalez; CG Cholaky; JJ Cantero; A Cantero Gutierrez & JL Tassile. 2015. Degradación de suelos en la provincia de Córdoba En: R. Casas & G. Albarracín Compiladores: El deterioro del suelo en la Argentina. FECIC-PROSA, Buenos Aires, Argentina.
- Cosentino, DJ & C Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20 (1): 9-16.
- De Grazia, J. 2010. Dinámica de la materia orgánica como indicador de sustentabilidad en los Agroecosistemas de la región central de Argentina. Tesis de Maestría en Ciencias. Agropecuarias. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.
- Degioanni, A; H Gil; V Becerra; E Bonadeo; J Cisneros; J De Prada; A Diez; L Bergesio & A Cantero Gutierrez. 2013. Cultivos, Uso y Manejo de los Suelos en el sur de Córdoba. Enseñanzas de la sequía 2011-2012. Informe técnico. En: [http://www.secyot.com.ar/images/archivos/Informe\\_tecnico\\_sequia\\_SeCyOT\\_29Feb2012.pdf](http://www.secyot.com.ar/images/archivos/Informe_tecnico_sequia_SeCyOT_29Feb2012.pdf) Consultado el día 30/06/2017.



- Díaz-Zorita, M & GA Grosso 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil Till Res* 54: 121-126.
- Domínguez, J; M Aira & M Gómez-Brandón. 2009. El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. *Ecosistemas* 18 (2):20-31.
- Domínguez, A; JC Bedano & AR Becker. 2010. Negative effects of no-till on soil macrofauna and litter decomposition in Argentina as compared with natural grasslands. *Soil Till Res* 110: 51–59.
- Duttmann, R. 2014. Predicting Soil Compaction Risks Related to Field Traffic during Silage Maize Harvest. *Soil Sci Soc Am J* 78:408–421.
- Erbach, DC; JG Benjamin; RM Cruse; MA Elamin; S Mukhtar y CH Choi. 1992. Soil and corn response to tillage with paraplow. *Transactions of the ASAE* 35 (5): 1347-1354.
- Fantini, MA. 2003. Dinámica de las propiedades mecánicas de suelos agrícolas, frente al contenido de humedad. Informe de Beca de ayudantía de investigación. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.
- Fernandez, R; A Quiroga; C Alvarez; C Lobartini & E Noellemeyer. 2016. Valores umbrales de algunos indicadores de calidad de suelos en Molisoles de la región semiárida pampeana. *Ciencia del Suelo* 34 (2): 211-219.
- Ferreras, L; G Magra; P Besson; E Kovalevski & F García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, V25 (2):159-172.
- Gerster, S & S Bacigalupo. 2014. Manejo de la compactación por tránsito. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas. Río Cuarto, Argentina.
- Gil, R. 2015 El uso del agua en una agricultura sustentable. En: El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Casas R. y G. Albarracin (Eds.) Tomo 1. PROSA-FECIC. Buenos Aires, Argentina: 608 p.
- Glamuzina, J. 2008. Evaluación de la compactación edáfica causada por el tránsito bajo siembra directa en función del contenido hídrico del suelo. Trabajo final de grado, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.
- Gomez, MA. 2011. Efecto de la labor de descompactación superficial sobre el almacenamiento de agua en un Hapludol típico del sur cordobés manejado en siembra directa. Trabajo final de grado, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.
- Grumelli, MDT; M Cantu; H Schiavo & A Becker. 2008. Rasgos micromorfológicos y caracterización mineralógica de suelos aluviales de la Colonia Nueva Sampacho. Provincia de Córdoba. Argentina. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Argentina.
- Guérif, J; G Richard, C Dürr, JM Machet, S Recous & J Roger-Estrade 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil and Till Res* 61(1): 13-32.
- GRDC Grains Research & Development Corporation. 2009. Identifying, understanding and managing hostile subsoils for cropping. The Profitable Soils Group. ISBN 978-0-9806136-0-5.
- Hampp, E; I Bernardo e I Moreno. 1997. Estado físico-químico de Hapludoles y Haplustoles típicos bajo cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) de la región Centro sur de Córdoba. IV Jornadas Científico-Técnicas. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC. Argentina.
- Hampp, E. 2003. Tipos de minerales arcillosos y sus principales propiedades en Haplustoles típicos del Departamento Río Cuarto. Tesis Magíster en Ciencias del Suelo, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.
- Imhoff S; A Pires Da Silva & D Fallow. 2004. Susceptibility to Compaction, Load Support Capacity, and Soil Compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:17–24.
- INTA. 1978. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3363-17 Marcos Juárez. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Jorajuria, D; L Draghi & A Aragón. 1996. Compactación del suelo bajo tráfico repetido. *Revista de Investigación Agraria UNLP* 10 (3): 43-482.
- Kay, BD. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems *Adv. Soil Sci.* 12: 1–52.
- Koch, HJ; H Heuer; O Tomanova; & B. Märkläder 2008. Cumulative effect of annually repeated passes of heavy agricultural machinery on soil structural properties and sugar beet yield under two tillage systems. *Soil and Till Res* 101 (2008) 69–77.

- Kraus, T; E Hampp; C Bianco; M Grosso; R Malpassi & S. Basconsuelos. 1997. Alteraciones en la morfología del sistema radical en *Arachis hypogaea* L en función de las condiciones físicas del suelo. IV Jornadas Científico Técnicas de la Facultad de Agronomía y Veterinaria. UNRC, Argentina.
- Kraus, T; E Hampp; S Baseonsuelo; M Grosso; R Malpassi & C Bianco. 2000. Estudio del xilema en raíces de *Arachis hypogaea* subsp. *hypogaea* var *hypogaea* cv. Florman INTA (*leguminosae*) en suelos con horizontes densificados. *Rev. Fac. de Agronomía UNLPam* 11 N 1. Pág. 49-60.
- Lopez , FM; ME Duval; JM Martínez & JA Galantini. 2016. Porosidad de Ustoles bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 34 (2): 173-184.
- Lozano, Z., L Deyanira Lobo & L. Ildefonso Pla. 2002. Susceptibilidad a la degradación física de Anfisoles de los llanos centrales y occidentales de Venezuela. *Rev. Fac. de Agronomía* (Maracay) 28:41-57.
- Mackyes, E. 1985. Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering. Elsevier Sc. Publishers B.V. The Netherland.
- Malpassi, R; E Hampp; C Bianco; S Basconsuelo; M Grosso y T Kraus. 1999. Anatomía de raíces de *Arachis hypogaea* L. en parcelas encaladas. *Rev. UNRC* 19 (1-2): 19-26.
- Marelli, HJ; JM Arce & ME Zabala. 2006. Conservación sustentable del suelo y el agua. Información para extensión N° 99. Ediciones INTA, Marcos Juárez, Argentina. 12 pp.
- Moreno, I; C Cholaký; M Lesser & J Marcos .1996. Efecto de la labranza sobre el contenido de carbono orgánico y su implicancia en la estabilidad estructural. Actas XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. La Pampa, Argentina.
- Moreno, IS. 2000. La materia orgánica y el uso de los suelos. Su impacto sobre las propiedades físicas. Tesis Magíster en Ciencias del Suelo, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.
- Natali, C. 2013. Efecto del sistema de labranza y de la rotación sobre la Materia Orgánica Total y Lábil de un Hapludol típico del sur oeste de la provincia de Córdoba. Trabajo final de grado. Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.
- Noellemeyer, E; F Frank; C Alvarez; G Morazzo & A Quiroga 2008. Carbon contents and aggregation related to soil physical and biological properties under a land-use sequence in the semiarid region of central Argentina. *Soil and Till Res* 99: 179-190.
- Parra, BJ; Becker AR & MP Cantú. 2011. Condición física de suelos en diferentes sistemas de manejo agrícolas del centro sur de Córdoba. *Ciencia del suelo* 29 (2): 241-251.
- Pedelini, R. 1992. Rendimiento potencial del cultivo de maní en Córdoba. 7<sup>ma</sup> Jornada Nacional del Maní. General Cabrera. Córdoba, Argentina.
- Principi, L. 2011. Evaluación de la compactación y descompactación en un Hapludol típico sometido a una historia de siembra directa. Trabajo final de grado, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.
- Porta, J; M Lopez Acevedo & R M Poch 2014. Edafología: uso y protección de suelos. Editorial Mundi Prensa. España. 606 pp.
- Quiroga, AR; DE Buschiazzi & N Peinemann.1999. Soil compaction is related to the management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil and Till Res* 52 (1-2):21-28.
- Rovera, JJ. 2013. Efecto del sistema de labranza y de la dirección de siembra sobre el escurrimiento e infiltración del agua en un Haplustol udico y su impacto sobre el rendimiento del cultivo. Trabajo final de grado, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina
- Sasal, MC; Andriulo A E, & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas *Soil and Till Res* 87 (1):9-18.
- Scott Russell, S. 1977. Plant root systems: their function and interaction with the soil. Letcombe Lab., Wantage, Oxfordshire, UK. 298 pp.
- Schjonning, P. 1990. Some aspects of soil strength. *Utdredning/Rapport-Nordiske- jordbrugsforskeres-Forening-NFJ* (56):40-45.
- Schmidt, ES & NM Amiotti. 2015. Propiedades edáficas superficiales en sistemas de agricultura de conservación en la región pampeana semiárida sur. *Ciencia del Suelo* 33 (1):79-88.
- Snyder, V & RD Miller. 1989. Soil deformation and fracture under tensile forces. In: WE Larson; GR Blake; RR Allmaras; WB Voorhees & SC Gupta (Eds.). Mechanics and related processes in structures agricultural soils. Kluwer Academic Publishers NATO ASI Series. Serie E: Applied Sc. Vol. 172: 273 pp.

- Soane, BD. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research* 16 (1-2), 179-201.
- Taboada, MA & CR Alvarez. 2008. Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía y Veterinaria. UBA. Argentina.
- Tola, EHM; J Muller & K Koller. 2000. Soil loosening in the seed zone as affected by different no-till furrow openers under different soil conditions and crop residue cover rates. XI International Soil Conservation Conference. Buenos Aires, Argentina.
- Uberto, M; J Cisneros; C Vignolo; C Cholaky & R Pedelini. 2001. Recuperación de la productividad en tierras del área manisera núcleo. I. Propiedades físicas. XVI Jornada Nacional de Maní, Gral. Cabrera, Córdoba, Argentina. 16-18 pp.
- Vepraskas, MJ & GS Miner. 1986. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root growth in coarse-textured soils. *Soil Science Soc Am J* 50:423-427.
- Vepraskas, MJ & MG Wagger. 1989. Cone Index values diagnostic of where subsoiling can increased corn root growth. *Soil Science Soc Am J* 53:1499-1505.
- Wiermann, C & R Horn. 2000. Effect of different tillage systems on the recovery of soil structure following a single compaction event. In: R. Horn; JJH van den Akker; J Arvidsson (eds.). Subsoil Compaction Distribution, Processes and Consequences. Advances in Geocology, vol. 32. Catena, Reiskirchen, Germany: 339-350.
- Winkelblech, CS. 1961. Soil aggregate separation characteristics of secondary tillage tools. Magister Thesis. Ohio State University. USA.
- Zaniboni, R. 2015. Efecto de la descompactación subsuperficial y tránsito de maquinarias sobre variables hidrofísicas del suelo y la producción de maíz. Trabajo final de graduación, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC, Argentina.