

APTITUD FÍSICA DE SUELOS DE PAMPA ONDULADA PARA SER MANEJADOS CON SIEMBRA DIRECTA CONTINUA

RESUMEN

Se percibe en los suelos de región pampeana norte diferente aptitud para ser manejados con SD continua. Se supone que ello está asociado con la diferente textura del horizonte superficial. En esta tesis se evaluó el comportamiento de distintos parámetros edáficos y de cultivo, comparando situaciones prístinas (Pri), bajo labranza convencional (LC) y bajo siembra directa (SD) continua en suelos franco arcillo arenoso (Bragado), franco limoso (Peyrano), franco arcillo limoso (Ramallo), y un Vertisol arcilloso (Yeruá). El contenido de carbono orgánico y la estabilidad de agregados fueron significativamente más bajas en LC que en Pri. Luego de varios años con SD el carbono se recuperó parcialmente (SD < Pri, capa 0 – 5 cm) en todos los suelos, y la estabilidad de agregados en forma casi completa. La compactibilidad medida en ensayos Proctor fue máxima en LC y más baja en Pri y SD, pues se asoció estrechamente con el carbono total ($R^2 = 0,711^{***}$). Ningún parámetro (densidad aparente en cilindros, y compactación relativa Proctor) evidenció desarrollo de compactación excesiva en los horizontes A. El volumen de macroporos (> 50 μm , mesa de tensión) difirió entre suelos (Bragado>Peyrano>Ramallo). Sorprendentemente, nunca superó el valores críticos para aireación (< 10 % v/v). Hubo diferencias en los flujos de agua determinados a campo (permeámetro de disco). Bajo LC siempre prevaleció el flujo insaturado, mientras que en SD sólo el suelo de textura más gruesa

(Bragado) mostró aumentos significativos de flujo en “by pass” (25 a 75 mm h⁻¹), En Ramallo, luego de 11 años con SD continua el flujo en “by pass” disminuyó de 200 a 20 mm h⁻¹. Se hallaron en LC (Bragado) y en LC y SD (Ramallo) valores críticos de resistencia a la penetración (RMpa > 2,5 MPa) de 15 a 35 cm, mostrando “pisos de arado”. Ni estas impedancias, ni la exigua macroporosidad, afectaron a las raíces de soja de segunda, cuya abundancia se aproximó a cero (prof. > 30 cm) ante la presencia de horizontes Bt con > 35 % de arcilla. Se ajustó polinomio altamente significativo (R² 0,849***).

Puede concluirse entonces que excepto la conducción del agua, el resto de los parámetros varió en forma similar en todos los suelos al pasar a SD, y que las raíces de soja sólo fueron afectadas por las características de los perfiles, independientemente del sistema de labranza usado.

PALABRAS CLAVES: SISTEMAS DE LABRANZA, DEGRADACIÓN, COMPACTACIÓN, MACROPOROS, COMPACTACIÓN, FLUJO DE AGUA SATURADO, FLUJO DE AGUA INSATURADO, FLUJOS BY PASS, IMPEDANCIAS MECÁNICAS, DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES, SOJA.

LONG TERM DIRECT DRILLING MANAGEMENT AND ITS APTITUDE IN DIFFERENT ROLLING PAMPA SOILS: EVALUATION OF SOIL PHYSIC CONDITION

ABSTRACT

Despite direct drilling (DD) is increasing on pampa region, periodic loosening is needed to prevent shallow compaction in soils management with long term DD. Although the information is abundance, it is contradictory and site-specific studied. Due to this, our study evaluate long term DD aptitude in a gradient soil texture of pampa region.

The study was carry out in different soil Series: Bragado, sandy clay loam (Typic Hapludoll); Ramallo, silty clay loam (Vertic Argiudoll); Peyrano, silty clay loam (Typic Argiudoll), and Yeruá, clayey (Argiaquollic Hapludert). Different soil physic, hydraulic and biological properties were measured in a Pristine (**Pri**), conventional tillage (**CT**) and direct drilling (**DD**) field lots. We evaluate soil quality: Total Organic Carbon (**TOC**), Change in mean weight diameter (**CMWD**), Stability Index (**SI**). Also we evaluate soil water dynamic: Steady State infiltration rate at saturated (SS_{sat}) and unsaturated (SS_{unsat}) water potential; and its difference, the preferencial flows paths ($SS_{by-pass}$) and Mean Pore Side (λm). Finally we evaluate soil compaction: Maximum Bulk Density (**MBD**), soil Relative compaction (**RC%**), soil pore volume $> 50 \mu m$, Penetration Resistence (**PRMpa**) and Relative root abundance (**Abund%**).

As most researchers founded, soil quality parameters decreases in CT lots respective to Pri (TOC in Peyrano: 35 to 18 g kg⁻¹, CMWD varied in Bragado: 0,308 to 2,477 mm, MBD 1,42 to 1,56 Mg m⁻³). Comparatively, this parameters

were reestablished in long term DD lots (TOC in Peyrano 19,5 g kg⁻¹, CMWD in Bragado 0,950 mm, and MBD descended to 1,40 Mg m⁻³). Despite soil pore volume > 50 mm were similar (Pri 0,02; CT 0,03 and DD 0,02) soil water dynamic was quite different between treatments. In Bragado, 6 years of continuous DD reestablished the by-pass flow ($SS_{by-pass}$ varied from 25 in CT to 75 mm h⁻¹ in DD), due to the increase in mean pore size (λ_m varied from 200 in CT to 4000 μ m in DD). In contrast, after 11 years of continuous DD reduce drastically water movement ($SS_{by-pass}$ varied from 200 in CT to 20 mm h⁻¹ in DD), and mean pore size (λ_m varied from 5000 in CT to 1000 μ m in DD).

Although critical high penetration resistance in CT Bragado (PR > 4 Mpa) and Ramallo in CT and DD (PR > 2,5 Mpa) were founded, soybean roots growth was never affected, but were severely affected by the presence or absence of *clay pan*, with clay contents > 35% in subsoil.

This results allowed classified the soil physic aptitude in two types. Ones taking in account the soil water dynamic, due to the ability of creation of by pass channels. And the other taking in account different root growth patterns, due to presence or absence of clay pan in subsoil. Also, the results remarked the importance of a sight diagnosis of soil profile to identify subsoil impedance and differences in root growth patterns.

KEYWORDS: TILLAGE SYSTEMS, SOIL PHYSICS PROPERTIES, SOIL COMPACTION, INFILTRATION FLOWS, BY PASS FLOWS, PORE SIZE DISTRIBUTION, CLAY PAN, SOYBEAN ROOTS ABUNDANCE.

Dedico esta tesis a mi futura esposa, María Bothamley, con quien compartí todos los buenos y los no tan buenos momentos del desarrollo de mi tesis,

A mi querido abuelo Donato Micucci, quien desde arriba siempre me guía

a mis padres Carlos y Teresa por estar incondicionalmente siempre junto a mí

a mis hermanos, Carlos, Patricio y Sergio

AGRADECIMIENTOS

A Miguel, mi director, compañero de trabajo y amigo, de quien recibí siempre los mejores consejos científicos y sobre todo de vida.

A Diego Cosentino, mi consejero, por su inagotable predisposición a ayudarme en todo momento y querer hacer las cosas lo mejor posible.

A mis compañeros de la cátedra, Gerardo, Flavio, Carina, Pablo, Helena y Mónica quienes no dudaron en darme una mano cuando lo necesitaba.

A Fernando García, quien supo entender el extenso y valioso tiempo dedicado a la redacción de mi tesis.

A Laura Pruzzo, de la Cátedra de Mejoramiento, por guiarme y bancarme con el análisis estadístico.

A Catalina, por su colaboración en los viajes de campo

A todos mis amigos que siempre estuvieron para comprenderme y ayudarme en cada paso de esta tesis

A la FUNDACIÓN ANTORCHAS, por la ayuda económica

DECLARACIÓN

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.”

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado	Unidades
<i>SD</i>	<i>Siembra directa</i>	
<i>SDd</i>	<i>Siembra directa degradada</i>	
<i>LC</i>	<i>Labranza convencional</i>	
<i>PRI</i>	<i>Prístino</i>	
<i>Fr-Arc-Ar</i>	<i>Franco arcillo arenoso</i>	$g\ kg^{-1}$
<i>Fr-Arc-Lim</i>	<i>Franco arcillo limoso</i>	$g\ kg^{-1}$
<i>Fr-limoso</i>	<i>Franco limoso</i>	$g\ kg^{-1}$
<i>COT</i>	<i>Carbono orgánico total</i>	$g\ kg^{-1}$
<i>CDMP</i>	<i>Cambio en el diámetro medio ponderado</i>	<i>mm</i>
<i>I.E</i>	<i>Índice de Estabilidad</i>	<i>%</i>
<i>Dmáx</i>	<i>Densidad máxima del Test Proctor</i>	$Mg\ m^{-3}$
θ crítica	Humedad crítica del Test Proctor	$g\ g^{-1}$
θ g	Contenido de humedad gravimétrico	$g\ g^{-1}$
<i>SC</i>	<i>Susceptibilidad a la compactación</i>	
$\delta\rho$	Densidad aparente	$Mg\ m^{-3}$
<i>CR</i>	<i>Compactación relativa</i>	<i>%</i>
<i>SO</i>	<i>Sorptividad</i>	$mm\ h^{-1/2}$
<i>I_{sat}</i>	<i>Flujo saturado</i>	$mm\ h^{-1}$
<i>I_{insat}</i>	<i>Flujo no saturado</i>	$mm\ h^{-1}$
<i>I_{by-pass}</i>	<i>Flujo en by-pass</i>	$mm\ h^{-1}$
λm	<i>Tamaño medio de poro</i>	<i>mm</i>
$\lambda m_{by\ pass}$	Tamaño medio de poro en by pass	<i>mm</i>
<i>DTP</i>	<i>Distribución de tamaños de poros</i>	μm
Abund relativa	<i>Abundancia relativa de raíces</i>	<i>%</i>
<i>RP</i>	<i>Resistencia a la penetración</i>	<i>MPa</i>

ESQUELETO GENERAL DE LA TESIS

La presente tesis responde al proyecto original presentado, cuyo principal objetivo era evaluar la aptitud física de diferentes suelos agrícolas de la Pampa Ondulada y la Mesopotamia para ser manejados con siembra directa continua. La tesis se compone de siete capítulos. El **capítulo I** consiste en una introducción general, con la presentación cronológica del problema principal, el *estado del arte* del tema tratado con sus antecedentes, y la justificación del trabajo. Se incluyen también los objetivos e hipótesis principales, y los materiales y métodos comunes a los capítulos restantes. Con respecto a esto último, se describen aspectos como los sitios y suelos elegidos en cada región, y en cada uno de ellas las situaciones de manejo muestreadas, con la fecha de muestreo y el manejo específico de cada situación (cultivo, rotaciones, precipitaciones, etc.). Por último se describió el análisis estadístico utilizado para comparar las situaciones de manejo.

La aptitud física de diferentes suelos para ser manejados con la siembra directa continua fue evaluada a través de parámetros físicos, físico-químicos e hidráulicos, por un lado, y la respuesta de un cultivo agrícola, por el otro. Es por eso que se decidió dividir la tesis en tres capítulos de acuerdo a la agrupación de dichos parámetros. Cada capítulo se compone de una introducción con antecedentes y la justificación del capítulo, así también como los materiales y métodos, los resultados, discusión y conclusiones parciales.

En el **capítulo II** se caracterizó el estado de salud de los suelos bajo las distintas situaciones de manejo. Las ideas subyacentes fueron cuantificar: a) en

qué medida los diferentes suelos se degradaron, o no, luego de varias décadas bajo labranza convencional, para lo cual se los comparó con situaciones teóricamente poco o nada degradadas, como los parques de estancia o pasturas de varios años; b) en qué medida varios años seguidos con siembra directa continua lograron revertir, o no, esa supuesta degradación; y c) en qué medida esa eventual recuperación acercó a cada suelo a ese estado quasi-prístino inicial. Para ello, se midieron parámetros que caracterizan el estado de degradación y de compactación de los distintos suelos y situaciones de manejo, lo cual comprendió la descripción de los perfiles, el espesor del horizonte superficial, determinaciones de textura, contenido de materia orgánica y estabilidad estructural para caracterizar a los suelos de acuerdo al estado de degradación; y determinaciones de compactabilidad (*Test Proctor*) y densidad aparente para caracterizar la compactación.

En el **capítulo III**, se evaluó la aptitud de la siembra directa continua para la conducción del agua en los distintos suelos. Para ello, los parámetros hidráulicos evaluados fueron la infiltración saturada y no saturada, estimación del flujo by-pass, y medición de la cantidad y calidad de los poros responsables de dichos flujos.

El **capítulo IV** evaluó la aptitud de la siembra directa continua para el crecimiento de las raíces de soja en los distintos suelos. Se realizaron perfiles de contenido hídrico y resistencia a la penetración con el objetivo de relacionarlo con la abundancia de raíces en el cultivo de soja.

Finalmente en el **capítulo V** se presentan las conclusiones generales y las implicancias prácticas que surgen de los resultados de toda la tesis. El **capítulo VII** incluye las citas bibliográficas.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.1. <u>Caracterización de los suelos, sistemas productivos, y problemática de la región bajo estudio</u>	1
1.1.2. <u>Condición física de los suelos en siembra directa</u>	3
1.1.3. <u>La compactación de los suelos y la siembra directa</u>	4
1.1.4. <u>El estudio de la macroporosidad y los flujos de agua</u>	7
1.1.5. <u>El problema a estudiar</u>	8
1.1.6. <u>Alcances de la tesis</u>	10
1.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	11
1.2.1. <u>Objetivos e hipótesis principales</u>	11
1.2.2. <u>Objetivos e hipótesis secundarias</u>	11
1.3. MATERIALES Y MÉTODOS	12
1.3.1. <u>Descripción del área</u>	12
1.3.2. <u>Descripción de los tratamientos, fecha de muestreo y manejo</u>	16
1.3.3. <u>Diseño experimental y estadística</u>	17
1.4. <i>ESQUELETO DE LA TESIS</i>	18

CAPÍTULO 2: NIVEL DE DEGRADACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS

2.1. INTRODUCCIÓN	21
2.1.1. <u>Degradación física en Pampa Ondulada</u>	21
2.1.2. <u>Efecto de las labranzas en la distribución del carbono orgánico del suelo</u>	22
2.1.3. <u>Relación entre el carbono orgánico y la compactación del suelo</u>	23

2.1.4. <u>El problema a estudiar</u>	24
2.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	25
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.3.1. <u>Descripción de los suelos</u>	26
2.3.2. <u>Carbono orgánico y estabilidad estructural</u>	26
2.3.3. <u>Caracterización del estado de compactación</u>	27
2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	29
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
2.5.1. <u>Descripción de los suelos</u>	30
2.5.1.1. Espesor de horizontes superficiales	30
2.5.1.2. Análisis granulométrico de horizontes superficiales	31
2.5.2. <u>Carbono orgánico y estabilidad estructural</u>	33
2.5.3. <u>Estado de compactación</u>	36
2.5.4. <u>Relación entre la compactibilidad, la textura y el carbono orgánico</u>	39
2.6. CONCLUSIONES	41
CAPÍTULO 3: APTITUD DE LA SIEMBRA DIRECTA CONTINUA PARA LA CONDUCCIÓN DEL AGUA	
3.1. INTRODUCCIÓN	43
3.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	45
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS	46
3.3.1. <u>Distribución de tamaño de poros en laboratorio</u>	46
3.3.2. <u>Flujos de infiltración con permeámetro de disco</u>	47
3.3.2.1. Consideraciones teóricas del proceso de infiltración	47
3.3.2.2. Descripción del permeámetro de disco	48
3.3.2.3. Determinaciones	50

3.4. ANALISIS ESTADISTICO	51
3.5. RESULTADOS	52
3.5.1. <u>Distribución de tamaño de poros en laboratorio</u>	52
3.5.2. <u>Flujos de infiltración</u>	53
3.5.2.1. Flujo saturado	54
3.5.2.2. Flujo no saturado	55
3.5.2.3. Flujo by-pass	56
3.6. DISCUSIÓN	58
3.7. CONCLUSIONES	60

CAPÍTULO 4: APTITUD DE LA SIEMBRA DIRECTA CONTINUA PARA EL CRECIMIENTO DE LAS RAÍCES DE SOJA

4.1. INTRODUCCIÓN	62
4.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	65
4.2.1. <u>Objetivos</u>	65
4.2.2. <u>Hipótesis de trabajo</u>	65
4.3. MATERIALES Y MÉTODOS	66
4.3.1. <u>Volumen de poros > 50 μm y compactación relativa</u>	66
4.3.2. <u>Perfil de resistencia y humedad</u>	66
4.3.3. <u>Distribución de raíces de soja</u>	68
4.3.4. <u>Análisis estadístico</u>	69
4.4. RESULTADOS	70
4.4.1. <u>Poros > 50 μm, compactación relativa</u>	70
4.4.2. <u>Perfiles de humedad edáfica y resistencia a la penetración</u>	71
4.4.3. <u>Abundancia de raíces</u>	75
4.4.3.1. Impacto de las labranzas sobre el crecimiento de las raíces	75

4.4.3.2. Influencia de las impedancias subsuperficiales en el crecimiento de las raíces	77
4.5. CONCLUSIONES	79

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

5.1. PROBLEMA AGRONÓMICO QUE ALENTÓ EL DESARROLLO DE ESTA TESIS	81
5.2. INTERROGANTES RESPONDIDOS	83
5.3. LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS Y EL CULTIVO DE SOJA- PERSPECTIVAS A FUTURO DE LA PROBLEMÁTICA	89
5.4. INTERROGANTES FUTUROS A RESPONDER	90

<i>CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA CITADA</i>	92
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Espesor de los horizontes superficiales (A y AB) según las Cartas de Suelos del INTA y las observaciones hechas en el campo.	31
Tabla 2.2	Análisis granulométrico y clasificación textural de la capa de 0-10 cm, para diferentes suelos y situaciones de manejo.	32
Tabla 2.3	Estabilidad de agregados en la capa superficial 0-10cm (CDMP en mm), para diferentes series de suelo y situaciones de manejo.	35
Tabla 2.4	Índice de estabilidad porcentual (I.E %) respecto de la situación prístina en la capa superficial 0-10cm, para diferentes series de suelo y situaciones de manejo.	36
Tabla 2.5	Valores de densidad máxima ($D_{m\acute{a}x}$), humedad crítica (θ_c) y susceptibilidad a la compactación (SC) de la capa superficial para diferentes series de suelo y situaciones de manejo.	37
Tabla 2.6	Densidad aparente (δ_{ap}) en la capa superficial para diferentes suelos y situaciones de manejo	38
Tabla 2.7	Compactación relativa (CR%) en la capa superficial 0-10cm, para diferentes suelos y situaciones de manejo	39
Tabla 2.8	Modelos de regresión y variables intervinientes, que estimaron la compactabilidad de los suelos ($D_{m\acute{a}x}$)	40
Tabla 3.1	Propiedades hidráulicas medidas con permeámetros de disco.	51
Tabla 3.2	Correlación lineal (R^2) entre tamaños de poros (DTP) e Infiltración saturada (I sat) y no saturada (I insat) a dos profundidades.	60
Tabla 4.1.	Volumen de macroporos $> 50 \mu m$ (% v/v de poros del suelo) determinado en mesa de tensión para diferentes series de suelo y situaciones de manejo a dos profundidades 0-5 y 5-10 cm.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Variación hipotetizada de los parámetros de calidad de suelo para distintas situaciones de manejo	12
Figura 1.2	Variación del porcentaje de limo y arena del horizonte superficial de distintas series de suelos de región pampeana.	14
Figura 1.3	Ubicación geográfica los sitios de muestreo y Serie de Suelo dentro del área de estudio.	15
Figura 2.1	Representación gráfica de los índices de compactabilidad obtenidos con ensayos de compactación “Test Proctor”.	29
Figura 2.2	Contenido de carbono orgánico (g kg^{-1}) a dos profundidades (0-5 cm y 5-10 cm), para diferentes situaciones y serie de suelos.	34
Figura 2.3	Relación entre el carbono orgánico de 0 – 0,05 m $\text{COT}_{(0-5)}$ y la compactabilidad (Dmáx) para el área de estudio.	41
Figura 3.1	Cálculo de la Infiltración acumulada (Isat/insat) y la sorptividad (So), correspondiente a mediciones <i>in situ</i> con permeámetro de disco.	48
Figura 3.2	Esquema del permeámetro de disco para mediciones de propiedades hidráulicas en condiciones de instauración (a), y de saturación (b).	49
Figura 3.3	Permeámetros de disco saturado e insaturado instalado en el campo.	51
Figura 3.4	Distribución de tamaño de poros en Bragado, Ramallo y Peyrano para la capa de 0-5 cm a), c) y e) y para la capa de 5-10 cm b), d) y f), respectivamente bajo distintas situaciones de manejo.	53

Figura 3.5.	Flujo de infiltración saturada (I_{sat}) medido con permeámetro de disco en Bragado a), Peyrano b) y Ramallo c) para diferentes situaciones de manejo.	55
Figura 3.6.	Flujos de infiltración no saturada (I_{insat}) medido con permeámetro de disco en tres suelos pampeanos y para diferentes situaciones de manejo.	56
Figura 3.7.	Flujos de infiltración en by-pass (I_{bypass}) estimado por la diferencia entre I_{sat} - I_{insat} y tamaño medio de poro representativo (l_m by-pass) para las series de Bragado a) y b), y Ramallo c) y d) respectivamente en diferentes situaciones de manejo.	58
Figura 3.8.	Contribución de los flujos by-pass e insaturado al flujo total de infiltración para la serie Bragado a) y Ramallo b) bajo diferentes situaciones de manejo.	59
Figura 4.1.	Rendimientos medios de soja en la región Pampeana, y desglosados por provincias.	63
Figura 4.2.	Esquema de la grilla usada para determinar abundancia relativa de raíces en el cultivo de soja.	69
Figura 4.3.	Perfiles de humedad gravimétrica (θ_g) y resistencia a la penetración (R Mpa) para la serie Bragado 1a y b, Peyrano 1c y d, Ramallo 1 e y f y para la serie Yeruá 1 g y h; en diferentes situaciones.	74
Figura 4.4.	Abundancia de raíces de soja hasta los 30 cm para la serie Bragado 2a, Peyrano 2b, Ramallo 2c y Yeruá 2d en dos situaciones de manejo LC (labranza convencional), SD (siembra directa) y SDD (siembra directa degradada).	76
Figura 4.5.	Relación entre la abundancia relativa de raíces del cultivo de soja con la profundidad para diferentes suelos de región pampeana.	78

Figura 4.6.	Relación entre la abundancia relativa de raíces del cultivo de soja en el horizonte B y el contenido de arcilla en el horizonte B (profundidad >0.15 m).	79
Figura 5.1.	Proporción de parámetros físicos, físico-químicos e hidráulicos que produjeron mejoras o no, bajo siembra directa continua respecto de la labranza convencional en diferentes suelos pampeanos.	84
Figura 5.2.	Evolución del área sembrada entre 1975 y 1995, para los cultivos de soja y maíz en dos sitios de muestreo.	90

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

Los suelos difieren en su aptitud física para poder ser manejados con labranza cero. Esta aptitud reside en su capacidad para regenerar macroporos y producir camas de siembra óptimas para la emergencia de un cultivo (Stengel *et al.*, 1984). Dicha regeneración depende de los ciclos de humedecimiento-secado, los que generan microgrietas en suelos con, al menos, una pequeña proporción (> 8%) de arcilla activa (Dexter, 1988). Debido a que ofrecen serios inconvenientes en cuanto a su capacidad de regenerar macroporos, los suelos limosos han sido clasificados a veces como no adecuados para la labranza cero (Cannell *et al.*, 1980; Douglas *et al.*, 1986). En términos generales, son suelos a menudo débilmente estructurados, con limitado potencial de expansión-contracción, y que además, se compactan fácilmente (Cannell *et al.*, 1980). Estos suelos ocupan una gran superficie en las principales grandes llanuras de clima templado, como por ejemplo, la región Pampeana, y ofrecen respuestas variables en cuanto a crecimiento y rendimiento de los cultivos al ser manejados con siembra directa continua.

La región Pampeana es la principal área de producción de cultivos agrícolas extensivos (e.g. soja, trigo y maíz, en ese orden) de Argentina, y comprende las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba y la Pampa. Por extensión, también se incluye a la provincia de Entre Ríos, perteneciente en realidad a la región Mesopotámica, cubierta por suelos con un origen distinto (INTA 1990), pero que culturalmente presenta muchas similitudes con la vecina

región Pampeana. La soja, en su variante como único cultivo en el año (soja de 1era.), como segundo cultivo en el año luego de trigo (soja de 2da.), es el principal cultivo agrícola argentino, que a su cosecha motoriza un dinámico complejo agroindustrial responsable de una parte substancial de los ingresos por exportaciones. Dentro de la región Pampeana, la soja se cultiva principalmente en el sector denominado Pampa Ondulada que abarca el norte de la provincia de Buenos Aires, el Sur de Santa Fe y el sudeste de Córdoba. Dentro de esta área una elevada proporción de los suelos son predominantemente limosos en superficie (INTA 1983; 1990), y se encuentran afectados por procesos de degradación física, química y biológica (Madonni *et al.* 1999, Urricariet, Lavado 1999, Michelena *et al.* 1988, S.A.G. y P - C.F.I. 1996, Senigagliesi, Ferrari 1993). Dicha degradación, ha sido vinculada recientemente con reducciones en los rendimientos de maíz (Urricariet, Lavado 1999) y es causada por significativos descensos de los niveles de materia orgánica y evidenciada por la formación de costras superficiales, mayores tasas de escurrimiento y pérdidas de suelo por erosión, y menor capacidad de almacenamiento hídrico (Michelena *et al.* 1988, Senigagliesi, Ferrari 1993). Estos procesos erosivos han sido ampliamente favorecidos por el generalizado uso de sistemas de labranza convencional (i.e. arado de reja y vertedera, rastra de discos, etc.), los que producen una total remoción de la capa arable y prácticamente no dejan residuos en superficie (Cordone, Galantini, 1994, Marelli, Lattanzi 1990, Unger 1990).

Otro factor concurrente fue la gran difusión del cultivo de la soja, el cual deja al suelo con la estructura más susceptible a la degradación, debido al grado de refinamiento de la cama de siembra y el aumento de las precipitaciones en una

etapa donde el suelo permanece sin cobertura, haciéndolo más susceptible a sufrir procesos de erosión hídrica y eólica (Alberts, Wendt 1985, Bathke, Blake 1984). Dentro de este contexto, un número creciente de productores pampeanos ha adoptado durante la última década los sistemas de siembra directa (Panigatti *et al.* 1998). De acuerdo con información provista por la Asociación Argentina de Productores de Siembra Directa, más de 11 millones de hectáreas en la Argentina son manejados con este sistema de los cuales el 57% corresponde al cultivo de soja (A.A.P.R.E.S.I.D., 2001). Las estadísticas más recientes publicadas por el INDEC (www.indec.mecon.gov.ar) indican que en el año 2001 se sembraron 6,6 millones de hectáreas con soja de 1era., y 3,7 millones con soja de segunda en toda la región Pampeana. A la siembra directa (sin distinguir entre continua o estacional) le correspondieron 4,2 millones de soja de 1era. (64 % del área implantada), y 3,2 millones de soja de 2da. (86 %), respectivamente.

En la provincia de Entre Ríos, la soja es implantada mayormente sobre suelos de carácter vertisólico, compuestos por arcillas expansibles (INTA 1990). La superficie implantada asciende a 300.000 ha de soja de 1era. y 275.000 ha de soja de 2da (www.indec.mecon.gov.ar). La siembra directa también se ha difundido con éxito, alcanzando al 68 % y 90 % de la superficie implantada con soja de 1era. y de 2da., respectivamente. A diferencia de los suelos molisoles de pradera (e.g. Argiudoles, Hapludoles, etc.), existen mucho menor volumen de información acerca de la aptitud de los vertisoles para ser manejados con siembra directa continua. Teniendo en cuenta su alto índice de expansión – contracción durante los ciclos de humedecimiento – secado, no debieran estos suelos ofrecer inconvenientes en cuanto a los procesos de agrumación en cama de siembra

(Dexter 1988; Oades 1993). Sin embargo, es difícil prever la respuesta de las raíces en subsuelos tan arcillosos, lo que alienta al estudio de este tema.

Bajo siembra directa sólo una estrecha franja del suelo, donde se deposita la semilla del cultivo durante la siembra, es removida mecánicamente. Al no haber inversión del pan de tierra, la superficie del suelo permanece cubierta por una capa de residuos en descomposición (Panigatti *et al.* 1998, Unger 1990). La siembra directa no es generalmente adoptada en forma continua, sino como un sistema estacional para la siembra de soja de segunda sobre rastrojos de trigo. A menudo, los agricultores realizan labores de desfonde con implementos de labranza vertical como el "para-till" o el "cultivie" (Panigatti *et al.* 1998). A pesar de los estudios desarrollados hasta el presente, existen aún algunos aspectos que generan controversia. Uno de ellos se refiere al desarrollo de compactación superficial en los primeros años luego que el suelo deja de ser laboreado. La compactación excesiva afecta a los procesos físicos, químicos y biológicos edáficos (Carter 1990, Domzal *et al.* 1991, Arvidsson, Hakansson 1996) y el movimiento de agua, calor y gases (Domzal *et al.* 1991) transformándose en un problema a escala mundial perjudicando a muchos suelos agrícolas (Logsdon *et al.* 1992). Estas evidencias indican que, lejos de ser una presunción, la compactación superficial es un problema real que afecta a muchos suelos pampeanos no laboreados.

En los suelos manejados con siembra directa continua la falta de remoción genera con el tiempo el asentamiento y empaquetamiento de los terrones y agregados inicialmente sueltos, y consecuentemente, procesos de endurecimiento por aumentos de cohesión (Kemper, Rosenau 1984). Debido a ello, la situación

más frecuente es que los suelos no laboreados presenten valores mayores de densidad aparente y resistencia a la penetración, y menores de macroporosidad en relación con suelos similares laboreados (Johnson *et al.* 1989, Carter 1990 a y b, Hill *et al.* 1990, Logan *et al.* 1991, Hussain *et al.* 1998). La acumulación superficial de carbono orgánico a partir de los residuos en descomposición (Alvarez *et al.* 1998) determina agregados y poros más estables en superficie (Gibbs, Reid 1988). Por otra parte, la presencia de macroporos estables al agua determina aumentos significativos en la tasa de infiltración y en la conductividad hidráulica saturada (Panigatti *et al.* 1998, Senigagliesi, Ferrari 1993). En nuestro país, numerosos autores también hallaron aumentos significativos de estabilidad estructural, y mejoras mensurables en parámetros hídricos luego de varios años de siembra directa continua (Pilatti *et al.* 1988; Santanatoglia, Fernández 1983, Vázquez *et al.* 1990).

En general, los sistemas bajo siembra directa continua producen efectos positivos en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos cuando son usados en suelos de bajos niveles de materia orgánica y débilmente estructurados (Kladivko *et al.* 1986). No obstante, bajo otras condiciones, la adopción de la siembra directa no fue siempre provechosa desde el punto de vista de los rendimientos de los cultivos agrícolas (Senigagliesi, Ferrari 1993, Totis de Zeljkovich *et al.* 1993, Zeljkovich 1992). Las razones no han sido plenamente dilucidadas, pero se atribuyó precisamente al desarrollo de compactación superficial un rol principal en los descensos de rendimientos (Leiva, Hansen 1984, Senigagliesi, Ferrari 1993). Esta idea se basa en las mayores resistencias a la penetración medidas a menudo en suelos manejados con siembra directa continua, en comparación con

otros similares manejados con labranza convencional (Chagas *et al.* 1994, Krüger 1996, Leiva, Hansen 1984). Este hecho afecta negativamente el desarrollo radical del cultivo de trigo y de maíz, afectando sus rendimientos (Leiva, Hansen 1984, Zeljkovich 1992), y modificando también la distribución y la densidad de las raíces en el perfil (Ball-Cohelo *et al.* 1998, De maria *et al.* 1999, Stone *et al.* 1999). Problemas como los mencionados limitan una mayor adopción de la siembra directa continua en la Pampa Ondulada. Existen sin embargo resultados que contradicen estas tendencias generalizadas. Por ejemplo, algunos autores no hallaron diferencias significativas en densidad y porosidad entre la siembra directa y otros sistemas de labranza (Hill 1990, Ismail 1995, Taboada *et al.* 1998). En otros casos, se hallaron incluso valores menores de densidad bajo sistemas conservacionistas (Broder *et al.* 1984, Edwards 1992) y hasta incrementos en el volumen de macroporos (Douglas *et al.* 1998).

La necesidad de periódicas remociones mecánicas en muchos suelos, así como los resultados contradictorios que surgen de la literatura, evidencian la necesidad de generar mayor conocimiento sobre los mecanismos generadores de macroporos. Los macroporos comprenden una pequeña fracción del volumen de los suelos, pero tienen un profundo efecto en los flujos de infiltración y redistribución del agua (White 1985). Cuando se estudia los efectos de las distintas labranzas, la macroporosidad provee un índice de gran utilidad en relación a los efectos de la compactación del suelo en la geometría de los mismos para un amplio rango de texturas medias (Douglas 1986, Carter 1988). La macroporosidad ha sido investigada a través de diferentes técnicas. Una de las formas más confiables de medir los cambios ocurridos en el espacio poroso del

suelo, es cuantificando su cantidad, su tamaño, su configuración y distribución (Bullock *et al.* 1995, Danielson *et al.* 1986, Greenland 1981). Existe abundante bibliografía basada en mediciones de macroporosidad y propiedades hidráulicas en suelos bajo diferentes sistemas de labranza en condiciones de laboratorio (Onstad *et al.* 1987, Pomers 1992, Powers *et al.* 1992, Rawls *et al.* 1983, Taboada *et al.* 1998), pero en contrapartida son menos frecuentes los estudios realizados directamente a campo. Ello se debe a que éstas propiedades muestran típicamente respecto de las propiedades físicas, siendo dificultosa su medición, y además implican un alto costo (Riley, 1996). Una de las metodologías disponibles desarrollada en los últimos años son los permémetros de disco, los cuales permiten medir a campo la conductividad hidráulica, la sorptividad y la porosidad responsable del flujo de agua a diferentes potenciales mátricos (White, Perroux 1989). Además, este estudio es de gran importancia ya que es posible cuantificar los diferentes flujos de infiltración y determinar el tamaño de los macroporos $> 500 \mu\text{m}$, infiriendo acerca del estado de degradación estructural del suelo y su estudio a campo es novedoso y poco desarrollado en nuestro país.

Cuando los suelos no son removidos mecánicamente, la creación de macroporos depende exclusivamente de factores naturales (Gibbs, Reid 1988). Estos factores se relacionan en gran medida con la formación abiótica de agregados por mecanismos de agrietamiento durante los ciclos de humedecimiento - secado, y su posterior estabilización biológica a cargo de cementantes orgánicos (Dexter 1988, Oades 1993). Por ello, existe consenso en considerar a las características texturales (% de arcilla y mineralogía de dicha fracción) como factores clave en la determinación de la aptitud de los suelos para

ser manejados con siembra directa continua. Precisamente, los suelos limosos han sido considerados poco adecuados pues son generalmente débilmente estructurados, tienen limitado potencial de expansión - contracción y se compactan fácilmente (Cannell *et al.* 1980, Stengel *et al.* 1984). Gran parte de los suelos pampeanos poseen muy elevados porcentajes de limo (e.g. 50 - 70 %) (Salazar Lea Plaza, Moscatelli 1989), una tercera parte de los cuales son limos finos (2 - 20 μm) de origen biológico, con baja densidad y elevada susceptibilidad a la ruptura (Cosentino 2000, Pecorari *et al.* 1990). Las arcillas prevalecientes en la región son illitas, de carácter poco expansible (Barbosa *et al.* 1997, 1999, Pecorari *et al.* 1990). Debido a ello, los suelos poseen limitada capacidad de agrietamiento durante los ciclos de humedecimiento - secado. Por otra parte, recientemente Barbosa *et al.* (1999) hallaron que el agregado de arcilla expansible no genera mayor agrietamiento y porosidad de aire, sino sólo mayor hinchamiento en estos suelos limosos.

Cabe entonces preguntarse de qué medios se dispone en estos suelos para lograr aumentos en la macroporosidad en suelos degradados en ausencia de labranzas. Una de las vías probables es la creación de bioporos originados en canales de raíces y lombrices (Gibbs, Reid 1988, Kay 1990, Mariinissen 1994, Taboada *et al.* 2000). Esta acción biológica requiere que el suelo posea baja resistencia a la penetración, lo cual se logra con el suelo húmedo o con el suelo con alto nivel de materia orgánica (Kay 1990, Prieksat *et al.* 1994, Thomas *et al.* 1996). Existe abundante evidencia que indica que se necesita no menos de tres años para que los suelos limosos se recuperen de la compactación, y ganen una porosidad favorable bajo siembra directa continua, (Ball 1998, Douglas, Jarvis

1986, Francis, Cameron 1987, Soane, Pierce *et al.* 1992, Thomas *et al.* 1996, van den Bygaart *et al.* 1998, Voorhees, Lindstrom 1984). Sin embargo, esta estrategia reveló no ser exitosa en algunos Argiudoles limosos de la región pampeana, que aún con alto nivel de materia orgánica, tuvieron valores macroporosidad críticos para los procesos de aireación (i.e. $< 10\%$ v/v) (Taboada *et al.* 1998). Comparativamente, en Hapludoles franco arenosos se ha hallado elevada macroporosidad compatible con elevados rendimientos en cultivos de soja (Scheiner *et al.* 1997), independientemente del sistema de labranza analizado (convencional *vs* siembra directa) (Taboada *et al.* 1998). Estos resultados concurren a señalar que el porcentaje de arena parece un factor importante en la creación de macroporos. Precisamente, de acuerdo con un modelo conceptual propuesto por Towner (1987, 1988), la formación de grietas de secado no depende sólo de la presencia de arcillas expansibles sino también de la presencia de granos de arena (i.e. $> 50\ \mu\text{m}$), en torno a los cuales se aglutinen las partículas de arcilla (i.e. $< 2\ \mu\text{m}$) durante el secado. Recientemente Díaz Zorita, Grosso (2000) hallaron que la susceptibilidad a la compactación de los suelos pampeanos se relaciona no sólo con su nivel de materia orgánica que resulta de la historia de uso agrícola, sino también con el porcentaje de limo.

Según surge de los antecedentes presentados, existe en el mundo y en nuestro país abundante cuerpo de conocimiento sobre el comportamiento y evolución físico - estructural de los suelos manejados con siembra directa. La mayor parte de estos trabajos son sitio - específicos, abarcando a lo sumo no más de dos suelos o situaciones de manejo. Este tipo de enfoque del problema permitió avanzar hasta un resultado casi "clásico", basado en suelos que aumentan su

resistencia, pero que como contrapartida aumentan su estabilidad, y su infiltración al dejar de ser laboreados. Contrariamente, han sido poco frecuentes los trabajos que abarquen varios sitios, conformando un gradiente textural. Tampoco se conocen, antecedentes bibliográficos que hayan abordado el análisis de la influencia del porcentaje de arena fina sobre el comportamiento estructural de los suelos manejados con siembra directa continua. La consideración de esta información de fácil obtención puede permitir arrojar luz sobre el comportamiento errático de los suelos limosos bajo siembra directa continua. En otro plano de análisis, la identificación de niveles de arena y de materia orgánica compatibles con adecuados crecimientos y rendimientos de cultivos agrícolas, así como los mecanismos de interacción entre estos componentes, puede servir de base para la elaboración de un modelo conceptual que explique la respuesta de los cultivos a la compactación.

Estas evidencias indican que se requiere lograr un grado mayor de ajuste sobre los mecanismos y las interacciones de factores que conducen a un determinado estado de compactación superficial en los suelos, y en relación con ello, poder así determinar su aptitud para ser manejados con siembra directa continua.

1.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS PRINCIPALES

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la aptitud física de diferentes suelos pampéanos para ser manejados con siembra directa continua.

Se hipotetiza que los suelos pampéanos difieren en su aptitud para ser manejados con SD continua. Ello se relaciona con la composición granulométrica y la mineralogía del horizonte superficial.

1.3. MATERIALES Y MÉTODOS

1.3.1. Descripción del área

En la Pampa Ondulada existen dos subregiones que se diferencian marcadamente por las características de sus suelos,: a) la Pampa Arenosa (centro-oeste de Buenos Aires), donde prevalecen los Hapludoles típicos de textura franco arenosa en superficie. Estos suelos ocupan posiciones dentro del paisaje preferentemente planas o áreas entre médanos consolidados. En época de sequías prolongadas se produce erosión eólica; y b) la Pampa Ondulada propiamente dicha (sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires), que está mayormente cubierta por Argiudoles de textura franco limosa en superficie. Esta área se caracteriza por tener clima subhúmedo-húmedo, mesotermal y un promedio anual de 950 mm, concentrados en verano y con valores mínimos en invierno (INTA, 1983). Estos suelos, se hallan en un paisaje de planicies elevadas, suavemente onduladas, recortadas por arroyos que drenan al río Paraná, con pendientes planas a convexas, con valores que pueden alcanzar hasta el 3%. Cuando se erosionan, la característica más sobresaliente de estos suelos es la pérdida parcial o total del horizonte superficial (Ah) y la presencia de cárcavas (Hall *et al.*, 1992; Salazar Lea Plaza y Moscatelli, 1989).

Habría que agregar un breve speech de los vertisoles de la Mesopotamia. Pregúntale Diego por una publicación que hicieron ellos en la RFAgron. Hace unos dos años, sobre vertisoles de ER.

Se realizó un estudio previo para identificar posibles sitios de muestreo ubicados en una transecta de suelos con dirección SW - NE, como una forma de abarcar un rango amplio de diferentes texturas en el horizonte superficial. Dicho estudio se llevó a cabo con la Carta de Suelos de la República Argentina (INTA, 1974, 1980), obteniéndose los valores de arcilla, limo y arena en porcentaje (%) y su correspondiente clasificación textural, como muestra la Figura 1.1. No se si en la figura no hay que poner los suelos de ER

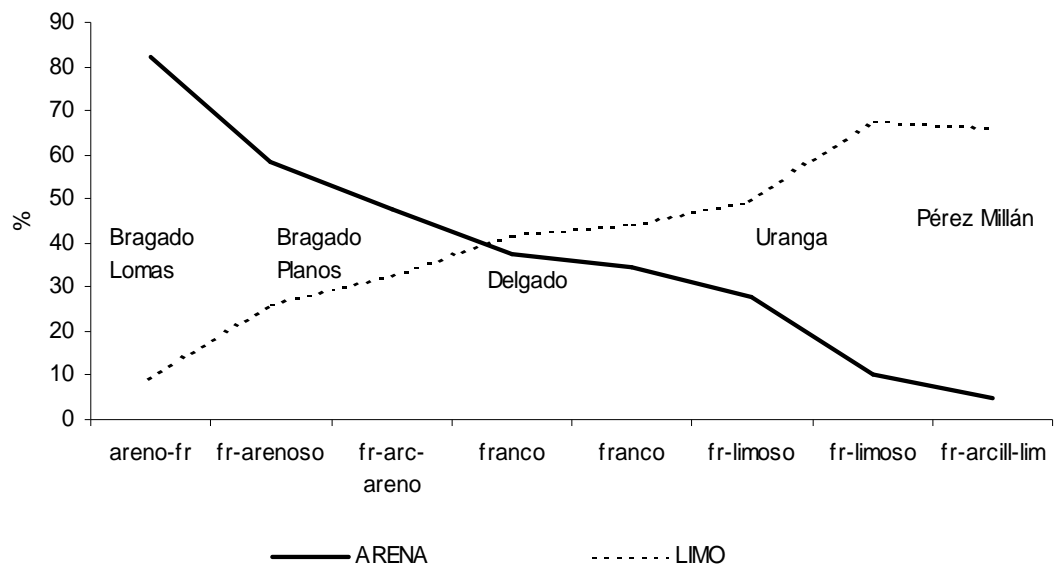


Figura 1.1. Variación del porcentaje de limo y arena del horizonte superficial de distintas series de suelos de pampa ondulada de acuerdo con su clasificación textural.

En función del estudio, se trabajó, en la subregión Pampa Arenosa, en la localidad de **Bragado**, provincia de Buenos Aires (Lat.:35°7'S; long.:60°31'O), sobre un suelo Hapludol típico, de la serie homónima. En Pampa Ondulada propiamente dicha, el muestreo se realizó en dos suelos; uno en la provincia de Buenos Aires, localidad de **Pérez Millán** (Lat.:33°47'S; long.:60°7'O), sobre un Argiudol vértico, serie Ramallo, y el otro en la provincia de Santa Fe, **Uranga** (Lat.:33°16'S; long.:60°42'O), sobre un Argiudol típico, serie Peyrano. Finalmente, se incluyó un suelo de la Pcia. de Entre Ríos, en la localidad de **Concordia** (Lat.:31°25'S; long.:58°3'O), Hapludert típico, de la serie Yeruá. Estos suelos se ubican en un paisaje ondulado a suavemente ondulado, corresponden al orden Vertisol con microrrelieve gilgai desarrollado en pendientes de 1,5% o más., con arcilla activa desde la superficie (montmorillonita), y de color oscuro. El porcentaje de materia orgánica es alto (4-6%) (Figura 1.2).

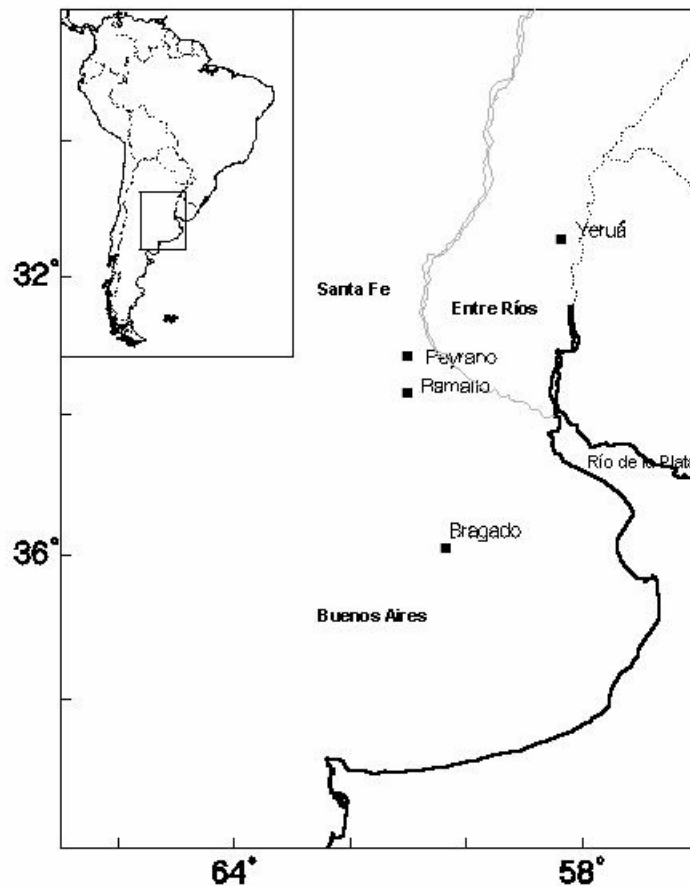


Figura 1.2. Distribución geográfica de las cuatro localidades del estudio.

1.3.2. Descripción de los tratamientos, fecha de muestreo y manejo

En cada uno de estos sitios se compararon diferentes situaciones de manejo tomadas siempre de campos en producción:

- **Parque/pastura**, situación testigo no degradada como pasturas de varios años o parques de estancia.
- **Labranza convencional (LC)**, labranza con algún tipo de remoción mecánica del horizonte superficial (e.g. reja y vertedera, disco, etc). En general, ello siempre significó control prevalentemente mecánico de malezas. En las rotaciones en general siempre prevaleció el monocultivo de soja de 1era, y el doble cultivo trigo o avena/soja de

2da.. La fertilización fue, en general, menos frecuente que para los lotes en SD.

- **Siembra Directa (SD)**, lotes con varios años de antigüedad con SD continua (> 4). Ello siempre significó la realización de control químico de malezas, y rotaciones con inclusión de maíz, para lograr mayor aporte de carbono, y mejorar la cobertura del suelo por residuos. Estos lotes siempre fueron fertilizados con fósforo a la siembra de soja, y eventualmente con nitrógeno cuando se sembró trigo o maíz.

- En Uranga se muestreó una cuarta situación: SD degradada. Se trató de lotes vecinos a SD, pero que exhibían mayor cantidad de años de agricultura, con prevalencia de chacra varios años atrás, y visiblemente, evidencias de pérdidas de suelos en procesos de erosión hídrica.: Estos niveles de degradación fueron definidos previamente por Barbosa y Taboada (1999) para la zona.

Las situaciones mencionadas corresponden a establecimientos predominantemente agrícolas. Con el fin de poder de hacer comparables entre sí las situaciones en cada localidad, se muestrearon campos con una proximidad tal que permitió ubicarlos dentro de la misma serie de suelos. Las rotaciones están integradas fundamentalmente por avena o trigo-soja de segunda. Las determinaciones se realizaron al final de los cultivos de invierno (noviembre – enero).

5. Diseño experimental y estadística

En cada sitio y suelo las diferencias entre las situaciones Parque/pastura y LC indican el deterioro ocasionado por las labranzas tradicionales, mientras que las diferencias entre LC y SD, la eventual recuperación de dicho deterioro por la siembra directa. Las diferencias Parque/pastura -SD indican, por su parte, la capacidad de la SD para llevar los atributos edáficos a la condición inicial.

Los resultados fueron analizados por medio del error estándar de las medias y a partir de allí pudo inferirse la mínima diferencia significativa. Por tratarse de un experimento mensurativo, y no en parcelas en bloques aleatorizados no fue posible contar con repeticiones. Puede considerarse que este diseño no implica objeciones estadísticas por problemas de pseudoréplica (Webster, 1992), ya que los resultados sólo representan a las situaciones estudiadas, y no pretenden ser extrapolados a otros sitios.

CAPÍTULO 2

NIVEL DE DEGRADACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS

2.1. INTRODUCCIÓN

2.1.1. Degradación física en Pampa Ondulada

Las condiciones físicas del suelo pueden deteriorarse como resultado de un gran número de causas. Una de ellas es el uso de la tierra bajo agricultura continua, que determina la disminución de la estabilidad en agua de los agregados (Michelena *et al.*, 1988; Pilatti *et al.*, 1988; Marelli, Lattanzi 1990; Dexter 1991). Estos procesos de desestabilización se producen en forma paralela con la declinación del contenido de materia orgánica (Michelena *et al.*, 1988; Senigagliesi, Ferrari 1993). Precisamente, la materia orgánica condiciona la estabilidad de los agregados (Tisdall, Oades, 1982). Debido al descenso en el contenido de materia orgánica, se afectan fuertemente propiedades del suelo como la tasa de infiltración, la capacidad de almacenaje del agua, etc (Campbell *et al.*, 1986), aumentando también la compactibilidad del suelo (Carter 1987; Thomas *et al.*, 1996).

Muchos suelos de Pampa Ondulada presentan un marcado deterioro estructural. Ello es debido, por un lado, a su textura superficial con una elevada proporción de limo fino (2-20 μ m), lo cual le confiere una marcada tendencia a la degradación estructural. Este hecho, sumado a las características del relieve (pendientes de gran longitud y moderado gradiente) determinan que la principal

limitante física de la región sea la erosión hídrica. A su vez, la disminución de los contenidos de materia orgánica, si bien variables entre las series de suelo y los distintos sistemas de manejo, fluctúan entre el 24 y más del 60% del contenido original, por el uso actual continuado de cultivos como la soja, altamente extractivo, aportando poco rastrojo de baja relación carbono:nitrógeno (Marelli, Lattanzi, 1990; Michelena *et al.*, 1989; Pilatti *et al.*, 1988). El estado actual de degradación física en Pampa Ondulada es evidenciado por la formación de costras superficiales, mayores tasas de escurrimiento, pérdidas de suelo por erosión y menor capacidad de almacenamiento hídrico (Michelena *et al.*, 1988; Senigaliesi y Ferrari, 1993).

2.1.2. Efecto de las labranzas en la distribución del carbono orgánico del suelo

Los sistemas de labranza afectan principalmente la distribución de la materia orgánica en el perfil del suelo. Por un lado, la labranza convencional puede presentar un mayor contenido relativo de materia orgánica en las capas subsuperficiales (Lal, 1986). Bajo siembra directa, al no haber inversión de la gleba, se produce una estratificación de la cantidad y la calidad del carbono (Alvarez *et al.*, 1995), que determina una mejor condición física en superficie. Numerosos estudios muestran un significativo incremento en el contenido de materia orgánica en los primeros 5 centímetros del suelo en siembra directa, alcanzando valores de 0,5 a 1,5% de incrementos en pocos años, siendo menores las diferencias en profundidad (Rhoton 2000; Hansen *et al.*, 1984; Pidello *et al.*, 1995). Según Rhoton (2000), todos los cambios ocurridos en las propiedades

físico-químicas de los suelos en esta capa se relacionan directamente con procesos de ganancia o pérdida de materia orgánica.

La siembra directa ha sido considerada como el medio más idóneo para detener los procesos de erosión del suelo a nivel de lote, e incrementar su estabilidad estructural (Unger, 2002; Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Arshad *et al.*, 1999; Tebrügge, Düring 1999). Dicha recuperación no ocurre de igual forma en todos los suelos, ni mucho menos en el mismo período (Ball-Coelho *et al.*, 1998; Douglas *et al.*, 1986; Francis *et al.*, 1987; Soane, Ball 1998; Pierce *et al.*, 1992).

2.1.3. Relación entre el carbono orgánico y la compactación del suelo

Existe una relación entre la materia orgánica y la compactación del suelo. Esta relación es muy estrecha y negativa (Gupta, Allmaras 1987; Thomas *et al.*, 1996; Carter, 1987). Bajo siembra directa, al existir una acumulación importante de carbono orgánico en las capas superficiales, con los años existe un efecto benéfico de este tipo de labranza sobre la compactabilidad (Thomas *et al.*, 1996). Este efecto compensa el efecto negativo de compactación causado por el peso de las maquinarias y la falta de remoción del suelo. Díaz Zorita, Grosso (2000) estudiaron la susceptibilidad a la compactación de los suelos de Región Pampeana a través del Test Proctor, y concluyeron que el riesgo de desarrollo de compactación depende tanto de la textura como del nivel de materia orgánica. Dentro de la franja de suelos limo – arcillosos, la susceptibilidad a la compactación aumenta con el % de arcilla + limo (umbral 35%). Carter (1990) relacionó la CR% con el rendimiento potencial de los cultivos de cereales en suelos francos. Así, el crecimiento óptimo de los cultivos tiene lugar con niveles

de CR entre 75 y 83%, y es afectado negativamente con CR mayores que 90%. Sin embargo, el régimen de humedad influencia el óptimo de compactación relativa de rendimientos de cereales (Hakansson 1988). Carter (1990), y más recientemente en la región pampeana Quiroga *et al.* (1999), Díaz-Zorita y Grosso (2000) y Aragón *et al.* (2000), propusieron el uso de pruebas de compactación en laboratorio (test Proctor) para estudiar la compactación del suelo en relación con diferentes suelos y prácticas de manejo y la influencia de la materia orgánica.

2.1.4. **El Problema a estudiar**

Los procesos abióticos, fundamentalmente la expansión-contracción durante los ciclos de humedecimiento-secado, ejercen diferente influencia, y así diferente tasa de recuperación de los suelos bajo siembra directa, en función de su textura, mineralogía de arcillas, nivel de degradación inicial, y factores climatológicos. A pesar de su matriz eminentemente limosa, existe un gradiente de variación textural en suelos superficiales de la Pampa Ondulada. Por ello, no se conoce con exactitud la magnitud o la importancia que cada factor tiene en dicho proceso de recuperación, y en función de ello, cuál es el grado de efectividad esperable bajo siembra directa continua en la región.

2.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El primer objetivo de este capítulo fue medir el nivel de degradación y compactación de los diferentes suelos y su variación entre las situaciones de manejo a través de i) observaciones morfológicas del perfil de suelo; ii) carbono orgánico iii) estabilidad estructural iv) índices de compactibilidad de los suelos.

Se hipotetizó que en todos los suelos, a partir de una situación testigo (nivel de referencia) prístina o con pastura por muchos años (PRI), se produce un deterioro de los suelos con labranza convencional (LC), y su posterior recuperación con (SD). La recuperación se consideró completa cuando $PRI=SD$, o parcial cuando $PRI>SD$ y $SD>LC$.

Se esperó que el grado de dicha recuperación, dependa de la textura de los suelos de acuerdo con la hipótesis principal planteada en el Capítulo 1. De esta manera, sólo es esperable una recuperación tanto en Bragado (por acción biológica) como en Yeruá (por mecanismos abióticos).

Un segundo objetivo correspondió a encontrar la relación de mayor ajuste entre las distintas variables edáficas medidas y la compactibilidad de los suelos pampeanos teniendo en cuenta la diferente composición granulométrica de los suelos.

2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1. Descripción de los suelos

En cada situación de manejo se caracterizaron los horizontes superficiales mediante observaciones visuales. Las características morfológicas observadas fueron i) espesor del horizonte A y la profundidad hasta el Bt, ii) formas estructurales y la presencia o ausencia de raíces, de acuerdo a indicaciones provistas por normas de uso general (USDA, 1999). Para cada suelo y situación de manejo se extrajo aleatoriamente tres muestras y se determinó la composición granulométrica de 0 – 0.10 m, usando el método de la pipeta de Gee, Bauder (en Klute, 1986).

2.3.2. Carbono orgánico y estabilidad estructural

Para cada suelo y situación de manejo se realizaron tres determinaciones del contenido de carbono orgánico a dos profundidades (0 - 0.05 y 0.05 – 0.10 m) usando el método de Walkley y Black (en Nelson, Sommers 1996). Para las mismas situaciones se extrajeron aleatoriamente tres muestras no disturbadas de 0 – 0.10 m, a las que se les determinó la estabilidad en seco y en húmedo de sus agregados, usando vibrador de tamices y equipo Yoder, respectivamente (Kemper, Rosenau 1984). La diferencia entre los diámetros medios ponderados del tamizado en seco y húmedo proporcionó el grado de estabilidad estructural. Las muestras fueron previamente secadas al aire, se separaron los agregados a mano y fueron pasadas por el tamiz de 8 mm. Luego se tamizaron los agregados en seco durante 5 minutos con un vibrador que tenía un conjunto de tamices de 4,75 - 3,35 – 2,00 mm. Luego de este procedimiento se calculó el diámetro medio ponderado en seco (DMPseco), que surge de la suma de los productos de la proporción de suelo seco en cada tamiz por el diámetro medio de los agregados presentes. Los agregados fueron humedecidos

lentamente (usando un spray) hasta aproximadamente su capacidad de campo, y luego fueron incubados en forma controlada durante 24 h a 20 °C y 98% de humedad relativa. Estos agregados fueron tamizados en húmedo durante 30 minutos con tamices 4,75 - 3,35 – 2,00 – 1,00 – 0,425 – 0,300 mm. Estos tamices se sumergieron previamente en recipientes de agua utilizando el equipo Yoder, el cual registró movimientos ascendentes y descendentes de 35 oscilaciones por minuto. Los agregados se secaron luego en estufa 24 h. a 105 °C y se calculó el diámetro medio ponderado en húmedo (DMPhúmedo). De Boodt y De Leenheer (1958) propusieron un parámetro para evaluar la estabilidad de los agregados basado en el cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP), que indica el grado de estabilidad de un suelo, y se calcula como la diferencia entre DMPseco (mm) – DMPhúmedo (mm). El índice de estabilidad (I.E. %), fue proporcionado por la comparación entre los valores de las situaciones bajo laboreo (LC y SD) con el de la situación prístina (PRI), a través la ecuación [1]:

$$\text{I.E.}(\%) = (\text{CDMP}_{\text{suelo prístino}} / \text{CDMP}_{\text{tratamiento}}) * 100 \quad [1]$$

2.3.3. Caracterización del estado de compactación

Para cada suelo y situación de manejo fueron tomadas aleatoriamente tres muestras de 25 kg de suelo de los primeros 10 cm. Este material fue destinado a la realización de ensayos de compactación (test Proctor), según el método estándar de la “American Society for Testing Materials”(ASTM, 1982). Se utilizó el método estándar de laboratorio: un pisón de 2,27 kg cayó libremente desde una altura de

30,3 cm, en forma sucesiva sobre tres capas de suelo superpuestas en un cilindro de 943 cm³ a razón de 25 golpes por capa. Este ensayo permitió comparar en las diferentes situaciones la compactibilidad del suelo a través de sus índices i) densidad máxima **D_{máx}** (Mg m⁻³), ii) humedad crítica **θ_{crítica}** (% g g⁻¹); y también se estimó iii) la susceptibilidad a la compactación (**SC**) que surge de la pendiente de la recta ascendente (“*rama seca*”) de la curva Proctor (**ΔD_{max}/Δθ**) (citado por Felt 1965 en Black 1965), esquematizados en la Figura 2.1. El valor más importante desde el punto de vista agronómico, surge del cociente entre la densidad aparente (**δ_{ap}**) tomada a campo en una situación dada, y **D_{máx}** del ensayo Proctor y se lo denomina compactación relativa **CR (%)**, como lo muestra la ecuación [2],

$$\mathbf{CR\ (\%) = (\delta_{ap} / D_{máx\ Test\ Proctor}) * 100} \quad [2]$$

Para obtener el valor de densidad aparente (**δ_{ap}**), se extrajeron 7 muestras sin disturbar de 0 a 6 cm de profundidad para cada situación utilizando el método del cilindro (Blake, Hartge 1986). Dado que las medidas de densidad aparente son altamente dependientes de las propiedades inherentes del suelo, y por ello, difíciles de comparar entre suelos se ha propuesto a las medidas de compactación relativa (C.R.%) como un parámetro apto para evaluar el estado de compactación de los suelos.

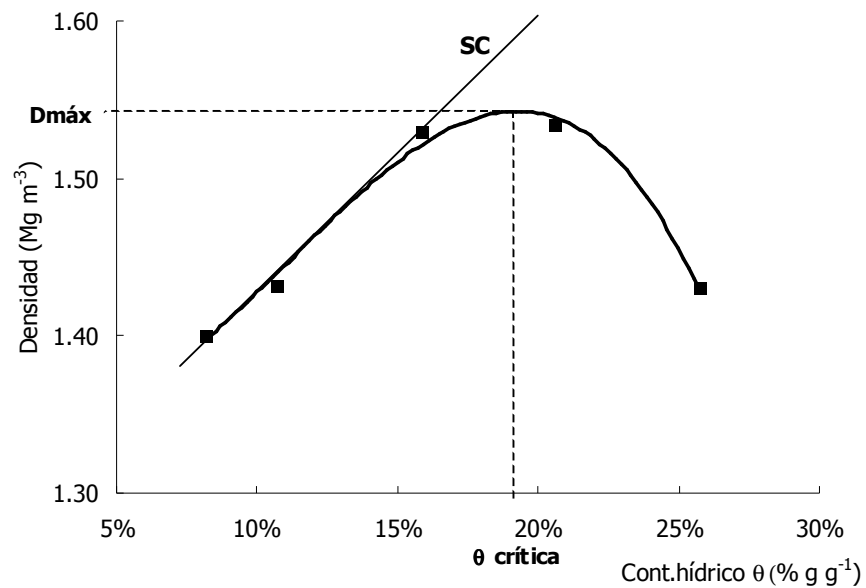


Figura 2.1. Representación gráfica de los índices de compactabilidad obtenidos con ensayos de compactación “Test Proctor”.

2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para cumplir con el segundo objetivo de este capítulo se realizó un análisis de regresión múltiple, REG Procedure – SAS System (SAS, 1999). El modelo de regresión contempló una variable respuesta (compactabilidad “Dmax”), y variables regresoras como el contenido de carbono orgánico (0 – 0.05 m y de 0.05 – 0.10 m), el contenido de arena y de limo de 0–0,10 m. Los datos usados para ingresar al modelo de regresión correspondieron al promedio de cada parámetro en cada situación siendo el n=13 para la regresión total.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Descripción de los suelos

2.5.1.1. Espesor de horizontes superficiales

Los suelos de la región pampeana fueron levantados a escala semi-detalle en las décadas del '60 y '70, por el INTA, lo cual ha sido documentado por las Cartas de Suelo a escala 1: 50.000 que llegan a diferenciar suelos a nivel de Serie. Los datos tomados en ese momento en suelos agrícolas reflejan el estado de esos suelos, previo a la acentuada agriculturización que vino en las décadas siguientes, con la irrupción del cultivo de la soja hasta entonces poco cultivado. La Tabla 2.1 muestra el espesor de los horizontes superficiales (A y BA) según las correspondientes Cartas del INTA, y el espesor actual de los horizontes observados en el campo. De ambas variables se calculó el correspondiente porcentaje de pérdida de suelo. Dicha pérdida fue elevada en todos los suelos (> 20%), llegando a valores extremos > 50% en la serie Ramallo. La presencia de formas planares de estructura, las cuales no fueron observadas en los levantamientos de décadas atrás, constituye otra evidencia de la degradación que sufrieron estos suelos. Estas agregaciones son originadas por la erosión laminar o mantiforme. De manera similar, Chagas *et al.* (1993), observaron pérdidas de 10 cm de suelo y de materia orgánica en la serie Ramallo pero sin cambios texturales.

Tabla 2.1. Espesor de los horizontes superficiales (A y AB) según las Cartas de Suelos del INTA y las observaciones hechas en el campo.

Serie de suelos	Situación	-----Espesor (cm)-----		Pérdida (%)#	Observaciones a campo
		Carta INTA	actual		
Peyrano	SDd	45	26	42	Se ven raíces en profundidad.
Peyrano	LC	45	21	53	Estructura laminar, crecimiento horizontal por poros planares.
Peyrano	SD	45	30	33	Estructura laminar, crecimiento horizontal

					por poros planares.
Ramallo	LC	40	18	55	Crecimiento horizontal de raíces a los 12 cm, pan de arcilla.
Bragado	SD	37	28	24	Muy duro, raíces en todo el perfil.

pérdida relativa del espesor actual respecto del espesor de la Carta de Suelos del INTA.

2.5.1.2. Análisis granulométrico de horizontes superficiales

En la Tabla 2.2 se observan los valores de la composición granulométrica, clasificación textural y de suelos, para las situaciones estudiadas. El rango de variación del contenido de arcilla no fue elevado ($212 - 368 \text{ g kg}^{-1}$), a diferencia del rango de limo ($121 - 678 \text{ g kg}^{-1}$) y arena ($73,4 - 667 \text{ g kg}^{-1}$). A su vez, los suelos mostraron algunas diferencias entre situaciones de manejo. Por ejemplo una disminución del contenido de arcilla de PRI a LC, con posterior atenuación de la caída bajo SD. Estos cambios sólo alcanzaron a hacer variar la clase textural de la serie Peyrano, fundamentalmente debido a la pérdida de arcilla, e incremento proporcional de la fracción limo. Este cambio textural puede ser atribuido a la influencia de la erosión hídrica, que hizo disminuir a la mitad la profundidad del horizonte A (Tabla 2.1). Similares cambios fueron observados en la región por otros autores (Barbosa *et al.*, 1999; Chagas *et al.*, 1994, Michelena *et al.*, 1988, Santanatoglia, Fernandez 1983). También, Rhoton (2000) halló en similares texturas, mayores contenidos de arcilla luego de 10 años en siembra directa continua respecto a la labranza convencional en la capa 0 – 0.25 cm.

El cambio textural observado en Peyrano puede deberse a la débil unión que presenta el limo y la arcilla en los agregados de los suelos, lo que hace que estos materiales finos sean los que se pierden de preferencia (Benito, Diaz-Fierros 1989). Una de las consecuencias del enriquecimiento proporcional en limo es una mayor tendencia de los suelos al deterioro estructural, pues los limos finos ($2 - 20 \mu\text{m}$) se caracterizan por ser muy frágiles mecánicamente (Cosentino, Pecorari 2002; Pecorari *et al.*, 1990).

Tabla 2.2 Análisis granulométrico y clasificación textural de la capa de 0-10 cm, para diferentes suelos y situaciones de manejo.

Serie de Suelo	Situación	Clasificación		Arcilla	Limo	Arena
		de suelos	textural			
Bragado	PRI	Hapludol	Fr-Arc-Ar	264,1	164,5	571,4
	LC	típico	Fr-Arc-Ar	212,0	121,0	667,0
	SD		Fr-Arc-Ar	253,4	197,1	549,5
Ramallo	PRI	Argiudol	Fr-Arc-Lim	364,6	501,2	134,2
	LC	vértico	Fr-Arc-Lim	335,0	531,1	133,9
	SD		Fr-Arc-Lim	344,3	538,7	117,0
Peyrano	PRI	Argiudol	Fr-Arc-Lim	323,3	541,3	135,4
	LC	típico	Fr-Limoso	247,9	678,7	73,4
	SD		Fr-Limoso	267,6	619,3	113,1
	SDd		Fr-Limoso	237,6	657,9	104,5
Yeruá	PRI	Vertisol	Fr-Arc-Lim	368,0	482,0	149,0
	LC		Fr-Arc-Lim	336,0	574,0	80,0
	SD		Fr-Arc-Lim	321,0	565,0	114,0

2.5.2. Carbono orgánico y estabilidad estructural

Los valores de carbono orgánico total (COT) variaron ampliamente entre suelos, situaciones y profundidades con un mínimo de 8,97 g kg⁻¹ en Bragado, LC y un máximo de 35,52 g kg⁻¹ en Yeruá, PRI. En términos generales, los suelos de situaciones prístinas presentaron niveles de COT significativamente más altos ($P < 0.05$) que las situaciones laboreadas. Estas diferencias fueron evidentes en Bragado, Peyrano y Yeruá, en la capa 0 – 5 cm debido a la estratificación superficial de COT en el suelo original (Figura 2.2. a, b y d). En el suelo de Ramallo el desnivel entre situaciones fue de menor magnitud (Figura 2.2. c), ya que aquí, la situación no cultivada fue una pastura pastoreada, y no un parque de

estancia como en los otros. Probablemente, esta pastura pudo haber sufrido pérdidas previas de carbono en décadas anteriores por roturación. Quizás por esta causa, sólo en este suelo los resultados muestran similares contenidos de COT en PRI y SD.

Los sistemas de SD continua tienden a acumular a largo plazo C orgánico en las capas superiores (0-5 cm) (Arshad *et al.*, 1999; Franzluebbbers *et al.*, 1995; Rhoton 2000). Pese a ello, en ningún suelo (excepto el caso de Ramallo) se llegó a recuperar los niveles originales de carbono bajo siembra directa continua. La estratificación de COT bajo SD pareció depender de los años bajo SD continua. Precisamente, mostraron mayor estratificación la serie Ramallo de 11 años de SD y Peyrano de 9 años de SD. Alvarez y Alvarez (2000) hallaron similares resultados en suelos de la serie Pergamino. En contraposición, 6 y 4 años de siembra directa continua respectivamente fueron insuficientes para permitir una recuperación total del COT en Bragado y Yerúa. Merece especial atención en Peyrano la situación SDd, ya que presentó valores de COT muy por debajo de la situación LC. Esto se debió a la historia agrícola previa con > 100 años de agricultura continua ocupada por colonos.

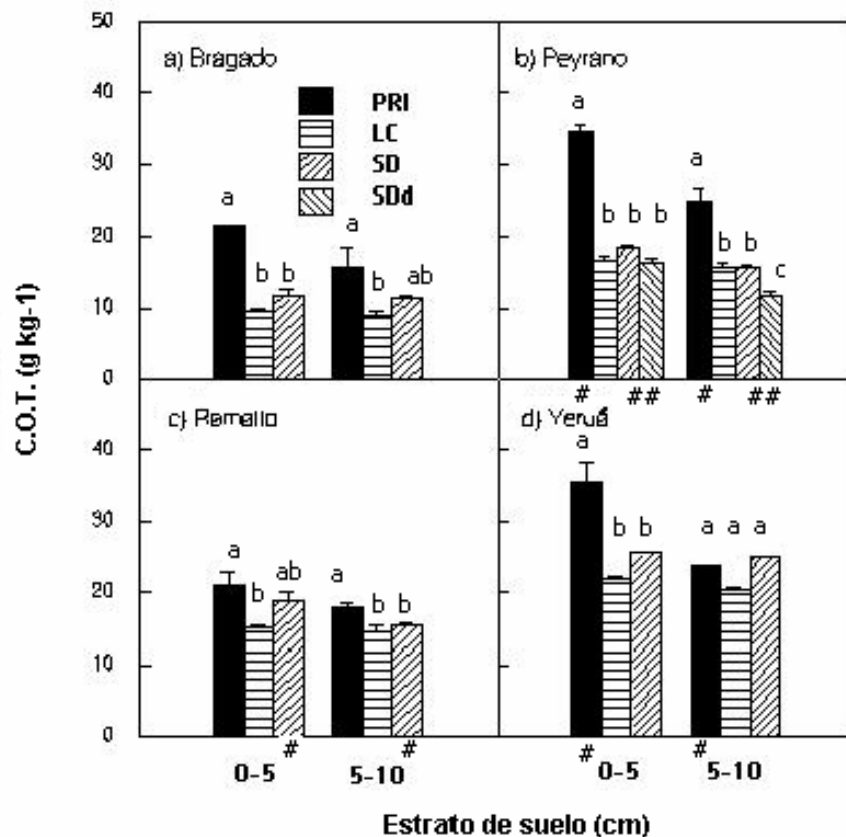


Figura 2.2. Contenido de carbono orgánico total (g kg^{-1}) a dos profundidades (0-5 cm y 5-10 cm), para diferentes situaciones y serie de suelos. Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre las situaciones. El asterisco indica diferencias significativas ($P < 0,05$) entre profundidades. Las barras indican la dispersión de las medias dada por el error estándar de la media.

La estabilidad estructural, medida por el cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP en mm), varió ampliamente entre suelos. La mayor inestabilidad (3,363 mm) fue hallada en Ramallo, LC, y la menor (0,327 mm) en Bragado, PRI. La estabilidad siguió similar patrón de variación que COT. Los valores de CDMP fueron generalmente más altos en las situaciones LC, seguido por SD y PRI (Tabla 2.3). La pérdida de estabilidad estructural en LC estuvo asociada en parte a la pérdida del carbono orgánico (Figura 2.2.). Ello se relaciona con la remoción por las labranzas y el uso intensivo de los cultivos y se asocia con

la destrucción de macroagregados ($> 250 \mu\text{m}$) (Tisdall, Oades, 1982; Elliot 1986). En los suelos limosos (Peyrano y Ramallo), hubo recuperación total de los valores originales de estabilidad hallados en las situaciones PRI. En el caso de Ramallo, ello se debió a la inicialmente baja estabilidad estructural del PRI. En Peyrano nueve años con SD continua, fueron suficientes para recuperar la estabilidad, mientras que no lo fueron para la situación más degradada (SDd), cuyos valores fueron aún inferiores a LC. En Yeruá, a pesar de detectarse diferencias significativas ($P < 0,05$) en carbono, no se encontró diferencias en estabilidad. Ello puede atribuirse en parte a la metodología utilizada. En este sentido, Wilson et al. (2000) indicaron que el pretratamiento en benceno respecto del de agua fue el parámetro más sensible a los cambios originados por el uso y el manejo.

Tabla 2.3. Estabilidad de agregados en la capa superficial 0-10cm (CDMP en mm), para diferentes series de suelo y situaciones de manejo.

Serie de Suelo	CDMP (mm)			
	PRI	LC	SD	SDd
Bragado	0,327c	2,477a	0,950b	
Ramallo	2,267ab	3,363a	2,050b	
Peyrano	0,348c	0,739b	0,342c	1,370a
Yeruá	0,454a	0,427a	0,503a	

Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre situaciones de manejo.

Los índices de estabilidad, referidos a las situaciones PRI, tuvieron disímil comportamiento entre suelos (Tabla 2.4). Así en Bragado, los IE fueron muy bajos tanto en LC como en SD, evidenciando una baja recuperación estructural. No sucedió lo mismo en Peyrano y Ramallo, ambos Argiudoles limosos, en los cuales se observó una rápida recuperación de la estabilidad bajo SD, desde los bajos

niveles observados bajo LC. A diferencia de COT, que está compuesto en su mayor parte por fracciones humificadas complejas y con lento tiempo de ciclado, la estabilidad estructural depende de compuestos lábiles de carbono orgánico que ciclan en lapsos más cortos (Degens 1997). Una especial consideración merece el caso del suelo de Yeruá, el cual mostró altos valores de IE tanto bajo LC como en SD. En estos suelos con arcillas expansibles (vertisoles), la estabilidad de sus agregados depende más de caracteres mineralógicos que del manejo (Oades 1993). En este tipo de suelo debería ser relativizado el significado de los cambios en estabilidad estructural.

Tabla 2.4. Índice de estabilidad porcentual (I.E %) respecto de la situación prístina en la capa superficial 0-10 cm, para diferentes series de suelo y situaciones de manejo.

Serie de Suelo	I. E. (%)		
	LC	SD	SDd
Bragado	13,20	34,42	
Ramallo	67,41	110,58	
Peyrano	47,12	101,69	25,33
Yeruá	106,3	90,28	

2.5.3. Estado de compactación

En la Tabla 2.5. se hallan los valores críticos de compactibilidad de los suelos: la densidad máxima ($D_{m\acute{a}x}$) y la humedad crítica (θ_c); y además la susceptibilidad a la compactación (SC) para todas las series estudiadas y situaciones de manejo. El rango de valores de $D_{m\acute{a}x}$ fue estrecho (1,34 - 1,56 g cm^{-3}) no así el rango de humedad crítica θ_c (0,17 - 0,32 g g^{-1}). La situación LC presentó, en todos los casos, los mayores valores de $D_{m\acute{a}x}$ y bajos valores de θ_c .

La susceptibilidad a la compactación (SC), tuvo un comportamiento más errático, pero en general, las situaciones con LC presentaron los valores más elevados de SC. Las situaciones bajo LC y con niveles bajos de COT presentaron mayor compactibilidad respecto de las situaciones bajo SD y Pri y con altos niveles de COT (Figura 2.2).

Tabla 2.5. Valores de densidad máxima ($D_{m\acute{a}x}$), humedad crítica (θ_c) y susceptibilidad a la compactación (SC) de la capa superficial 0-10 cm de para diferentes series de suelo y situaciones de manejo.

Serie de Suelo	Parámetro	Unidades	PRI	LC	SD	SDd
Bragado	$D_{m\acute{a}x}$	$Mg\ m^{-3}$	1,39	1,54	1,49	
	θ_c	$g\ g^{-1}$	0,24	0,19	0,20	
	SC		0,60	1,13	1,17	
Ramallo	$D_{m\acute{a}x}$	$Mg\ m^{-3}$	1,42	1,56	1,40	
	θ_c	$g\ g^{-1}$	0,26	0,17	0,29	
	SC		0,53	1,39	0,74	
Peyrano	$D_{m\acute{a}x}$	$Mg\ m^{-3}$	1,36	1,46	1,35	1,42
	θ_c	$g\ g^{-1}$	0,27	0,25	0,27	0,27
	SC		1,14	0,87	0,49	0,82
Yerúa	$D_{m\acute{a}x}$	$Mg\ m^{-3}$	1,34	1,48	1,34	
	θ_c	$g\ g^{-1}$	0,27	0,23	0,32	
	SC		1,03	1,81	0,98	

Los valores de densidad obtenidos durante muestreo a campo se hallan en la Tabla 2.6. Bragado presentó en promedio los mayores valores ($\delta_{ap} > 1,20\ Mg\ m^{-3}$), Ramallo y Peyrano con valores intermedios ($\delta_{ap} 1,1\ Mg\ m^{-3}$), y los menores valores correspondieron a Yerúa ($\delta_{ap} < 0,85\ Mg\ m^{-3}$). Los resultados muestran un incremento significativo ($P > 0,05$) en densidad aparente al pasar de LC a SD en Ramallo. En Bragado y Peyrano no hubo diferencias significativas entre las situaciones de manejo (excepto el Pri en Peyrano). Estos valores no indican el grado de compactación presente en el suelo. Los parámetros usados para caracterizar la compactibilidad del suelo tienen una implicancia agronómica

directa, pues están íntimamente relacionados con la textura de los suelos y la materia orgánica (Gupta, Allmaras 1987). La compactación relativa (CR%), se relaciona con la macroporosidad y el rendimiento relativo de los cultivos (Carter 1987), haciendo así comparables entre suelos las medidas de densidad aparente (Eriksson *et al.*, 1974; Hakansson 1988). El rango de valores de CR% para cada serie y situación bajo estudio varió entre 60,15% y 83,69% (Tabla 2.7.). Como puede observarse, no mostró valores superiores al umbral de 90%, propuesto por Carter (1990 b) para el crecimiento de los cultivos. Estos resultados coinciden con los valores hallados anteriormente por Taboada *et al.* (1998) en los mismos suelos. Pese a los mayores valores de $D_{m\acute{a}x}$, CR% fue menor en las situaciones bajo LC, debido a los bajos valores de densidad aparente hallados, generalmente, en estas situaciones.

Tabla 2.6. Densidad aparente (δ_{ap}) en la capa superficial 0-6 cm, para diferentes suelos y situaciones de manejo

Suelo de Suelo	δ_{ap} (Mg m ⁻³)			
	PRI	LC	SD	SDd
Bragado	1,16a	1,21a	1,21a	
Ramallo	1,09ab	0,99b	1,16a	
Peyrano	0,92b	1,29a	1,16a	1,09a
Yeruá	0,81b	0,97a	0,81b	

Letras distintas indican diferencias significativas entre situaciones de manejo (P < 0,05).

Tabla 2.7. Compactación relativa (CR%) en la capa superficial 0-10cm, para diferentes suelos y situaciones de manejo.

Suelo de Suelo	CR (%)			
	PRI	LC	SD	SDd
Bragado	83	78	81	
Ramallo	77	63	83	
Peyrano	68	77	86	77
Yeruá	60	66	61	

2.5.4. Relación entre la compactibilidad , la textura y el carbono orgánico

Se sabe que uno de los factores de mayor peso que afecta a los procesos de compactación es la materia orgánica. En este sentido existe abundante cuerpo de información que lo avala (Gupta y Allmaras 1987 Carter 1990 a y b; Soane *et al.*, 1996; Thomas *et al.*, 1996). Se ajustaron modelos de regresión múltiple para estimar la compactibilidad de los suelos para todas las situaciones. Previo a la selección del modelo de compactibilidad, se corrió un modelo completo, en donde se incluyó a las siguientes variables: arena, limo, arcilla, COT₀₋₅ y COT₅₋₁₀. Se detectaron severos problemas con las variables, debido a la existencia de multicolinealidad. En base a estos inconvenientes se corrieron modelos simples de regresión, resumidos en la Tabla 2.8. El modelo con mayor ajuste fue el cuadrático (*Modelo 1*), que contempló únicamente al carbono orgánico de 0-0,05 m y su potencia, como explicativo de la compactibilidad de los suelos (D_{máx}). Estos resultados difieren con los hallados por Quiroga *et al.* (1999) y Díaz Zorita, Grosso (2000) en suelos de la región Pampa Semiárida y Región Pampa Ondulada respectivamente. Estos autores incluyeron al contenido de arena y carbono orgánico en los modelos de compactación, como principales variables.

Tabla 2.8. Modelos de regresión y variables regresoras intervinientes, que estimaron la compactibilidad de los suelos (D_{máx}).

Selección de modelos	r^2	Variables regresoras	P#
1 .D _{máx} =C.O.T _(0-0,05) , C.O.T _(0-0,05) ²	0.71	COT _(0-0,05) ² COT _(0-0,05)	0.0084 0.053
2. D _{máx} =arena, C.O.T (0-0,05)	0.63	contenido de arena COT _(0-0,05)	0.45 0.003
3 .D _{máx} =limo, C.O.T (0-0,05)	0.63	contenido de limo	0.39

En la Figura 2.3 se muestra la relación entre la compactibilidad y el carbono orgánico, obtenida con el Modelo 1, de mayor ajuste. La relación encontrada para el rango de texturas y COT analizados, fue no lineal o cuadrática. Por otro lado, Thomas *et al.* (1996) encontraron para suelos limosos de Kentucky una relación lineal con el contenido de carbono orgánico (%) de 0-5 cm. En Argentina, Díaz-Zorita, Grosso (2000) también hallaron una relación lineal con el carbono orgánico total (0-20 cm) y la compactibilidad en un amplio rango de texturas de suelos pampeanos. En la Figura 2.3. se señalaron los valores mínimo y máximo de $D_{m\acute{a}x}$ y COT alcanzados en los suelos bajo estudio, con un mínimo en $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$ y 35 g kg^{-1} de COT y un máximo de $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$ y $8,97 \text{ g kg}^{-1}$ de COT. Aragón *et al.* (2000) hallaron para suelos del sudoeste de Buenos Aires con más materia orgánica, un mínimo de $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$ y 62 g kg^{-1} de COT.

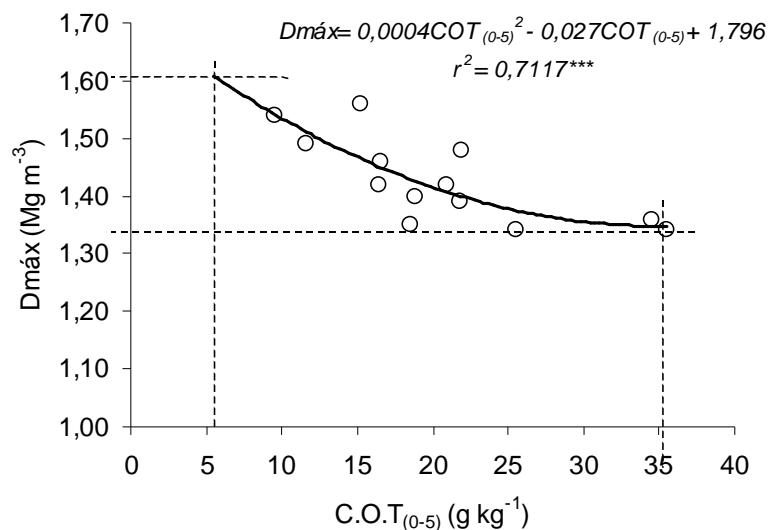


Figura 2.3. Relación entre el carbono orgánico de 0 – 0,05 m (COT₀₋₅) y la compactibilidad (D_{máx}) para el área de estudio. Las líneas punteadas horizontales indicarían el máximo y mínimo valor de compactibilidad estimado en relación a los niveles de materia orgánica para el área bajo estudio (n=13).

2.6. CONCLUSIONES

El estado de degradación y compactibilidad alcanzado en las situaciones bajo LC respecto de la situación original o prístina, respondió a un comportamiento *típico o esperado*, según surge de los antecedentes existentes en el mundo y en nuestro país. Esto quedó demostrado en mayor o menor medida, de acuerdo a la textura, por las típicas disminuciones del carbono orgánico y estabilidad estructural y aumentos de la compactibilidad ocurridas en la capa arable.

Se había hipotetizado un diferente grado de recuperación bajo SD continua, de acuerdo con la textura de los suelos. Esta hipótesis no fue verificada. En primer lugar, de todos los parámetros estudiados, sólo la estabilidad estructural mostró en algunos de los suelos (Ramallo y Peyrano) una recuperación total, igualando los valores originales en PRI, mientras que los valores de carbono total mostraron sólo leves incrementos de LC a SD.

Con respecto a los problemas de compactación que, supuestamente, se generan bajo SD continua, ellos no fueron verificados, excepto en el caso de

ramallo en el cual hubo aumentos significativos de densidad aparente de LC a SD. Sin embargo, los valores de CR% no superaron en ningún caso los umbrales críticos.

El diferente grado de variación observado en la recuperación pareció responder a un conjunto de variables no sometidas aquí a estudio. Por ejemplo, los años bajo siembra directa continua y el nivel original de degradación.

Uno de los parámetros más sensibles a los diferentes sistemas de manejo fue el índice de compactibilidad (d_{max} en test Proctor), el cual se fue relacionado en un modelo ajustado con el contenido de carbono total de los suelos. Este modelo se diferenció de otros modelos lineales propuestos por otros autores que trabajaron con otros suelos pampeanos.

CAPÍTULO 3

APTITUD DE LA SIEMBRA DIRECTA CONTINUA PARA LA CONDUCCIÓN DEL AGUA

3.1. INTRODUCCIÓN

Las labranzas tienen un efecto significativo sobre el movimiento y el almacenamiento de agua del suelo. Ello se debe, principalmente, a los cambios esperados en la porosidad y en la distribución de tamaños de poros del suelo (Klute, 1985). En suelos labreados, la infiltración del agua es altamente dependiente de los cambios temporales de las propiedades hidráulicas, pudiéndose hallar importantes variaciones de corto plazo, típicamente luego de una labor. Por el contrario en suelos no labreados, como es el caso de la siembra directa, la creación de macroporos depende exclusivamente de factores naturales (Gibbs, Reid 1988). El flujo de agua a través del suelo puede ser saturado (poros con agua), o insaturado (poros con aire). El flujo saturado ocurre a potenciales positivos, y está relacionado con la entrada de agua al perfil durante o inmediatamente posterior después de una lluvia y/o riego. Esta entrada de agua ocurre por todos los poros del suelo, teniendo un papel preponderante los macroporos. En general las mediciones se caracterizan por su alta variabilidad. atribuidas a los canales de lombrices (Miller *et al.*, 1998; 1999; VandenBygaart *et al.*, 1999). El flujo insaturado, ocurre a potenciales agua negativos y tiene lugar a través de poros entre 50-1000 μm , siendo frecuente encontrar valores elevados en suelos bajo labranza convencional. Ello se atribuye a la acción mecánica de las labranzas (Miller *et al.*, 1999; Shipitalo, Protz, 1987).

Un tercer tipo de flujo es el llamado en by-pass o preferencial, y ocurre a través de poros $> 500 \mu\text{m}$, que son creados por lombrices y canales de raíces (Bouma, 1993; Ehlers, 1975). Los poros (“canales”) creados por las lombrices y raíces son continuos, y preponderantemente tienen una orientación vertical (Lal 1976). En SD, al no haber remoción, los bioporos permanecen de un año a otro, habiendo una mayor probabilidad de que el flujo ocurra en by-pass (Edwards, Softy 1978; Kladivko *et al.*, 1986).

El movimiento de agua a flujo no saturado depende principalmente del gradiente de potencial agua del suelo. A potenciales “cercanos a cero”, el flujo es mayor debido a que el agua circula por poros de gran tamaño (poros $> 500 \mu\text{m}$), y en la medida que el potencial desciende, el flujo se hace más lento y ocurre por poros pequeños (poros $< 500 \mu\text{m}$). Una gran parte de los suelos agrícolas de la región pampeana suelen permanecer a potenciales negativos gran parte del año, cobrando importancia el estudio de del flujo insaturado (I_{insat}).

En los últimos años se han desarrollado y propuesto varias metodologías de campo, como son los permeámetros de disco (White, Perroux, 1989). Estos aparatos permiten medir al mismo tiempo la conductividad hidráulica, la sorptividad y la porosidad responsable del flujo de agua a diferentes potenciales mátricos. De esta manera es posible cuantificar los flujos de infiltración saturado (I_{sat}) y no saturado (I_{insat}), así como también el tamaño medio de los poros que caracterizan a dichos flujos (λ_m). La diferencia entre I_{sat} e I_{insat} representa el flujo de agua en “by pass” o por pasos preferenciales ($I_{\text{by-pass}}$). Resulta de fundamental importancia conocer el movimiento de agua a través de estos “canales verticales y

abiertos a la superficie”, ya que contribuyen al drenaje rápido del agua y solutos a través del subsuelo.

3.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Se puso a prueba la siguiente hipótesis:

Dado su distinta textura y macroporosidad, los suelos pampeanos responden en forma diferente en sus propiedades hidráulicas bajo LC y SD. En relación a SD se predijo que;

- En los Argiudoles de baja macroporosidad, no son esperables aumentos importantes en el volumen total de poros, pero si en flujo en by pass.
- En los Hapludoles, la existencia de mayor macroporosidad determina que los efectos generados por los cambios de manejo sean menos perceptibles.

En relación a LC se predijo que;

En suelos removidos por labranza convencional, se generan poros de menor tamaño ($< 500 \mu\text{m}$), lo cual determina una mayor importancia relativa de los flujos de agua insaturados.

En base a las hipótesis planteadas se propusieron los siguientes objetivos:

- I. Cuantificar a campo los flujos saturados, no saturados y by-pass de suelos con diferentes texturas bajo diferentes situaciones de manejo; siendo necesario la calibración de una metodología relativamente novedosa, como los permeámetros de disco.

II. Determinar en laboratorio el volumen y la distribución de tamaños de poros que caracterizaron a dichos flujos.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Distribución de tamaños de poro en laboratorio

Con el objetivo de cuantificar la cantidad y el tamaño de poros responsables de los flujos de infiltración y del crecimiento de las raíces y la aireación del suelo, se tomaron aleatoriamente para cada situación, 3 muestras no disturbadas a dos profundidades (0-5 y 5-10 cm) en cilindros de PVC de 10 cm de diámetro. Se determinó la distribución del tamaño de poros en la mesa de tensión según Danielson y Shuterland, 1986. El continuum de tamaños de poros determinado fue expresado en porcentaje (v/v) de poros respecto al volumen del suelo y fueron clasificados para su mejor comprensión en tres rangos de tamaños: macroporos $> 100 \mu\text{m}$, poros entre 100 y $50 \mu\text{m}$ (macroporos pequeños), y poros de $50 - 20 \mu\text{m}$ (mesoporos) de acuerdo al diámetro cilíndrico equivalente (DCE). Estos rangos de poros son responsables de los procesos de aireación y drenaje rápido, pero particularmente los poros $> 100 \mu\text{m}$ constituyen los lugares donde crecen las raíces de los cereales (Gibbs, Reid 1988; Hamblin, 1985).

3.3.2. Flujos de infiltración con permeámetro de disco

3.3.2.1. Consideraciones teóricas del proceso de infiltración

Cuando una fuente de agua, como el permeámetro de disco, es puesta en contacto con la superficie del suelo se produce un flujo de agua dominado por las fuerzas capilares (S_o), dependiente del contenido de humedad inicial del suelo. A medida que el tiempo transcurre, tanto el tamaño de la fuente como la fuerza de gravedad alteran el comportamiento del flujo, que pasa a ser unidimensional (I) y dependiendo de cada tipo de suelo, se requerirá un cierto tiempo a partir del cual dicho flujo se mantiene constante con el tiempo. Esta tasa de infiltración depende de la capilaridad, la gravedad, del tamaño del disco y el potencial con que el agua se suministra en la superficie del suelo.

Mediante el uso del permeámetro de disco es posible medir el valor de los flujos en los estadios tempranos y finales. Para ello, es necesario que se cumplan ciertas reglas teóricas. En este sentido la “Infiltración acumulada” debe ser según se indica a continuación:

- (a) lineal con la raíz cuadrada del tiempo en los primeros estadios, cuya pendiente es la sorptividad (**So en $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1/2}$**).
- (b) lineal con el tiempo en los estadios finales del proceso de infiltración, cuya pendiente es la tasa a flujo constante (**I en $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$**).

En la Figura 3.1 se muestra la Infiltración acumulada en mm, en función del tiempo (a) y en función de la raíz cuadrada del tiempo (b), con sus respectivas pendientes.

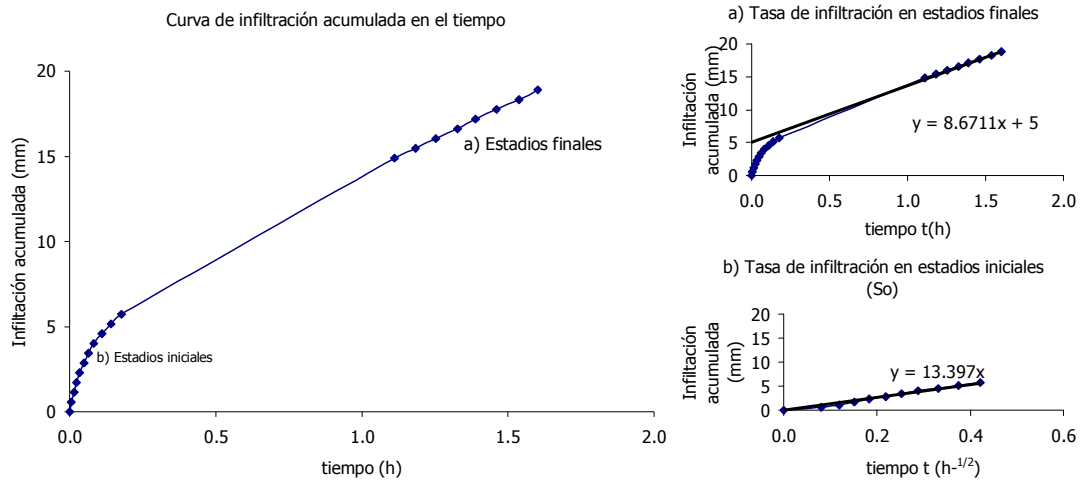


Figura 3.1. Cálculo de la Infiltración acumulada (I_{sat}/i_{nsat}) y la sorptividad (S_o), correspondiente a mediciones *in situ* con permeámetro de disco.

3.3.2.2. Descripción del permeámetro de disco

Los permeámetros de disco utilizados, constan de un tubo graduado de acrílico que suministra agua o reservorio y un tubo pequeño que permite seleccionar el potencial de la medición. Ambos tubos están unidos a un disco o placa de acrílico de 200 mm de diámetro (Perroux, White, 1988) (Figura 3.2).

En el permémetro para mediciones insaturadas (Figura 3.2 a) el tubo pequeño llamado también “torre de burbujeo” está dotado con un tubo interno que permite la entrada de aire y así, seleccionar el potencial agua que se suministra a la superficie del suelo. Los dos tubos de acrílico están unidos entre sí por un tubo en la parte inferior del disco que produce el tránsito del aire desde la torre de burbujeo al reservorio de agua. El agua del reservorio toma contacto con los poros del suelo a través de la placa porosa que se apoya sobre una delgada capa de arena

fina. Uno de los mayores cuidados en la operación del equipo, es conseguir un íntimo contacto de la membrana porosa con los poros del suelo y la capa de arena evitando así la entrada de aire del exterior. El lograr esto último, especialmente a tensiones negativas, es generalmente complicado.

En el permeámetro para mediciones a saturación (Fig 3.2 b) el tubo pequeño contiene el volumen de agua equivalente a la carga hidráulica que tendrá el suelo durante la medición. Los dos tubos, el reservorio y el de selección de potencial están unidos a una placa de acrílico que durante las mediciones se coloca sobre un cilindro metálico fijado al suelo. Además el perímetro externo del cilindro metálico debe estar cuidadosamente sellado con arcilla para evitar pérdidas laterales de agua.

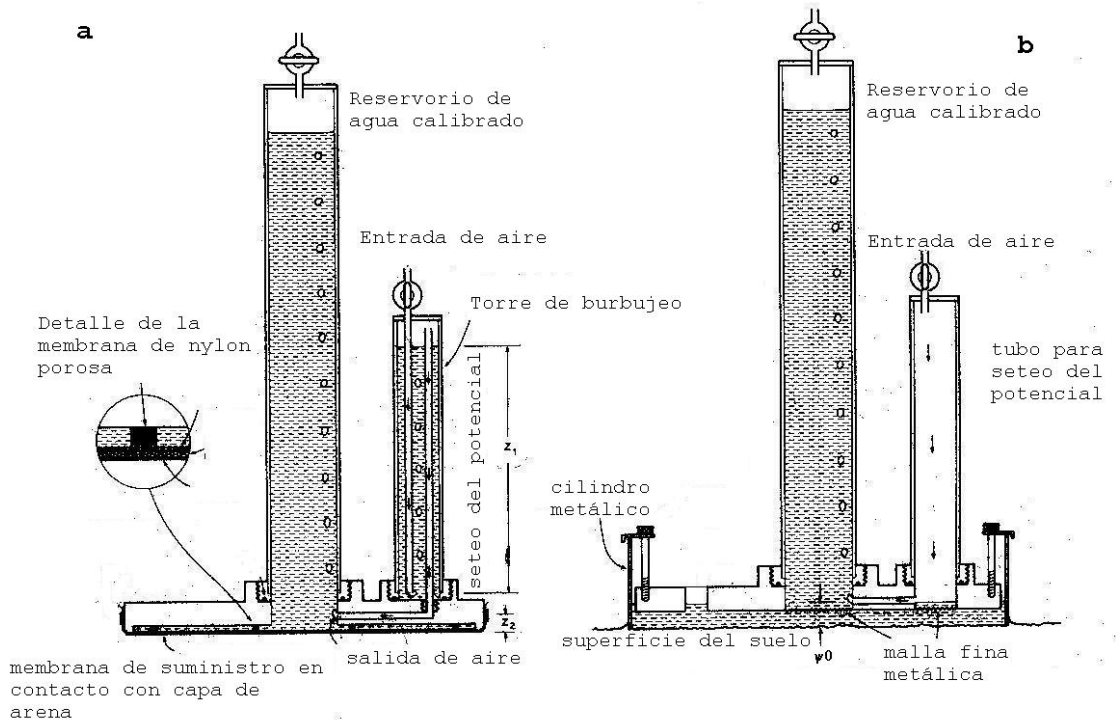


Figura 3.2. Esquema del permeámetro de disco para mediciones de propiedades hidráulicas en condiciones de instauración (a), y de saturación (b) (Perroux, White, 1988).

3.3.2.3. Determinaciones

Se realizaron tres mediciones con el permeámetro de disco (Perroux y White, 1988) en cada situación de manejo. Ello se hizo a dos potenciales agua: a) $\psi=+10$ mm, y b) $\psi= - 60$ mm. De esta manera fue posible determinar a) el flujo saturado o total (I_{sat}), que toma en cuenta todos los poros del suelo; y b) el flujo insaturado (I_{insat}), que involucra sólo a los poros menores a $500\mu\text{m}$. Un tercer flujo fue estimado indirectamente a través de la diferencia entre ambos flujos: c) flujo “by-pass” ($I_{sat} - I_{insat}$) y que toma en cuenta sólo a los macroporos mayores a $500 \mu\text{m}$.

Con los datos de campo se graficó la infiltración acumulada en el tiempo y mediante regresión se calculó tanto la sorptividad S_o ($\text{mm h}^{-1/2}$) que surge de las mediciones iniciales como la tasa de infiltración a flujo constante I_{sat} o I_{insat} ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), cuya fundamentación se detalló en el punto 3.3.1.1. y en la Figura 3.1.

El tamaño medio de poro responsable del flujo by-pass ($\lambda_{m_{by-pass}}$) se estimó usando la ecuación [1] de White y Sully (1987),

$$\lambda_{m_{by-pass}} = \sigma [(S_o + I_{so})^2 - 1] / 2b\rho g\Delta\psi, \quad [1]$$

donde σ es la tensión superficial de la interfase aire/agua, ρ es la densidad del agua, y g es la aceleración de la gravedad, $\theta_0 - \theta_n$ es la diferencia de humedad volumétrica al final y el inicio de la medición, y $\Delta\psi$ es la diferencia entre los dos potenciales seleccionados.

Tabla 3.1. Propiedades hidráulicas medidas con permeámetros de disco.

Potencial agua(mm)	Tipo de flujo	Tamaño poro λ_m (μm)	Efecto principal	Parámetros
$\psi = + 10$	saturado	todos	tamaño y forma de poros totales	I_{sat}, S_o
$\psi = - 60$	no saturado	< de 500	matriz del suelo	$I_{insat}, S_o,$
$\psi \Delta$	by - pass	> de 500	tamaño y forma de los macroporos	$I_{sat} - I_{insat}$ ($I_{by-pass}$)

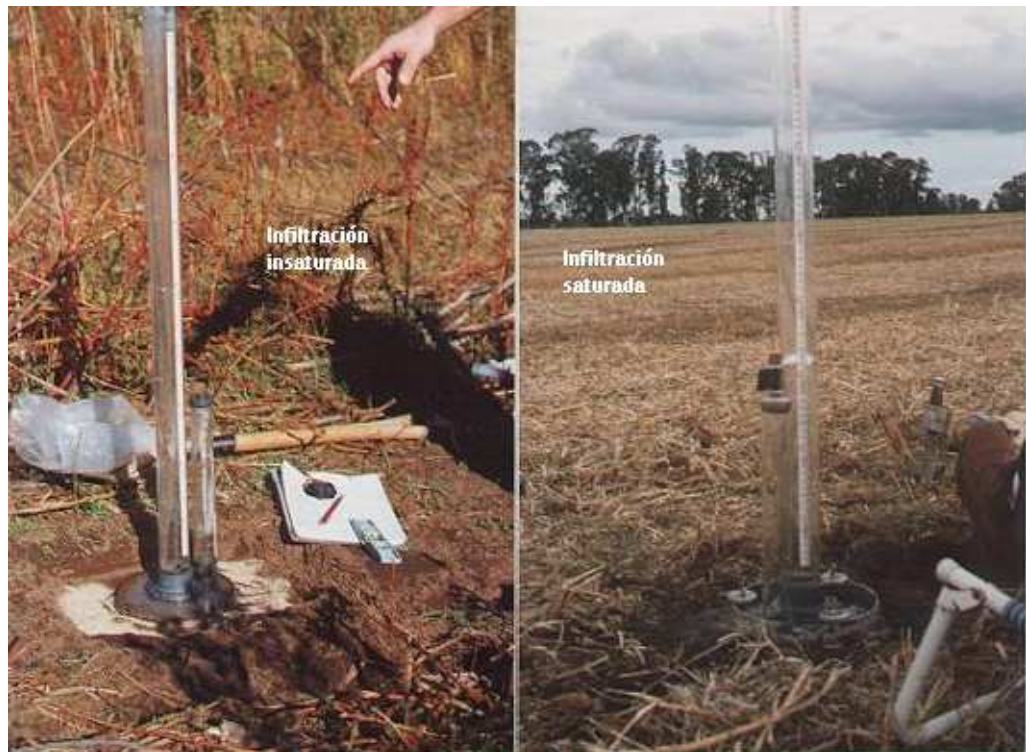


Figura 3.3. Permeámetros de disco saturado e insaturado instalado en el campo.

3.4. Análisis estadístico

Los promedios de los valores de distribución de tamaños de poros (DTP en μm) fueron puestos a prueba con dos niveles de significancia: $P < 0,05$ y $P < 0,1$ con el objetivo de detectar diferencias atribuibles a las distintas situaciones de manejo.

Debido a la gran variabilidad que presentaron los parámetros medidos (I_{sat} , I_{insat} e $I_{\text{by-pass}}$) y al bajo número de repeticiones tomadas no fue posible realizar un ANOVA. Los resultados fueron analizados a través de la dispersión de las medias dadas por el error estándar.

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Distribución de tamaños de poro en laboratorio

A pesar de su diferente textura, todos los suelos tuvieron los poros distribuidos hacia las clases más pequeñas ($> 100 \mu\text{m}$ $< 100 - 50 \mu\text{m}$ $< 50 - 20 \mu\text{m}$) (Figura 3.4). Sin embargo en general, bajo LC mostraron siempre mayor volumen de macroporos pequeños y mesoporos y fue significativo ($P < 0,05$), únicamente en la serie Bragado para la clase poral $50-20\mu\text{m}$ a las dos profundidades. No se hallaron diferencias significativas ($P < 0,05$) en los macroporos mayores (>100 y $100-50 \mu\text{m}$). Hubo diferencias menos significativas ($P < 0,1$) en la clase de poros entre $100-50 \mu\text{m}$ tanto en Bragado como en Ramallo a favor de LC en la capa de 0-5 cm. También hubo diferencias significativas ($P < 0,1$) en Peyrano a favor de LC. Schoonderbeek, Schoute (1994) también hallaron mayor cantidad de macroporos bajo LC, debido a la presencia de grietas con orientación horizontal, originadas por la compactación por tráfico de maquinarias. Este factor pudo indudablemente incidir en nuestro estudio, pero las determinaciones realizadas no permiten controlar este factor.

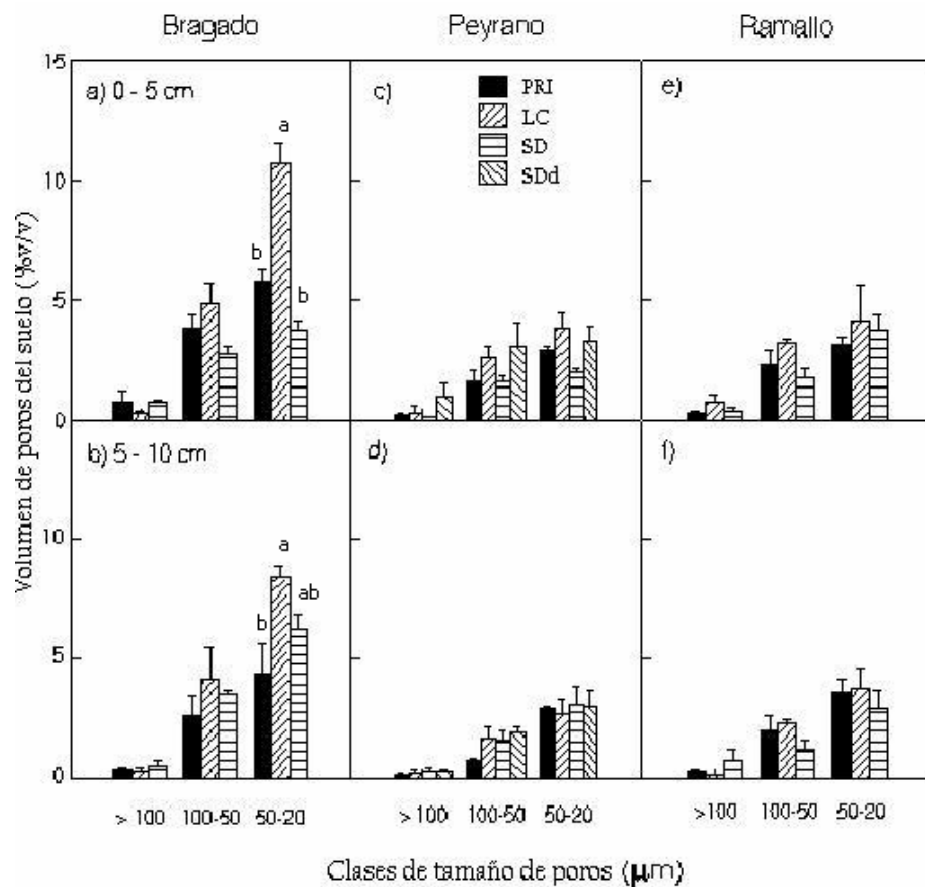


Figura 3.4. Distribución de tamaño de poros en Bragado, Ramallo y Peyrano para la capa de 0-5 cm a), c) y e) y para la capa de 5-10 cm b), d) y f), respectivamente bajo distintas situaciones de manejo. Se incluyen letras donde hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) entre situaciones.

3.5.2. Flujos de infiltración

Se presentan aquí los resultados de los flujos: saturado (I_{sat}), no saturado (I_{insat}) y su diferencia, que representa el flujo en “by pass” ($I_{by-pass}$). Las determinaciones fueron completas en los suelos de Bragado y Ramallo, para los cuales se presenta también el tamaño medio de poro responsable de $I_{by-pass}$, y la proporción de los diferentes flujos. En el suelo vertisólico de Yerúa, en cambio, la gran cantidad de

grietas impidió obtener medidas confiables de flujo saturado (variabilidad > 60 %), por lo que únicamente se determinó el flujo no saturado.

3.5.2.1. Flujo saturado

En general las mediciones de flujo saturado se caracterizaron por su alta variabilidad. Miller *et al.* (1998) encontraron que dicha variabilidad se atribuyen a los canales de lombrices.

El flujo saturado varió debido al manejo y los distintos suelos (Figura 3.5). En el suelo de Bragado, el flujo fue menor en LC que en PRI, mientras que hubo una parcial recuperación en SD. Es destacable la coincidencia de estas variaciones, con las halladas en los macroporos mayores (Figura 3.4 a y b). El suelo de Ramallo mostró, en cambio un comportamiento distinto. La situación SD mostró los valores más bajos de flujo saturado. Dicho flujo fue más alto en LC, y algo menor en PRI. Varios años con SD continua no causaron ninguna mejora en los flujos de agua que entran a este suelo.

En el suelo de Peyrano, al momento de las mediciones el suelo se encontraba muy húmedo, por lo que sólo pudo medirse el flujo saturado. En este suelo, al igual que en Bragado, también se hallaron valores de flujo saturado más altos en SD que en LC, a pesar del elevado contenido de humedad del suelo. Si bien no fue posible determinar el flujo en by-pass, los elevados valores del flujo saturado y su gran variabilidad (dada por el error estándar) permiten inferir la existencia de flujos en by-pass. Ello concuerda con lo hallado por otros autores (Edwards, Softy 1978; Kladivko *et al.*, 1986).

Como se recuerda, se estudió aquí una situación degradada bajo SD (SDd).

Esta situación mostró valores de flujo menores que SD, pero más altos que LC.

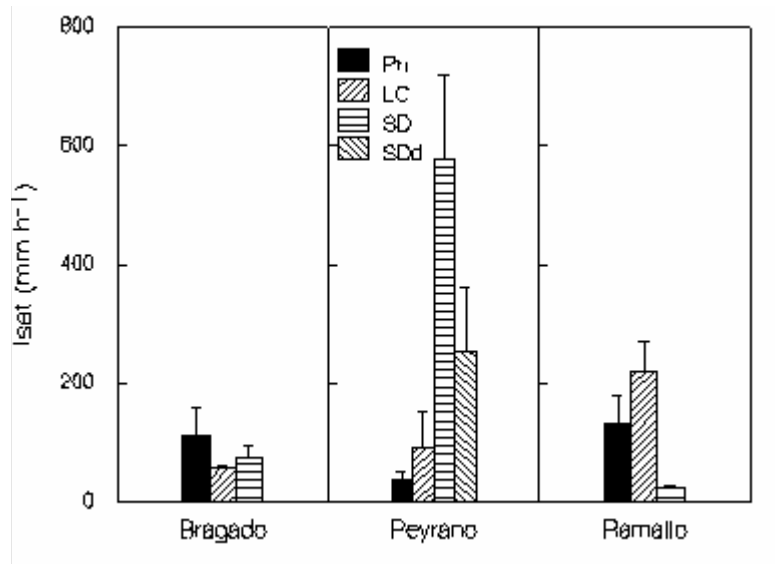


Figura 3.5. Flujo de infiltración saturada (I_{sat}) medido con permeámetro de disco en tres suelos pampeanos y para diferentes situaciones de manejo. Las barras verticales indican el error estándar de la media.

3.5.2.2. Flujo no saturado

A diferencia del flujo saturado, se encontró aquí correspondencia entre suelos en la variación de los flujos insaturados. En los tres casos analizados, el flujo I_{insat} fue significativamente más alto ($p < 0,05$) en LC que en $PRI = SD$ (Figura 3.6). Estos resultados se asocian a un mayor volumen de macroporos chicos y mesoporos (100-50 y 50-20 μm), (Figura 3.4). Similar patrón de variación fue hallado en otros suelos recientemente laboreados. Estos aumentos

fueron relacionados con aumentos de macroporosidad ($>200 \mu\text{m}$) de tipo inestable, creada por las fisuras de los implementos de labranza (Miller 1998; Reynolds *et al.*, 1995; Shipitalo y Protz 1987). Por el contrario, el flujo insaturado fue poco importante en los sistemas no removidos (PRI y SD).

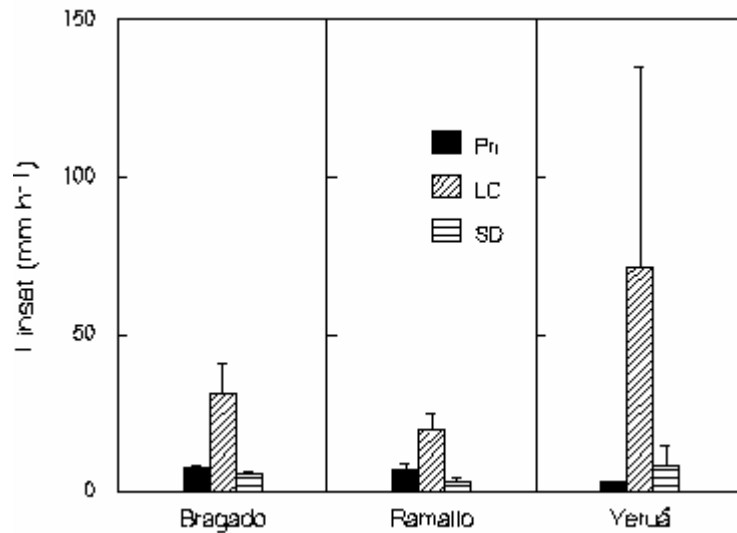


Figura 3.6. Flujos de infiltración no saturada (I_{insat}) medido con permeámetro de disco en tres suelos pampeanos y para diferentes situaciones de manejo. Las barras verticales indican el error estándar de la media.

3.5.2.3. Flujo by-pass

Dado que sólo en Bragado y Ramallo pudieron determinarse los flujos saturados e insaturados, las Figura 3.7 presentan los resultados del flujo by-pass ($I_{\text{by-pass}} \text{ mm h}^{-1}$) y el tamaño medio de poro representativo ($\lambda \mu\text{m}$) para estas dos series de suelos, respectivamente. En Bragado, el flujo $I_{\text{by-pass}}$ fue significativamente más alto en PRI y SD que en LC (Figura 3.7 a). Si se acepta el

hecho de la transición temporal entre PRI y SD, puede entonces también aceptarse que el principal efecto de SD fue recuperar el flujo original del suelo de Bragado. Esto se atribuyó en gran medida al mayor tamaño medio de poro representativo ($\lambda_{m_{by-pass}}$) del flujo en by-pass ($\lambda_{m_{by-pass}}$ en μm). En efecto, λ_m en LC fue $<$ a $500 \mu m$, mientras que en PRI y SD llegó hasta unos $4000 \mu m$ (Fig 3.7 b). No poseemos evidencias experimentales acerca del origen de estos “grandes macroporos”. No obstante, las características texturales y mineralógicas del Hapludol de Bragado permiten descartar cualquier influencia de tipo abiótico, como la expansión-contracción de las arcillas (Oades 1993). Por ello, puede especularse que los grandes poros fueron generados por acciones de tipo biológico, entre ellas la biota del suelo. Por ejemplo, canales de lombrices (Edwards, Softy 1978; Kladivko *et al.*, 1986; Lal, 1974). Estos canales abiertos y verticales de las lombrices originan flujos “by-pass” importantes para el movimiento rápido del agua en profundidad (Bouma, 1981; 1991).

En Ramallo, en contraposición, bajo SD continua se verificó una disminución del flujo en by pass (Figura 3.7 c). El tamaño medio de poro que caracterizó al flujo by pass en SD fue mucho menor que en PRI y LC, evidenciando la mayor compactación relativa de SD (Fig 3.7 d), según también se mostró en el capítulo 2 (Tabla 2.7) (SD 82,3%, PRI 79,4% y LC 62,85%). Según Carter (1990) estos valores de compactación relativa no afectan el rendimiento relativo de los cultivos, pero son capaces de modificar marcadamente la conducción del agua en siembra directa a través del perfil.

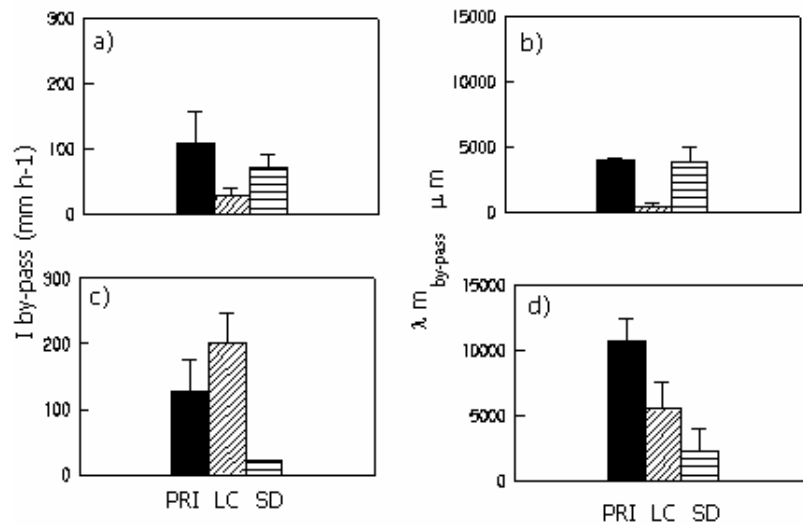


Figura 3.7. Flujos de infiltración en by-pass ($I_{by-pass}$) estimado por la diferencia entre $I_{sat}-I_{insat}$ y tamaño medio de poro representativo ($\lambda_m_{by-pass}$) para las series de Bragado a) y b), y Ramallo c) y d) respectivamente, en diferentes situaciones de manejo. Las barras verticales indican el error estándar de la media.

3.6. DISCUSIÓN

La conducción del agua a saturación varió de acuerdo a la textura y la situación de manejo. En Bragado la implementación de la siembra directa en el largo plazo generó mejoras en la conducción del agua debido a un aumento en los flujos by-pass. El mayor tamaño y volumen de macroporos fueron los responsables de dichos aumentos. Los cocientes entre (I_{insat}), o bien, ($I_{sat} - I_{insat}$) con I_{sat} permitieron expresar la contribución de cada flujo al flujo total de agua. Es de destacar que en volumen estos poros apenas representaron menos del 1% (Figura 3.4). Sin embargo, su contribución al flujo total de infiltración fue muy importante (Figura 3.8 a). Contrariamente, en Ramallo, luego de 11 años de siembra directa continua se produjo una disminución en todos los flujos de

infiltración atribuida al menor volumen y tamaño de los macroporos. A pesar de ello, la contribución de los flujos by-pass e insaturado al flujo total fueron similares entre las situaciones (Figura 3.8 b).

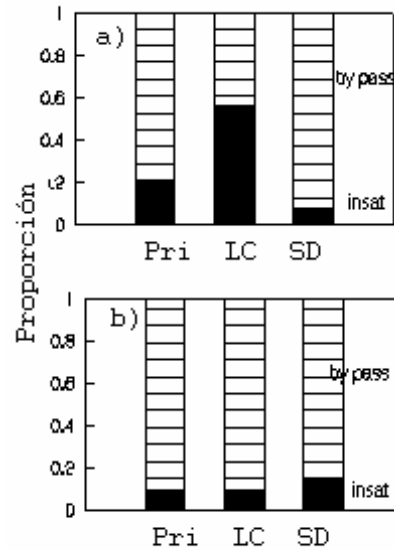


Figura 3.8. Contribución de los flujos by-pass e insaturado al flujo total de infiltración para la serie Bragado a) y Ramallo b) bajo diferentes situaciones de manejo.

El disturbio del suelo generado por la labranza convencional produjo, un mayor volumen de poros pequeños ($< 100 \mu\text{m}$) en Bragado y en menor medida en Peyrano y Ramallo (Figura 3.4), y mayor flujo insaturado en Bragado y Ramallo (Figura 3.6). La dominancia del flujo insaturado en LC es atribuible a un estado de excesiva soltura (i.e. “loosening”) causado por el disturbio mecánico del laboreo. Ello concuerda con resultados hallados en otros suelos recientemente labreados (Millar *et al.*, 1998; Shipitalo y Protz 1987). La infiltración a potenciales negativos (I insat) estuvo fuertemente asociada a los poros menores (Tabla 3.2.).

Se verificó la falta de correlación entre la infiltración saturada y el volumen de macroporos (Tabla 3.2.). Como se aprecia en la Figura 3.4, el volumen de macroporos fue en general bajo en todos los suelos y situaciones. Este resultado contrasta con la tendencia generalizada que muestra la literatura sobre siembra directa continua. En ella se menciona que en un principio puede hallarse menor volumen de macroporos debido al tráfico de maquinaria pesada, pero que luego de unos años, esa compactación es compensada por la creación de macroporos por canales de raíces y lombrices (Kay, VandenBygaart 2002; Miller *et al.*, 1998, Edwards *et al.*, 1988; Van den Bygaart *et al.*, 1999, Shipitalo y Protz, 1987).

Tabla 3.2 Correlación lineal (R^2) entre tamaños de poros (DTP) e Infiltración saturada (I sat) y no saturada (I insat) a dos profundidades. Para el set de datos se utilizaron valores promedios de todas las situaciones y suelos estudiados.

Clase de poro DTP (μm)	Infiltración saturada (I sat)	Infiltración insaturada (I insat)
Profundidad 0 – 5 cm		
> 100	-0.1	-0.2
100 – 50	-0.3	0.9
50 – 20	-0.4	0.8
Profundidad 5 – 10 cm		
> 100	-0.2	-0.6
100 – 50	-0.2	0.7
50 – 20	-0.3	0.7

3.7. CONCLUSIONES

Los resultados confirman que la aptitud para la conducción del agua bajo SD continua fue suelo-dependiente. Sin embargo, dicha aptitud no se comportó según lo esperado. En el Hapludol de textura más arenosa lejos de no haber cambios (que era lo esperado), se encontraron aumentos en flujo by-pass entre LC y SD,

alcanzando el valor del flujo existente en PRI. Estos aumentos fueron atribuidos a un mayor tamaño de *macroporos* ($\lambda_{m \text{ by-pass}} > 4000 \mu\text{m}$). En cambio, en el suelo de textura más limosa no se verificaron aumentos en los flujos by pass.

Tal como se predijo, el único sistema de manejo que mostró un comportamiento único entre suelos fue LC. En él se originaron mayores flujos insaturados relacionados con una elevada proporción de *macroporos pequeños* ($< 100 \mu\text{m}$).

CAPÍTULO 4

APTITUD DE LA SIEMBRA DIRECTA CONTINUA PARA EL CRECIMIENTO DE LAS RAÍCES DE SOJA

4.1. INTRODUCCIÓN

La soja en sus variantes de primera (único cultivo en el año) o de segunda (segundo cultivo luego de uno invernal) es el principal cultivo agrícola argentino, del cual provienen la mayor parte de los ingresos por exportaciones (www.indec.mecon.gov.ar). La principal área destinada al cultivo de soja es la región Pampeana; dentro de ella la soja se ha difundido con mayor éxito en la denominada Pampa Ondulada. Esta subregión se caracteriza por estar cubierta por distinto tipo de suelos, desde los franco arenosos hacia el oeste (i.e. Hapludoles típicos y énticos), a los franco limosos hacia el este (i.e. Argiudoles típicos, abrápticos y vérticos), abarcando el norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba. La variabilidad edáfica se amplía si se considera también dentro de la región Pampeana a la provincia de Entre Ríos, donde la soja es cultivada sobre suelos vertisoles (Figura 4.1). Surge así que la soja es cultivada en suelos dentro de un amplio rango de texturas en el horizonte superficial, y con presencia o no de horizonte B textural. A su vez, existe también un amplio rango de variabilidad en la profundidad del horizonte Bt, y su porcentaje de arcilla.

Las estadísticas de superficie sembrada y producción de soja provistas por el INDEC (www.indec.mecon.gov.ar) permiten calcular cuáles son los rendimientos medios por provincia, y de esta forma realizar inferencias sobre la influencia de los suelos dominantes en cada una de ellas (Figura 4.1). De acuerdo

con estos registros, entre campañas 1993/94 y 2000/01 los rendimientos medios fueron superiores y menos variables en las provincias de Buenos Aires y Sante Fe (2,03 – 2,17 Mg ha⁻¹; cv = 13 – 14,5 %) que en la de Entre Ríos (1,9 Mg ha⁻¹; cv = 19,6 %). Es interesante notar que en la campaña 1996/97 todas las provincias menos Buenos Aires registraron caídas en los rendimientos de soja (Figura 4.1). Ello sugiere un menor impacto de la sequía que asoló la región durante esa campaña.

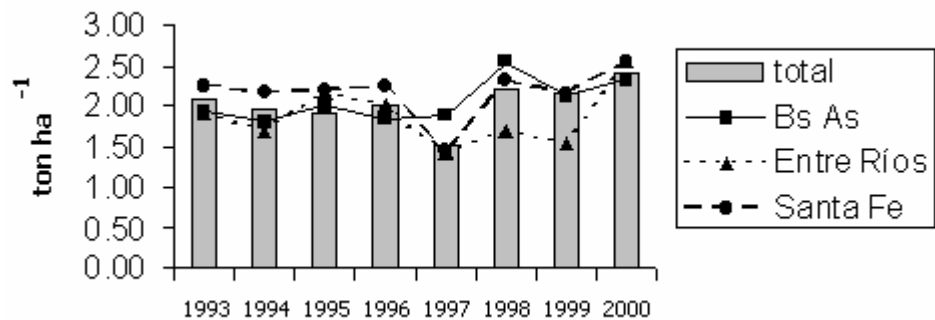


Figura 4.1. Rendimientos medios de soja en la región Pampeana, y desglosados por provincias (fuente: INDEC, 2001).

La soja en la región Pampeana es cultivada mayormente con sistemas de siembra directa, los cuales han tomado creciente difusión en los últimos años. Ellos han reemplazado a los sistemas de tipo convencional, que realizan algún tipo de remoción mecánica en el horizonte superficial, y que son aún utilizados por algunos agricultores (Senigagliesi, Ferrari 1993). Independientemente del reconocido control que ejerce la siembra directa (a través de la cobertura del suelo) sobre los procesos erosivos, es poco lo que se conoce aún sobre los efectos

sobre los cultivos, en particular la soja. Muchos cambios físicos que han sido informados para ambos sistemas, convencional y directa, pueden afectar de alguna forma al crecimiento radical. Por ejemplo, la formación de “pisos de arado” bajo labranza convencional, o el desarrollo de compactación y/o endurecimiento superficial bajo siembra directa (Díaz Zorita 2000; Panigatti *et al.*, 1998; Taboada *et al.*, 1998; Thomas *et al.*, 1996).

La literatura da cuenta, particularmente desde la década del '60, de un sinnúmero de parámetros físicos para predecir la respuesta de las plantas a las limitantes de tipo físico. Quizás, la aseveración más difundida y aceptada es aquella que habla acerca de una distribución de tamaño de poros ideal en los suelos agrícolas (Greenland 1981). Estos deberían tener al menos un 10% de su volumen con poros 2 – 50 μm , para asegurar una adecuada retención hídrica, y otro 10 % con poros > 50 μm , para asegurar una difusión de O_2 y drenaje rápido no limitantes (Glinski, Lipiec 1990). Otros autores hacen referencia a un umbral crítico de macroporos > 100 μm , los que constituyen lugares preferidos para el crecimiento libre de las raíces finas de muchos cultivos (Gibbs, Reid 1988; Hamblin 1985). Otro parámetro físico aceptado es la compactación relativa, que surge del cociente entre la densidad aparente a campo y la densidad máxima obtenida en ensayos Proctor. Carter (1990) halló que los rendimientos de trigo recién son afectados con valores de CR > 90%.

Probablemente, el parámetro más difundido ha sido la resistencia a la penetración, determinada a campo con penetrómetro de punta cónica. Existen experiencias tradicionales realizadas por Taylor y Burnet (1964), quien halló umbrales de 2,5 MPa para la detención del crecimiento de raíces de algodón. Este

umbral fue ampliado luego a otros cultivos (Glinski, Lipiec 1990; Gupta, Allmaras 1987). También, Busscher *et al.* (2000) observaron descensos de 1,50 Mg ha⁻¹ en el rendimiento del cultivo de soja con incrementos de 1 Mpa en los valores de resistencia a la penetración (Cone Index). Las medidas de resistencia son altamente dependientes de la humedad edáfica, por lo requieren ser determinadas ambas en forma conjunta.

4.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

4.2.1. Objetivos

En el presente capítulo se desea evaluar: a) el desarrollo de limitantes físicas bajo sistemas de labranza convencional y siembra directa a través de parámetros físicos y físico-mecánicos basados en los umbrales de la literatura en cuanto a resistencia mecánica (>2.5 MPa), volumen de macroporos (<10% v/v de suelo), compactación relativa (>90%); b) cuál es el impacto de las labranzas sobre el crecimiento de las raíces de soja; y c) cuáles parámetros de los mencionados son los más aptos para predecir limitantes físicas en suelos de la región.

4.2.2. Hipótesis de trabajo

La distribución de raíces en el perfil del suelo en siembra directa o labranza convencional es dependiente de la textura de los suelos. En suelos limosos con poca capacidad de regeneración y alta susceptibilidad a la compactación es esperable hallar una mayor distribución superficial de las raíces en labranza convencional dado el alto volumen de macroporos generados

artificialmente por la remoción. En suelos de textura gruesa, no es esperable encontrar diferencias entre las labranzas debido a la alta macroporosidad preexistente en esos suelos.

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1. **Volumen de poros > 50 μm y compactación relativa**

Se determinó el volumen de poros > de 50 μm , obtenida con la sumatoria de las clases porales > a 50 μm , descrita anteriormente en el capítulo 3. La metodología correspondiente al ensayo de compactación relativa ya fue descrita en el capítulo 2.

4.3.2. **Perfil de resistencia y humedad**

En todos los suelos y situaciones se realizaron tres calicatas de 1m^3 , con el objetivo de determinar los perfiles de contenido hídrico gravimétrico (θ_g % g g^{-1}) (secado en estufa) hasta los 0,50 m cada 0,1 m; y la resistencia a la penetración (R en Mpa). Las mediciones se realizaron con un penetrómetro de impacto con punta cónica (30° de punta) (Burke *et al.*, 1986; Bradford, en Klute 1986), también hasta los 0,5 m cada 0,05 m. Para la obtención del valor final se cuantificó el número de golpes que se requiere para atravesar la capa de 0,05 m, hallándose el valor con la ecuación de acuerdo con la fórmula general de hincada de un cuerpo cilíndrico en el

suelo, basado en el choque de dos cuerpos). La fórmula integra las especificaciones del penetrómetro usado.

$$W * h = Q_y * S \quad [1]$$

donde el trabajo entregado al cuerpo cilíndrico (penetrómetro) por medio de un martinete de peso W que cae desde una altura h , es igual a la resistencia dinámica del suelo Q_y , el cual es penetrado un valor S por el cilindro (penetrómetro). A partir de la expresión [1] el valor S puede fijarse; entonces el trabajo que debe entregar el martinete será proporcional a S , y puede escribirse para la penetración fijada en esta tesis (5 cm) de la siguiente manera [2]:

$$\underline{W * h * N_5 = Q_y * 5 \text{ cm}} \quad [2]$$

de la expresión [2] y para el penetrómetro usado en esta tesis se tiene [3],

$$Q_y = (W * h * N_5) / 5 \text{ cm} \quad [3]$$

donde N_5 es el número de golpes para penetrar 5 cm de estrato, W es el peso de la masa (2 kg), h la distancia de golpeo de la maza (52,5 cm), y dividiendo por el A es el área del cono ($1,54 * 10^{-4} \text{ m}^2$), nos da el valor de Resistencia a la penetración en unidades R_p [MPa] como muestra la ecuación [4],

$$Q_y/A = [(2 * 52,5 * N_5) / 5 \text{ cm}] / A \quad [4]$$

Para 1 cm de penetración, y si se considera al estrato homogéneo en sus propiedades, se tiene [5],

$$R_p \text{ [MPa]} = 1,3/5 N_5$$

de donde multiplicando el N_5 de golpes para penetrar 5 cm por el coeficiente 0.26, nos da la R_p en MPa.

4.3.3. Distribución de raíces de soja

En cada situación se realizaron tres calicatas y se determinó la distribución de raíces de soja hasta 30 cm de profundidad, con el objetivo de evaluar la respuesta del cultivo de soja a las impedancias mecánicas en las situaciones de labranza convencional (LC) y siembra directa (SD y SDd) durante los estadios reproductivos del cultivo (entre R1 y R2). Muchos trabajos indican que el 90% de las raíces se distribuyen en los primeros 0,30m del perfil del suelo (Mayaki *et al.*, 1976). El distanciamiento entre hileras fue variable (0,35m, 0,38m y 0,52m) de acuerdo al manejo del productor. Existe información que avala que la distribución relativa de las raíces no se afecta con el distanciamiento (Scheiner *et al.*, 2000). Se utilizó una metodología semi-cuantitativa propuesta por Massé (1982) que permite tener una percepción global del perfil de raíces. Las determinaciones se realizaron descubriendo mediante un cuchillo las raíces de soja y luego se superpuso en forma perpendicular a la hilera del cultivo una cuadrícula de 0.5 x 0.3 m con orificios de 5 x 5 cm (Figura 4.2). El parámetro medido fue abundancia, usando una escala subjetiva de 5 opciones basada en la cantidad de raíces que va de 0: ausencia total de raíces a 4: raíces muy abundantes. El uso de la escala quedó librado a la apreciación del observador, que en estos experimentos fue la misma persona. La escala de notación fue la misma para todos los suelos y situaciones muestreadas permitiendo así la comparación entre diferentes perfiles de

abundancia y finalmente las observaciones fueron mapeadas en una hoja de papel con cuadrículado. Luego se calculó la suma de la abundancia de cada estrato de 5 cm ($\Sigma_{\text{estrato}_n}$) obteniéndose la sumatoria total hasta los 30 cm de profundidad (Σ_{total}). Los resultados fueron expresados como fracción en cada estrato hasta los 30 cm, según la ecuación [2] de Abundancia relativa,

$$\text{Abundancia relativa} = (\Sigma_{\text{estrato}_n} / \Sigma_{\text{total}}) \quad [2]$$

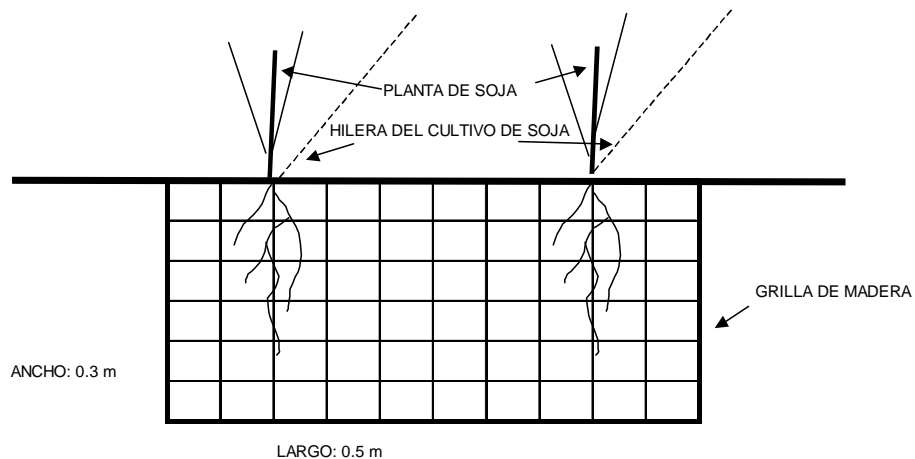


Figura 4.2. Esquema de la grilla usada para determinar abundancia relativa de raíces en el cultivo de soja (Massé 1982).

4.3.4. Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados de acuerdo a la metodología descrita en el punto 1.3.3. (capítulo 1, Diseño experimental y estadística). Además, con el objetivo de relacionar la abundancia de raíces de soja en profundidad con la textura de los suelos, se realizaron análisis de regresión simple.

4.4. RESULTADOS

4.4.1. Poros > 50 μm , compactación relativa

En Tabla 4.1 se muestra el volumen de poros > 50 μm (macroporos) para diferentes serie de suelos y situaciones de manejo a dos profundidades. No se muestran los datos de la serie Yerúa por ser un suelo expansible, donde no puede aplicarse la mesa de tensión. No hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) atribuibles a las labranzas a ninguna profundidad, excepto en Peyrano en donde SDd y LC presentaron un mayor volumen de macroporos respecto de PRI y SD. Nótese que tanto SDd como LC representan las situaciones más degradadas. Éstas, son en general inestables al agua, tal como surge de los datos de estabilidad presentados en el capítulo 2, tabla 2.3. Es interesante destacar que ningún suelo, aún el franco arcillo arenoso de Bragado, superó el umbral crítico para la aireación de 10% (Greenland, 1981). En otras palabras, si nos basamos exclusivamente en este parámetro, nos enfrentamos con un escenario físico problemático para aireación y el enraizamiento de los cultivos. Sin embargo, teniendo en cuenta los valores de compactación relativa (CR%), analizados en el capítulo 2, Tabla 2.7. en ningún caso los valores de CR% superaron el umbral crítico de 90% señalado por Carter (1990). Es decir que en el caso de este parámetro, estamos en presencia de “buenas noticias” para el rendimiento de los cultivos.

Tabla 4.1. Volumen de macroporos > 50 μm (% v/v de poros del suelo) determinado en mesa de tensión para diferentes series de suelo y situaciones de manejo a dos profundidades 0-5 y 5-10 cm. Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre situaciones de manejo.

Volumen de poros del suelo (%v/v)					
Serie de Suelo	Prof. (cm)	PRI	LC	SD	SDd
Bragado	0 - 5 cm	4,60a	5,09a	3,47a	
	5 - 10 cm	2,97a	4,45a	4,02a	
Peyrano	0 - 5 cm	1,78b	2,91ab	1,68b	5,32a
	5 - 10 cm	0,91a	1,87a	1,88a	2,21a
Ramallo	0 - 5 cm	2,53a	3,95a	2,15a	
	5 - 10 cm	2,27a	1,66a	1,97a	

4.4.2. Perfiles de humedad edáfica y resistencia a la penetración

Los cuatro suelos fueron muestreados en diferentes momentos, lo cual generó diferentes status hídricos en cada sitio en particular. Así como en Bragado y Ramallo los suelos presentaron bajos contenidos de humedad (Figura 4.3 a y e), en Peyrano y Yerúa, presentaron altos valores de humedad en todo el perfil independientemente del tipo de manejo (Figura 4.3 c y g). Pese a estas inevitables diferencias, los perfiles de humedad mostraron siempre un contenido de humedad significativamente mayor en PRI y SD respecto de LC, generalmente en los primeros centímetros, excepto en Bragado donde dichas diferencias se profundizaron hasta los 45 cm. Los mayores niveles de humedad bajo SD fueron debidos a las diferencias en tasa de evaporación, causadas por la mayor cobertura de la superficie del suelo. Similares resultados fueron hallados por un gran número de investigadores al comparar la siembra directa y la labranza convencional (Hill *et al.*, 1985; Chagas *et al.*, 1994; Taboada *et al.*, 1998; Ferreras *et al.*, 1999). Estas diferencias en humedad fueron tenidas en cuenta al analizar los perfiles de resistencia.

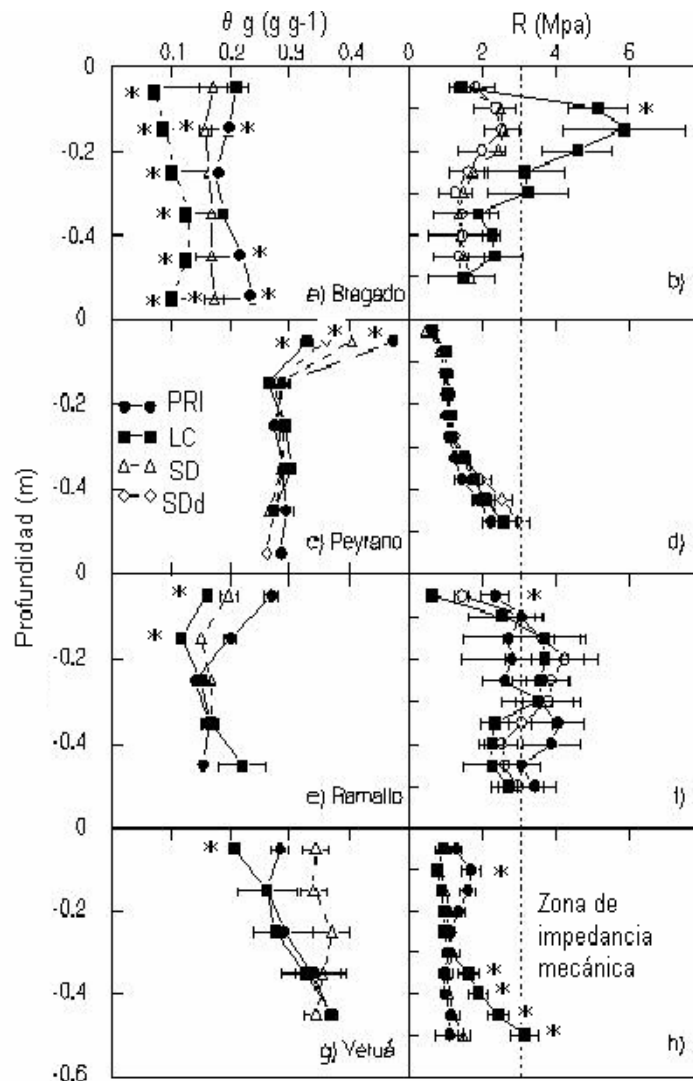
Los valores de resistencia, en términos generales, variaron de acuerdo a los diferentes status hídricos presente en cada sitio en particular. En este sentido tanto en Peyrano como en Yerúa con altos contenidos de humedad, se presentaron valores de resistencia a la penetración muy por debajo del umbral crítico de crecimiento de las raíces (Taylor, Burnet 1964). Ello se debe a que el humedecimiento del suelo provoca una disminución de la atracción entre partículas y un incremento en la movilidad de las mismas, lo que resulta en una

menor presión de la raíz para penetrar el suelo (Taylor, Gardner 1963; Bennie, Burger 1981). En Yerúa, la resistencia se incrementó significativamente ($P < 0,05$) en LC por debajo de los 30 cm, respecto de PRI y SD.

En Bragado y Ramallo con suelos más secos las diferencias en resistencia se hicieron visibles entre las situaciones de manejo (Figura 4.3 b y f). Precisamente, en Bragado el perfil de LC mostró un aumento de resistencia muy significativo ($P < < 0,05$) entre 0.1 a 0.2 m. Este incremento en la resistencia del suelo no se atribuyó al contenido de humedad sino más bien a un “piso de arado”. Esta impedancia no fue hallada bajo SD, lo cual no fue sólo atribuible al debilitamiento causado por el mayor nivel de humedad al momento de muestreo. Es interesante notar que la siembra directa revirtió el piso de arado luego de 6 años de siembra directa continua. Esto ya fue visto anteriormente para los mismos suelos, pero en menor lapso (luego de 4 años de siembra directa continua) (Taboada *et al.*, 1998). Contrariamente, Ferreras *et al.*, (2000) y Díaz-Zorita, Grosso (2000), hallaron mayores valores de resistencia y de densidad en siembra directa. En Ramallo PRI presentó valores significativamente ($P < 0,05$) mayores respecto de SD y LC, atribuido a las características propias de la situación prístina (pastura degradada). Se observaron aumentos de resistencia subsuperficiales (0.1 – 0.3 m), pero en ambos sistemas de labranza. En esa profundidad comienza un fuerte horizonte Bt, del tipo de un “*pan de arcilla*” con elevado porcentaje de arcillas expandentes (ver Tabla 2.1, capítulo 2). Los valores de resistencia a la penetración hallados en la capa 0.1-0.2 m superaron el umbral crítico para la extensión de las raíces.

Si nos basamos únicamente en la resistencia, son esperables problemas de impedancia mecánica únicamente en Bragado LC y en Ramallo. A diferencia de otros autores, en ningún caso se verificaron niveles de resistencia compatibles con procesos de compactación y/o endurecimiento superficial bajo SD.

Un resumen de todas estas aproximaciones revela grandes contradicciones, según el parámetro seleccionado para predecir las limitantes físicas. En realidad, debe considerarse que si bien Taylor et al., 1966 establecieron como 2 MPa como el umbral crítico de resistencia a la penetración de raíces para una gran cantidad de especies, existe un valor crítico de resistencia a la penetración de acuerdo al porcentaje de arcilla y que varía también con la especie, como ejemplo para el algodón este umbral varía desde 2,5 a 7 Mpa en suelos con 50 a 10% de arcilla, respectivamente (Gerard *et al.*, 1982, citado por Glinski y Lipiec, 1990). Queda



claro entonces que las especies que crecen en suelos más arenosos pueden soportar niveles más altos de resistencia.

Figura 4.3. Perfiles de humedad gravimétrica (θ_g) y resistencia a la penetración (R Mpa) para la serie Bragado 1a y b, Peyrano 1c y d, Ramallo 1 e y f y para la serie Yeruá 1 g y h; en diferentes situaciones. El asterisco * indica diferencias significativas entre situaciones. Las barras horizontales indican la dispersión dada por el error estándar de la media. La línea punteada indica el umbral crítico de penetración (Taylor *et al.*, 1966).

4.4.3. Abundancia de las raíces

4.4.3.1. Impacto de las labranzas sobre el crecimiento de las raíces

La figura 4.4 muestra la abundancia de raíces de soja en profundidad para las cuatro series de suelo estudiadas, comparando la labranza convencional con la siembra directa continua. La abundancia de raíces difirió más bien con el tipo de suelo excepto en la serie Ramallo donde hubo mayor acumulación de raíces de soja en LC en la capa de 0,05-0,1 m. Esto se relacionan con un estado de excesiva soltura (i.e. “loosening”) en el suelo removido mecánicamente (Baver 1956), y se fundamenta con los bajos valores de resistencia y los altos valores hallados de macroporsidad hallados en la capa de 0-5 cm en LC respecto de SD. No se hallaron diferencias significativas atribuibles a los sistemas de labranza.

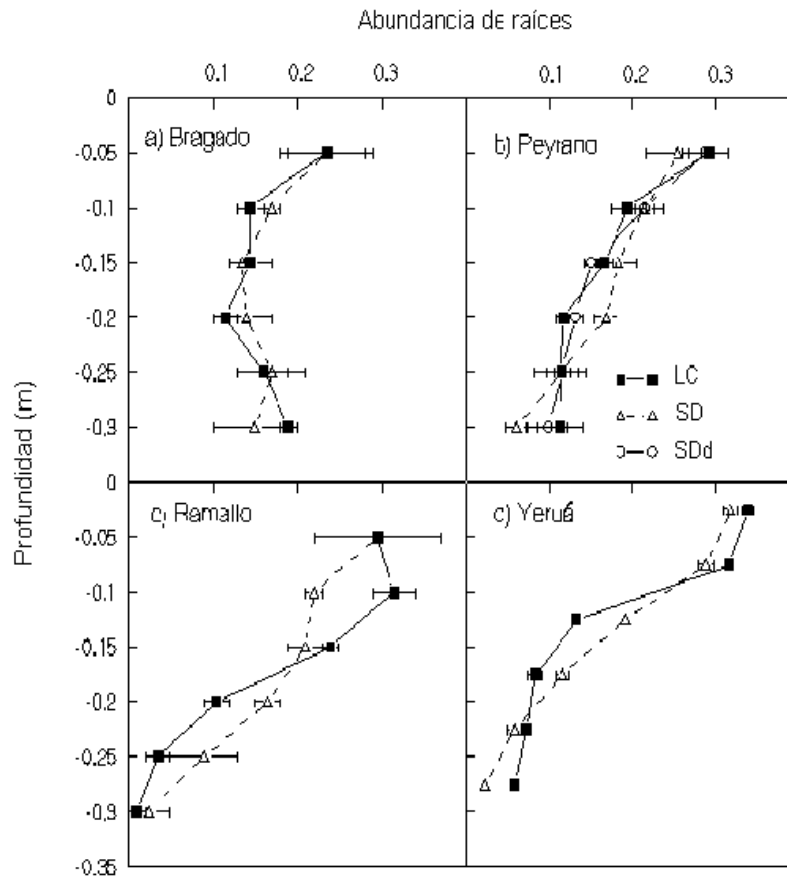


Figura 4.4. Abundancia de raíces de soja hasta los 30 cm para la serie Bragado 2a, Peyrano 2b, Ramallo 2c y Yeruá 2d en dos situaciones de manejo LC (labranza convencional), SD (siembra directa) y SDd (siembra directa degradada).

Un primer análisis de la abundancia de raíces en profundidad permite observar dos patrones contrastantes. Por un lado, en Bragado se observó una distribución homogénea hasta los 0.3 m de las raíces de soja (Figura 4.4. a), independientemente de los elevados valores de resistencia a la penetración en LC entre los 0.1 y 0.2 m (Figura 4.3. b). Por otro lado, en Ramallo y en Yeruá, y en menor medida Peyrano, se observó un patrón decreciente de la abundancia de raíces con la profundidad (Figura 4.4 b, c y d). En estas series hubo una clara

acumulación superficial de las raíces tanto en LC como SD. Ello demuestra que el subsuelo fuertemente arcilloso fue una limitante en ambas las situaciones. Según Bennie y Botha (1986), la distribución de las raíces en el perfil del suelo es función de la profundidad, espesor y resistencia de la impedancia mecánica. Por ello hay crecimiento superficial cuando hay capas compactas cerca de la superficie. Finalmente, en Peyrano se encontró una situación intermedia, en la cual los altos valores de humedad en todo el perfil coincidieron con los bajos valores de resistencia y una disminución gradual de la abundancia de raíces con la profundidad.

4.4.3.2. Influencia de las impedancias subsuperficiales en el crecimiento de las raíces

Un segundo análisis consideró la abundancia de raíces como una función lineal de la profundidad, y permitió diferenciar significativamente ($P < 0,001$) tres “familias” de rectas mediante el *test de comparación de pendientes*. Las pendientes de las rectas fueron similares en Ramallo y Yerúa y difirieron significativamente en Bragado y Peyrano (Figura 4.5). La ordenada al origen fue similar en todos los suelos ($P=0.9941$).

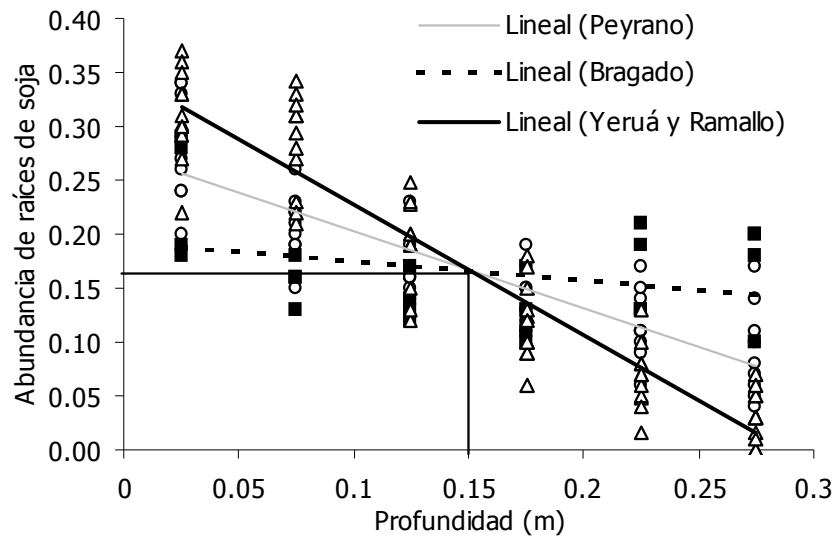


Figura 4.5. Relación entre la abundancia relativa de raíces del cultivo de soja con la profundidad para diferentes suelos de región pampeana. La línea llena marca la profundidad de la impedancia hallada.

Las ecuaciones lineales para cada recta con sus respectivos coeficientes de determinación fueron:

Peyrano: $Abund = -0.0071 \text{ prof}(m) + 0.2915$ (R^2 0.7301)***

Bragado: $Abund = -0.0018 \text{ prof}(m) + 0.1973$ (R^2 0.102)***

Ramallo y Yeruá: $Abund = -0.0121 \text{ prof}(m) + 0.3792$ (R^2 0.8762)***

Los resultados hallados indicaron una posible asociación de la abundancia de raíces con algún parámetro edáfico en profundidad. Debido a ello, se realizó un tercer análisis que correspondió a la abundancia de raíces de soja en función del contenido de arcilla en el subsuelo (entre 18 y 30 cm). El análisis de regresión permitió asegurar (R^2 0,849***) que la principal causa de la disminución de la abundancia de raíces con la profundidad es debida a los horizontes fuertemente arcillosos o pan de arcilla presentes en las series Ramallo y Yeruá (Figura 4.6). De

acuerdo con la función polinómica ajustada, existe un umbral crítico de arcilla en el subsuelo, por encima del cual se afecta la penetración de las raíces de soja. Dicho umbral se ubica en torno al 33-35% de arcilla.

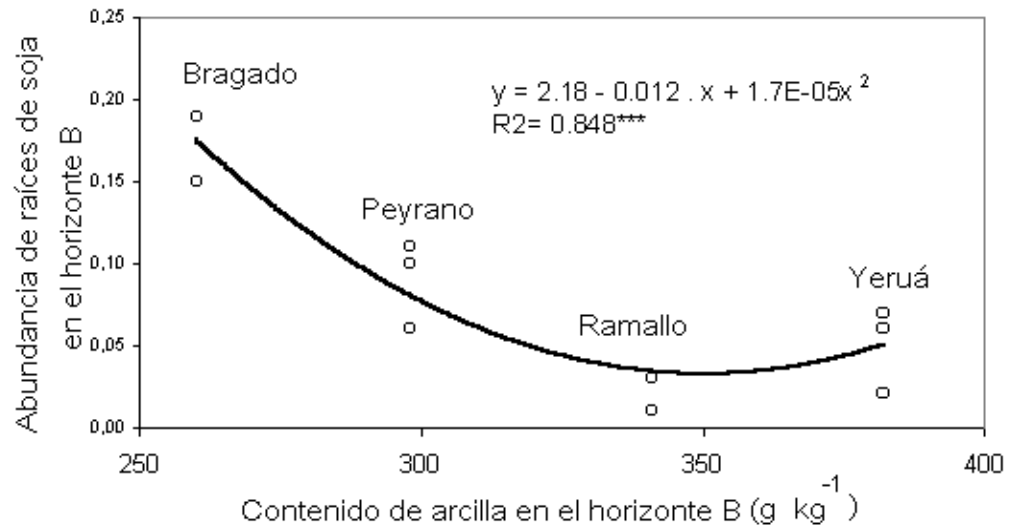


Figura 4.6. Relación entre la abundancia relativa de raíces del cultivo de soja en el horizonte B y el contenido de arcilla en el horizonte B (profundidad >0.15 m).

4.5. CONCLUSIONES

Los “*umbrales*” de los parámetros físicos usados en la literatura para detectar impedancias físicas para el crecimiento de las raíces no resultaron ser confiables en este estudio. Ello se debió a la contradicción en la predicción de impedancias mecánicas que presentaron dichos parámetros. Esta contradicción está basada en la extrapolación de los umbrales a suelos con diferentes texturas y diferentes cultivos.

En esta tesis fue posible detectar tres patrones diferentes de distribución de raíces del cultivo de soja, de acuerdo a la textura de los suelos. En este sentido, la existencia de subsuelos arcillosos fue el factor fundamental que reguló la

distribución de las raíces en el perfil. Este resultado difiere de la hipótesis propuesta, la cual hacía referencia a la diferente textura del horizonte superficial. En realidad, la textura demostró ser un factor determinante en la abundancia de raíces, pero sólo en el subsuelo. Por otra parte, el hecho de haber demostrado la influencia negativa que ejercen los subsuelos muy arcillosos sobre las raíces de soja, ello aporta elementos valiosos para explicar por qué los rendimientos de soja son más afectados en una provincia que en otra, durante una campaña agrícola poco lluviosa (Figura 4.1).

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

El proyecto original de esta tesis apuntaba a evaluar la aptitud de distintos suelos de la Pampa Ondulada para ser manejados con SD continua. Los resultados de los capítulos II y III responden directamente al proyecto original. En cambio, algunos resultados del capítulo IV representan una ampliación de los objetivos iniciales, los que por su trascendencia fueron incluidos finalmente en la tesis.

5.1. PROBLEMA AGRONÓMICO QUE ALENTÓ EL DESARROLLO DE ESTA TESIS

En la Pampa húmeda los suelos se mantienen bajo agricultura continua, con una fuerte preeminencia del monocultivo de soja de primera y de la doble rotación trigo / soja de segunda (Ventimiglia *et al.*, 2000). La siembra directa ha tomado un creciente desarrollo en la región. Sin embargo, en su mayor parte sólo la soja de segunda se siembra usando siembra directa, mientras que los restantes cultivos suelen ser sembrados con algún tipo de remoción previa del suelo. Este carácter mayormente estacional de la siembra directa se origina en la percepción generalizada que tienen los agricultores sobre la necesidad de remover o “aflojar” el suelo periódicamente. Aún muchos suelos mantenidos ininterrumpidamente con siembra directa durante períodos de cuatro o más años, son removidos con implementos mecánicos del tipo del arado de disco (pasadas muy superficiales), o del “para-till” o “cultivie” en el caso de las labranzas más profundas (citado por Quiroga *et al.*, en Panigatti *et al.*, 1998). Todo ello confirma que, lejos de ser una

presunción, la compactación superficial es un problema real que afecta a muchos suelos pampeanos no laboreados.

La mayor parte del área cultivada con soja de la Argentina corresponde a la Pampa Ondulada, cuyos suelos son mayoritariamente muy limosos y con diferentes estados de avance en su degradación por uso agrícola (Senigaglia y Ferrari 1993). Como se dijo en el capítulo 1, estos suelos son reconocidamente problemáticos para ser manejados sin labranzas. Autores extranjeros los consideran muy susceptibles a la compactación, y con escasa capacidad de recuperación posterior (Cannell *et al.*, 1980; Douglas *et al.*, 1986). Sin embargo, estas aseveraciones han merecido cuestionamiento en suelos de la región, ya sea porque se considera que la materia orgánica atempera los procesos de compactación (Thomas *et al.*, 1996), o porque se considera que lo que ocurre es endurecimiento genético y no compactación (Taboada *et al.*, 1998).

Ante este escenario que parece potencialmente conflictivo para la siembra directa, surge la realidad del enorme desarrollo de esta práctica, precisamente en esos suelos considerados poco aptos. De allí surge el principal interrogante que motivó esta tesis:

¿Cómo es posible que los suelos limosos, teóricamente poco aptos para la siembra directa continua, comprendan a su vez el área de mayor superficie bajo siembra directa y de mayor producción del cultivo de soja ?

Este gran interrogante dio lugar a diferentes tipos de abordaje para estudiar la problemática de la aptitud de los suelos limosos para ser manejados con siembra directa continua. Uno de ellos se refería al diferente porcentaje de partículas gruesas (i.e. arenas, $> 50 \mu\text{m}$), cuya variación dentro de un esqueleto

con preeminencia de materiales finos, podía significar el desarrollo de mayor macroporosidad, y así una mejor aptitud para la siembra directa continua.

5.2. INTERROGANTES RESPONDIDOS

Se presentan a continuación las respuestas de la tesis a algunos de los interrogantes planteados:

¿En qué medida la siembra directa continua demostró ser una herramienta apta para promover la recuperación de los suelos?, ¿Fue distinta la recuperación en función de la composición granulométrica del horizonte superficial ?

La comparación entre los suelos bajo labranza convencional, respecto de la situaciones prístinas, respondió a un comportamiento esperable según surge de los antecedentes existentes en el mundo y en nuestro país. Todos los suelos manejados con LC mostraron, independientemente de su textura en superficie, disminuciones del contenido de carbono orgánico (Michelena *et al.*, 1988; Senigagliaesi, Ferrari 1993) y en los índices de estabilidad estructural (Michelena *et al.*, 1988; Pilatti *et al.*, 1988; Marelli, Lattanzi 1990; Dexter 1991) y aumentos de la compactibilidad (Carter 1987; Thomas *et al.*, 1996). En la Figura 5.1. se representa la proporción de parámetros estudiados que presentaron, y que no presentaron, mejoras en el pasaje de LC a SD continua. Como puede verse, sólo un 30% de los parámetros presentó mejoras entre ambas situaciones, mostrando así una limitada capacidad de la siembra directa para promover la recuperación de los suelos.

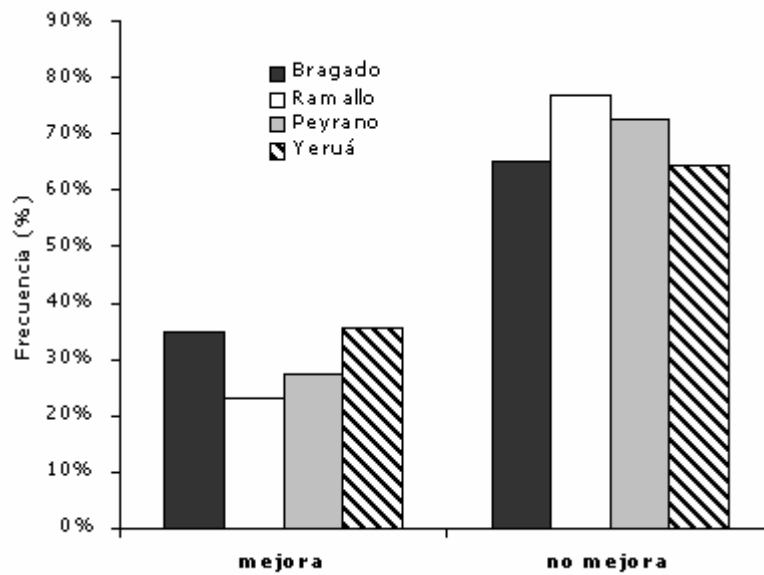


Figura 5.1. Proporción de parámetros físicos, físico-químicos e hidráulicos que produjeron mejoras o no, bajo siembra directa continua respecto de la labranza convencional en diferentes suelos pampeanos.

¿Mejora la siembra directa continua las propiedades hidráulicas de los suelos?
 ¿son los suelos limosos de baja macroporosidad los más favorecidos por estas mejoras?

Se verificó un diferente comportamiento entre los flujos de agua preferenciales o en by-pass e insaturados a través de los suelos al pasar de LC a SD. En el caso del flujo en “by-pass” hubo mejoras en el suelo de textura más arenosa (Bragado), lo cual se asoció con la creación de grandes macroporos, mientras que en el suelo franco arcillo limoso (Ramallo), descendió fuertemente luego de 11 años de SD continua. Ello demuestra que los suelos limosos no fueron los más favorecidos por mejoras en la conducción del agua bajo SD continua, lo cual rechaza la hipótesis propuesta. A diferencia de lo hallado en el flujo en by-pass, los tres suelos en que se determinó mostraron aumentos significativos del

flujo insaturado en las situaciones bajo LC. Este cambio se asoció con mayor proporción de macroporos de menor tamaño (50-100 μm).

Recientemente, en una tesis realizada por Sasal (2003) en suelos limosos de la región, también se halló que no se producen mejoras en la infiltración en suelos manejados por varios años con SD continua. Esta falta de mejoras fue relacionada con la prevalencia de poros planares, cuya creación se fomenta al dejar de remover el suelo. Es probable que los menores flujos en “by pass” hallados en esta tesis se deban también a la existencia de esta clase de poros, asociados con la presencia de agregados laminares en superficie (Barbosa *et al.*, 1997). Los resultados de la tesis muestran que todos los suelos aumentaron su estabilidad bajo SD continua pero que, sin embargo, ello no necesariamente se tradujo en mejoras en la conducción del agua y de la macroporosidad (Taboada *et al.*, 1998). Este hecho determina que otros parámetros adicionales a la estabilidad deberían ser adicionados en la región como indicadores de calidad de suelos (Elliot, 1998).

¿Fueron detectadas impedancias o compactación excesiva en los suelos?Cuál fue la aptitud de la siembra directa para revertir esas impedancias?

Los suelos bajo estudio venían siendo sujetos a manejos continuados de largo plazo tanto en LC como en SD, lo cual permitía pronosticar el desarrollo de impedancias tanto superficiales como subsuperficiales (Glinski, Lipiec 1990; Gupta, Allmaras 1987). A nivel superficial (0 a 20 cm) ninguno de los parámetros utilizados (densidad aparente, compactación relativa Proctor, resistencia a la penetración) reveló desarrollo de procesos de compactación y/o endurecimiento.

En lo que respecta a SD este resultado se diferencia de lo hallado previamente (4 años de SD) por Taboada *et al.* (1998) en dos de los suelos aquí estudiados (Bragado y Peyrano). Se confirma entonces la idea establecida por algunos autores, quienes hallaron la desaparición de la compactación superficial luego de 4/6 años bajo SD continua (Francis *et al.*, 1987; Thomas *et al.*, 1996; Voorhees, Lindstrom 1984). Esta regeneración se asocia con dos tipos de procesos, a menudo paralelos: la creación de bioporos (Edwards, Softy 1978; Kladvko *et al.*, 1986), y los descensos de compactibilidad asociados con aumentos de carbono orgánico (Díaz Zorita, Grosso, 2000; Quiroga *et al.*, 1999; Thomas *et al.*, 1996). De los suelos estudiados, el de textura más gruesa (Bragado) se ubicó en el primer grupo (mejoras en flujo en “by pass”), mientras que los limosos de Peyrano y Ramallo (que no mostraron mejoras ni en porosidad ni en flujo en “by pass”) se ubicaron en el segundo grupo. No se poseen datos de porosidad, ni de flujo en “by pass” del Vertisol (Yeruá). Sin embargo, dado las características expansibles de este suelo, es probable se ubique en un grupo diferente que los otros.

En los suelos estudiados se halló una relación curvilínea entre la compactibilidad del suelo ($D_{m\acute{a}x}$) y el carbono orgánico superficial (C.O.T. $_{0-5cm}$). Ello se diferencia de otras relaciones ajustadas en suelos pampeanos y del mundo, las que fueron siempre lineales (Díaz-Zorita, Grosso, 2000; Thomas *et al.*, 1996).

A nivel subsuperficial (20 – 40 cm) se hallaron evidencia de compactación inducida por las labranzas (“piso de arado”) en Bragado, donde sólo la situación LC mostró aumentos de resistencia a la penetración. Ello demuestra que luego de seis años de SD continua esta compactación inducida desapareció. Este proceso regenerativo debió estar asociado con efectos bióticos en este suelo no expandente (Dexter 1988; Oades 1993). Similar resultado había sido hallado en este suelo, pero luego de sólo cuatro años de SD por Taboada *et al.* (1998). En estos suelos

no es necesarios el uso de implementos o labranzas profundas, que incluyen pasadas periódicas de cincel a poca profundidad (ej.: 4 cm) (Munkholm *et al.*, 2003) o labranza profunda a 30 cm. (Busscher *et al.*, 2000). En nuestro país también Díaz-Zorita *et al.* (2002) en zonas subhúmedas con mayor contenido de arena recomienda el sistema de siembra directa, previa la eliminación de la compactación subsuperficial (40 cm) con implementos de labranza como “paraplow”, subsolado, o cincel.

¿Cuál fue el impacto de las diferentes labranzas sobre el crecimiento de las raíces del cultivo de soja? ¿Fueron confiables los “umbrales” mencionados por la literatura para detectar impedancias físicas para el crecimiento de las raíces?

Contrariamente a lo hipotetizado, el patrón de crecimiento de las raíces de soja no fue afectado por los sistemas de labranza y dependió, en cambio, del tipo de suelo. La existencia de altos porcentajes de arcilla subsuperficial fue el factor que más explicó dicho patrón, con un umbral crítico de 33-35 % de arcilla y por debajo de los 15 cm para los suelos estudiados.

La resistencia a la penetración permitió identificar la presencia de “pisos de arado” en Bragado, el cual no causó ningún efecto deletéreo sobre las raíces de soja, pero sólo en Ramallo permitió identificar a los subsuelos arcillosos nocivos. No se halló ninguna relación entre resistencias > 2.5 MPa y efectos negativos sobre las raíces, contradiciendo los estudios previos (Glinski, Lipiec 1990; Gupta, Allmaras 1987).

En lo que respecta al horizonte superficial, en el cual se determinaron bajas macroporosidades ($< 10\%$ en volumen), las cuales pueden afectar a la aireación (Greenland, 1981; Glinski Lipiec 1990), y el crecimiento de las raíces por espacios libres (Gibbs, Reid 1988; Glinski, Lipiec 1990; Hamblin 1985), tampoco se halló relación con la abundancia de raíces de soja en los campos.

Estos resultados demuestran la escasa utilidad que tuvieron los “*umbrales*” usualmente aceptados en la literatura para detectar impedancias físicas.

La falta de efecto de la exigua macroporosidad sobre las raíces puede explicarse por la capacidad que tienen éstas para crecer por poros más pequeños que su diámetro, atravesando la matriz sólida de los suelos (Hamblin, 1985). Para ello es necesario que esta matriz no ofrezca elevadas resistencias a las raíces, cosa que se logra mediante aumentos de materia orgánica y descensos de compactibilidad (Thomas *et al.*, 1996), o mediante el mantenimiento del suelo con buen *status* hídrico. Es probable que la falta de efecto de las labranzas sobre las raíces de soja obedezca a alguna de estas posibilidades. A diferencia del cultivo de maíz, la soja presenta un porcentaje mayor de raíces en los primeros 20/30 cm del perfil del suelo (Mayaki *et al.*, 1976) y presenta mayor crecimiento compensatorio frente a factores a sequías u otro impedimentos que otros cultivos (Sadras y Calviño 2001; Yusuf *et al.*, 1999). Existe la presunción que el cultivo de soja bajo siembra directa refleja muy poco la degradación de los suelos pampeanos. Es probable que esta falta de efecto sea el reflejo de la prevalencia de ciclos con años lluviosos, los cuales permiten mantener a estos suelos con bajo nivel de resistencia, para que las raíces crezcan sin mayor inconveniente. Esta presunción es corroborada por las experiencias exitosas de labranza profunda (“para-till”, “para-plow”, “cultivie”, etc.) en suelos bajo SD, tanto en nuestro país (Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Quiroga *et al.*, 1998), como en el exterior (Busscher *et al.*, 2000; Munkholm *et al.*, 2003). La descompactación por medios mecánicos es otro de los medios para generar bajas resistencias en suelos que carecen de elevada macroporosidad.

5.3. LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS Y EL CULTIVO DE SOJA - PERSPECTIVAS A FUTURO DE LA PROBLEMÁTICA

Hoy en día muchos de los factores que determinan disminución de los rendimientos de los principales cultivos agrícolas de la Argentina se originan en cuestiones físicas. Parece, a la luz de los resultados hallados, que la pérdida de profundidad efectiva (horizonte Ah) y materia orgánica provoca la pérdida de autonomía de los suelos para soportar sequías estacionales. Estos problemas se vuelven críticos en cultivos como el maíz y limitan su crecimiento a tal punto de casi desaparecer en algunas localidades (Figura 5.2). La pérdida del cultivo de maíz dentro de la rotación agrava más las situación dado que estos cultivos son capaces de estabilizar los poros del suelo debido a su alta producción de exudados rizosféricos del tipo de los compuestos lábiles de carbono orgánico, que como explicó Degens (1997) actúan como pegamento o adherentes en los mecanismos de agregación biológica.

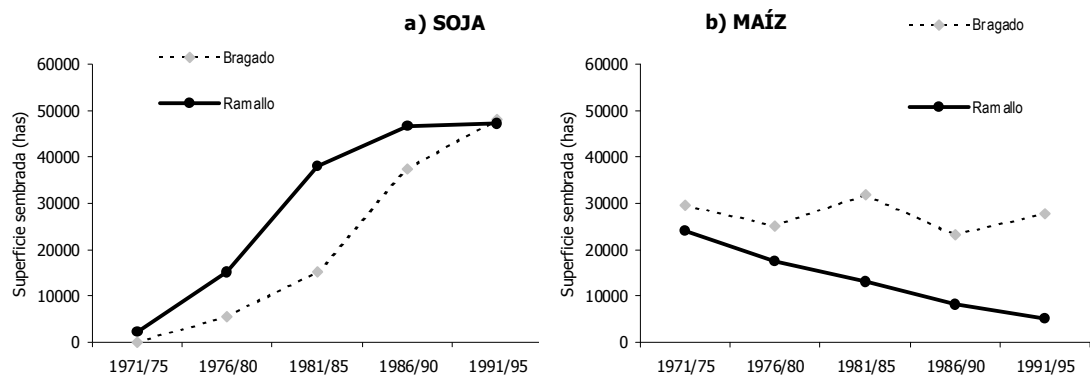


Figura 5.2. Evolución del área sembrada entre 1971 y 1995, para los cultivos de soja y maíz en dos sitios de muestreo (Proatlas, SAGPyA y CONICET, 1999).

En parte, el crecimiento en el área sembrada del cultivo de soja en esta región y en la mayoría de las provincias que integran el NOA y el NEA se debe a la aparición en el año 1996 de la soja transgénica, que permitió colonizar áreas marginales. Esto, sumado a que la soja parece ser el cultivo más rentable por su bajo costo en tecnología con precios de venta más que alentador y por último, la alta capacidad del cultivo de compensar los rendimientos frente a inclemencias climáticas, o impedancias físicas, crea la necesidad de responder a futuro ¿Cómo plantear una producción sustentable desde el punto de vista económico y productivo?

5.4. INTERROGANTES FUTUROS A RESPONDER:

En los suelos limosos pampeanos, con volúmenes de macroporos por debajo del umbral crítico de aireación necesario para el crecimiento de las raíces y teniendo en cuenta que los macroporos son los principales responsables de abastecer ese umbral, resultaría esencial:

- Conocer como afecta realmente esos bajos valores de macroporosidad a la aireación del suelo y a su vez como incide en el rendimiento relativo de los cultivos de invierno (trigo) y verano (maíz); y cuanto afecta el sistema de labranza utilizado.
- Evaluar la tasa de recuperación bajo siembra directa de acuerdo al nivel de degradación inicial de los suelos. Esto permitirá predecir con una cierta

exactitud el número de años posibles para observar una recuperación cuantificable.

- Redefinir para los principales cultivos y suelos presentes en la región pampeana, los umbrales críticos (% de Macroporos, Compactación Relativa% y Resistencia a la Penetración) para el óptimo crecimiento de las raíces de los principales cultivos de región pampeana. Ello, sin duda, mejorará la predicción en el diagnóstico de la fertilidad física de los suelos de región pampeana.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alberts E.E. y Wendt R.C. 1985. Influence of soybean and corn cropping on soil aggregate size and stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1534-1537.
- Alvarez R., Diaz R.A., Barbero N., Santanatoglia O.J. y Blotta L. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass and C-CO₂ production from three tillage systems. *Soil and Tillage Research.* 33: 17-28.
- Alvarez R., Alvarez C.R. 2000. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 184-189.
- Alvarez R., Russo M., Prystupa P., Scheiner J., y Blotta L. 1998. Soil carbons pools under conventional no-tillage systems in the Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* 90: 138-143.
- American Society for Testing Materials (ASTM). 1982. Standard test methods for moisture relations using a 5,5 lb (2,5 kg) hammer and 12 inch (304,8 mm) drop. ASTM (Ed.), *ASTM Standards in Building Codes*, Philadelphia, 2: 836-842.
- A.A.P.R.E.S.I.D. 2001. Evolución del área sembrada en siembra directa. Cultivo de soja. www.aapresid.org
- Aragón A., García M.G., Filgueira R.R. y Pachepsky Y.A. 2000. Maximum compactability of Argentine soils from the Proctor test; The relationship

with organic carbon and water content. *Soil and Tillage Research*. 56: 197-204.

Arias N.M., De Battista J.J., Landi M.P., Cabeluzzi A. 1989. Relevamiento de estimadores de la fertilidad en suelos Vertisoles, Alfisoles e Intergrados del centro-oeste de Entre Ríos. *Bol. Téc. Serie Producción Vegetal* N°39. EEA INTA Concepción del Uruguay.

Arshad M.A., Franzluebbers A.J. y Azooz R.H. 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil and Tillage Research*. 53: 41-47.

Arvidsson J. y Hakansson I. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil and Tillage Research*. 39: 175-197.

Barbosa O.A., Taboada M. A., Rodriguez M.B. y Cosentino D.J. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*. 15: 81-86.

Barbosa, O. A., Taboada M. A., y Cosentino D.J. 1999. Contracción al secado de agregados en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*. 17: 1-7.

Bathke G.R. y Blake G.R. 1984. Effects of soybeans on soil properties related to soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1398-1401.

Ball-Coelho B.R., Roy R.C. y Swanton C.J. 1998. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil and Tillage Research*. 45: 237-249.

- Baver L.D. 1956. Physical properties of soils and tillage. In Soil Physics third edition, Wiley 11: 385-427.
- Benito, E. y Díaz-Fierros F. 1989. estudio de los principales factores que intervienen en la estabilidad estructural de los suelos de Galicia. An. Edafol. Agrobiol. 48: 229-253.
- Bennie A.T.P. y Botha F.J.P. 1986. Effect of deep tillage and controlled traffic on root growth, water use efficiency and yield of irrigated maize and wheat. Soil and Tillage Research. 7: 85.
- Bennie A.T.P. y Burger R.D.T. 1981. Root characteristics of different crops as affected by mechanical resistance in fine sandy soils. Proceedings of the 10th Congress of the Soil Science Society of South Africa, Technical Communication N° 180. Department of Agriculture, Pretoria.
- Black C.A. 1965. Methods of soil analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling. Black C.A. (Ed.). Agronomy N° 9. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin USA.
- Blake G.R. y Hartge K.H. 1986. Bulk density. En A. Klute (ed.) Methods of soils analysis, Part 1. 2nd. ed.. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin. Agronomy N° 9: 363-375.
- Bouma J. 1981. Comment on: Micro-, meso-, and macroporosity of soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 1244-1245.
- Bouma J. 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. Adv. Agron. 46: 1-37.

- Broder M.W., Doran J.W., Peterson G.A. y Fenster C.R. 1984. Tillage influence on spring populations of soil nitrifiers, denitrifiers and available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1060-1067.
- Bullock P., Newman, A.C., Thomasson A..J. 1985. Porosity aspects of the regeneration of soil structure after compaction. *Soil and Tillage Research.* 5: 325-342.
- Burke W., Gabriels D. y Bouma J. 1986. Soil structure assessment. A.A. Balkema, Rotterdam. 92pp.
- Busscher W.J., Frederick J.R. y Bauer P.J. 2000. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:999-1003.
- Campbell D.J., Dichinson J.W., Ball B.C. y Hunter R. 1986. Controlled seedbed traffic after ploughing or direct drilling under winter barley in Scotland, 1980-1984. *Soil and Tillage Research.* 8: 3-28.
- Cannell R.Q., Ellis F.B., Christian D.G., Graham J.P., Douglas J.T. 1980. The growth and yield of winter cereals after direct drilling, shallow cultivation, and ploughing on non-calcareous clays soils, 1974-8. *J. Agr. Sci. Cambridge* 94: 345-359.
- Carter, M.R. 1987. Physical properties of some Prince Edward Island soils in relation to their tillage requirement and suitability for direct drilling. *Can. J. Soil Sci.* 67: 473-487.
- Carter, M.R. 1988. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening in the tillage studies. *Can. J. Soil Sci.* 68: 657-668.

- Carter, M.R. 1990 a. Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity in cultivated loamy sand to loam soils. *Can. J. Soil Sci.* 15: 257-268.
- Carter, M.R. 1990 b. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.
- Chagas C.I., Marelli H.J., Santanatoglia O.J. 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol típico bajo tres sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo.* 12: 11-16.
- Cordone G.E. y Galantini JA. 1994. Simulación de la dinámica de los residuos de la cosecha de trigo bajo dos sistemas de labranza. In *Actas III Congreso Nacional de Trigo.* p 61-62. Bahía Blanca.
- Cosentino D.J. y Pecorari C. 2002. Limos de baja densidad: Impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo.* 20: 9-16.
- Cosentino D.J., Barbosa O.A. y Taboada M.A. 2000. Creación de porosidad en diferentes fases de degradación de un suelo limoso de la Pampa Ondulada, Argentina. Presentado al XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires.
- Damiano F., y Taboada MA. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedo-transferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo.* 18: 77-88.

- Danielson, S.E. y Shuterland, P.L. 1986. Methods of Soil Analysis. Part 1 - Physical and Mineralogical Methods. Second Edition. Agronomy N° 9. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin., 450-457.
- Degens B.P. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. Aust. J. Soil Res. 35: 431-459.
- De Boodt M. y De Leenheer D.F. 1958. Soil structure index and plant growth. Proc. Int. Symp. on Soil Structure. Medelingen. Van de Landbowhoge School. Ghent. 234-244.
- De Leenheer D.F. y De Boodt M. 1958. Determination of aggregate stability by change in mean weight diameter. Proc. Int. Symp. on Soil Structure. Medelingen. Van de Landbowhoge School. Ghent. 290-300.
- De maría I.C., Nnabude P.C. y Castro O.M. de. 1999. Long term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferrosol in Southern Brasil. Soil and Tillage Research. 51:71-79.
- Dexter A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. Soil and Tillage Research. 11:199-235.
- Dexter A.R. 1991. Amelioration of soil by natural processes. Soil Tillage Research. 20:87-100.
- Díaz-Zorita M. y Grosso G.A. 2000. Effects of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. Soil and Tillage Research. 54:121-126.

- Díaz-Zorita M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays L.*) productivity. *Soil and Tillage Research*. 54:11-19.
- Díaz-Zorita M., Duarte G.A. y Grove J.H. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 65:1-18.
- Domzal H., Glinski J., Lipiec J. 1991. Soil compaction research in Poland. *Soil and Tillage Research*. 19:99-109.
- Douglas, J.T., Jarvis M.G., Howse K.R. y Goss M.J. 1986. Structure of a silty soil in relation to management. *J. Soil Sci.* 37: 137-151.
- Douglas J.T., Koppi A.J. y Crawford C.E. 1998. Structural improvement in a grassland soil after changes to wheel-traffic systems to avoid soil compaction. *Soil Use and Management*, 14: 14-18.
- Edwards W.M., Shipitalo M.J, Dick W.A. y Owens L.B. 1992. Rainfall intensity affects transport of water and chemical through macropores in no-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 52-58.
- Edwards C.A. y Softy J.R.. 1978. The influence of arthropods and earthworm upon root growth of direct drilled cereals. *J. Appl. Ecology*. 15: 789-795.
- Edwards W.M., Shipitalo M.J. y Nortow L.D. 1988. Contribution of macroporosity to infiltration into a continuous corn no-tillage watershed: Implications for contaminant movements. *J. of Contaminant Hydrology*. 3:193-205.
- Ehlers W. 1975. Observations on earthworm channels and infiltration on tillage and untilled loess soil. *Soil Sci.* 119: 242-249.

- Elliot E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorous in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 627-633.
- Elliot E.T. 1998. Rationale for developing bio indicators of soil health. In (Eds): C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V. Gupta.. *Biological Indicators of Soil Health*. CABI, New York, USA. Pag.: 29-49
- Eriksson J., Hakansson I. y Danfors E. 1974. The effect of soil compaction on soil structure and crop yields, *Bull. N° 345*, Swedish Institute of Agricultural Engineering, Uppsala, 15.
- Etchevehere P.H. 1976. Normas de reconocimiento de suelos. 2° Edición. Departamento de Suelos, INTA. Publicación N° 152, 211 pp.
- Ferreras L.A., Costa J.L. y García F.O. 1999. Temperatura y contenido hídrico del suelo en superficie durante el cultivo de trigo bajo dos sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*. 17: 39-45.
- Ferreras L.A., Costa J.L., García F.O. y Pecorari C. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of southern "Pampa" of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 54: 31-39.
- Francis G. S., Cameron K.C. y Swift R. 1987. Soil physical conditions after six years of direct drilling or conventional cultivation on a silt loam soil in new Zealand. *Aust. J. Soil Res.* 25: 517-529.
- Franzluebbers A. J. y Arshad M.A. 1995. Water – stable aggregation and organic matter in four soils under conventional and zero tillage. *Can. J. Soil Sci.* 76: 387-393.

- Gibbs R.J. y Reid J.B. 1988. A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 8: 123-149.
- Glinski J. y Lipiec J. 1990. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. CRC Press, Inc. Boca Raton.
- Greenland D.J. 1981. Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.* 32, 301-322.
- Gupta S.C. y Allmaras R.R. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6: 65-100.
- Hakansson I. 1988. A method for characterizing the state of compactness of an arable soil, in impact of water and external forces on soil structure, *Catena*, Suppl. 11: 101.
- Hall A.J., Rebella C.M., Ghera C.M. y Culot J.P. 1992. Field-crop systems of the Pampas. En: Pearson CJ (Ed) "Field crop Ecosystems". Amsterdam-London-New York-Tokio, 413-450.
- Hamblin AP. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake. *Adv. Agron.* 38: 95.
- Hansen O., Zeljkovich V., Guevara E., González de G.C. y Blotta L. 1984. Sistemas de labranzas en la rotación triso/soja-maíz. I. Efecto sobre los rendimientos de maíz. In: *Actas III Congreso Nacional de Maíz*. pp. 174-180. AIANBA.
- Hill R.L., Horton R. y Cruse R.M. 1985. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution in two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1264-1270.

- Hill R.L. 1990. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 161-166.
- Horne D.J., Ross C.W. y Hughes K.A. 1992. Ten years of a maize/oats rotation under three tillage systems on a silt loam in New Zealand. 1. A comparison of some soil properties. *Soil and Tillage Research.* 22: 131-143.
- Hussain I., Olson K.R. y Ebelhar S.A. 1999. Impact of tillage and no till on production of maize and soybean on an eroded Illinois silt loam soil. *Soil and Tillage Research.* 52: 37-49.
- Hussain I., Olson K.R. y Siemens J.C. 1998. Long-term tillage effects on physical properties of eroded soil. *Soil Science.* 163: 970-981.
- INDEC, 2001. Encuesta Nacional Agropecuaria 2001. www.indec.gov.ar
- INTA. 1983. Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3360-20. Arroyo Seco-San Nicolás de los Arroyos. INTA-MAG Pcia. de Santa Fé. Buenos Aires.
- Ismail I., Blevins R.L. y Frye W.W. 1994. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 193-198.
- Johnson B.S., Erickson A.E. y Voorhees W.B. 1989. Physical conditions of a lake plain soil as affected by deep tillage and wheel traffic. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1545-1552.
- Kay B.D. y VandenBygaart A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research.* 66: 107-118.

- Kay B.D. y Dexter A.R. 1990. Influence of aggregate diameter, surface area and antecedent water content on the dispersibility of clay. *Can. J. Soil Sci.* 70:655-672.
- Kemper W.D. y Rosenau R.C. 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1001-1006.
- Kladivko E., Mackay A.D. y Bradford J.M. 1986. Earthworms as a factor in the reduction of soil crusting. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 191-196.
- Klute A. 1985. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: A Review. *In: Predicting tillage effects on soils physical properties and processes.* ASA Special Pub. N°44, 29-43.
- Klute A. 1986. Methods of soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods 2^{ed}. Klute A. (Ed.). *Agronomy* N° 9. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin USA.
- Krüger H.R. 1996. Compactación en Haplustoles del sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo.* 14: 104-106.
- Lal R.D. 1974. No-tillage effects on soil properties and maize (*Zea mays* L.) production in Western Nigeria. *Plant and Soil.* 40: 321-331.
- Lal R.D. 1976. No-tillage effects on soil properties under different crops in Western Nigeria. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 40: 762.

- Lal R.D. 1986. Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained production. *Adv. Soil Sci.* 5: 1-109.
- Leiva D. y Hansen O. 1984. Sistemas de labranza en la rotación trigo-soja-maíz. III. Las resistencias mecánicas del suelo y el desarrollo radicular del cultivo de maíz. 3er Congreso Nacional del Maíz, Pergamino: 188-200.
- Logan T.J., Lal R. y Dick W.A. 1991. Tillage systems and soil properties in North America. *Soil and Tillage Research.* 20: 241-270.
- Logson S.D., Allmaras R.R., Nelson W.W. y Voorhees W.B. 1992. Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads. *Soil and Tillage Research.* 23: 95-110.
- Madonni G.A., Urricariet S, Ghersa C.M. y Lavado R.S. 1999. Assessing soil quality in the Rolling Pampa (Argentina), using soil properties and maize characteristics. *Agron. J.* 91:2, 280-287; 40 ref.
- Marelli H. y Lattanzi A. 1990. Sistemas de labranzas conservacionistas y secuencias de cultivo para soja. *Actas Jornadas de Actualización Profesional en Cultivos de Cosecha Gruesa:* 8-15.
- Mariinissen J.C.Y. 1994. Earthworm populations and stability of soil structure in a silt loam soil of a recently reclaimed polder in the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems and Environments.* 51, 75-87.
- Massé J. 1982. Enracinement, une méthode de mesure sur le terraiges. *Perspectives Agronomie* 59:56-60.
- Mayaki W.C, Teare I.D. y Stone L.R. 1976. Top and root growth of irrigated and nonirrigated soybeans. *Crop Sci.* 16: 92-95.

- Michelena R.O., Irurtia C.B., Pittaluga A., Vavruska F. y Sardi M.E. B. de. 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*. 6: 60 -66.
- Miller J.J., Sweetland N.J., Larney F.J. y Volkmar KM. 1998. Unsaturated hydraulic conductivity of conventional and conservation tillage soils in southern Alberta. *Can. J. of Soil Sci.* 78: 643-648.
- Miller J.J., Larney F.J. y Lindwall C.W. 1999. Physical properties of a Chernozemic clay loam soil under long-term conventional tillage and no-till. *Can. J. of Soil Sci.* 79: 325-331.
- Munkholm L.J., Schjonning P., Rasmussen K.J. y Tanderup K. 2003. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. *Soil and Tillage Research*. 71: 163-173.
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56: 377-400.
- Onstad C.A., Voorhees W.B. y Randall G.W. 1987. Hydraulics soil parameters affected by tillage. p. 96-112. En Logan T.J.(ed). *Effects of conservation tillage on groundwater quality: Nitrates and pesticides*. Lewis Publ. Chelsea, MI.
- Panigatti J.L., Marelli H., Buschiazzo D. y Gil R. 1998. *Siembra Directa*. S.A.G.P. y A. y el I.N.T.A.
- Pecorari C., 1988. Características físicas de las fracciones granulométricas de los horizontes superficiales de un Argiudol típico (serie Pergamino). Informe Técnico N°220. INTA EEA Pergamino.

- Pecorari C., Guerif J. y Stengel P. 1990. Fitólitos en los suelos pampeanos: influencias sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo*. 8: 135-141.
- Perroux K.M. y White I. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1205-1215.
- Petre A. de. 2000. Descripción y características especiales de los Vertisoles de Entre Ríos. 1^{er} Simposio Nacional de Suelos Vertisólicos, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina. Octubre 1999. *Revista de la Facultad de Agronomía, UBA*. 20: 7-13.
- Pidello A., Perotti E.B.R., Chapo G.F. y Menéndez L.T. 1995. Materia orgánica, actividad microbiana y potencial redox en dos Argiudoles típicos bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del Suelo*. 13: 6-10.
- Pierce F.J., Fortin M.C. y Staton M.J. 1992. Immediate and residual effects of zone tillage in rotation with no tillage on soil physical properties and corn performance. *Soil and Tillage Research*. 24: 149-165.
- Pilatti M.A., Orellana J.A., Priano L.J., Felli O.M. y Grenon D.A.. 1988. Incidencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de un Argiudol del sur de Santa Fé. *Ciencia del Suelo*. 6: 19-29.
- Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Entre Ríos. 1980. Suelos y erosión de la provincia de Entre Ríos. Serie Relevamiento de Recursos Naturales N°1. EEA INTA Paraná.
- Powers W.L., Baer J.U. y Skopp J. 1992. Alternative soil water release parameters for distinguishing tillage effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 873-878.

- Prieksat M.A., Kaspar T.C. y Ankey M.D. 1994. Positional and temporal changes in pond infiltration in a corn field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 181-184.
- Programa Atlas Permanente del Desarrollo Territorial de la Argentina (PROATLAS). CONICET. 1999. Atlas Agrícola. Tablas de Área sembrada por departamento del cultivo de maíz y soja (1971-75 hasta 1991-95). <http://www.conicet.gov.ar/webue/proatlas/ATLAS/>
- Quiroga A.R., Ormeño O. y Peinemann N. 1998. Efectos de la siembra directa sobre propiedades físicas de los suelos. En *Siembra Directa*. Panigatti J.L., Marelli H, Buschiazzo D, Gil R (Ed). SAGP y A. – INTA, pag 57-63.
- Quiroga A.R., Buschiazzo D.E. y Peinemann N. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil and Tillage Research.* 52: 21-28.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L. y Soni B. 1983. Agricultural management effects on soil water processes. *In: Soil water retention and infiltration parameters.* Trans. ASAE 26: 1747-1752.
- Reynolds W.D., Gregorich E.G. y Curnoe W.E. 1995. Characterization of water transmission properties in tilled and untilled soils using tension infiltrometers. *Soil and Tillage Research.* 33: 117-131.
- Rhoton F.E. 2000. Influence of time on soil response to no-till practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 2: 700-709.
- Rusell R.S. 1978. Cultivation, soil conditions and plant growth in temperate agriculture. *In: Modification of Soil Structure*, Emerson, WW, Bond, RD and Dexter , AR (Eds), John Willey & Sons, New York, 353 pp.

- Sadras V., Calviño P.A. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize sunflower and wheat. *Agronomy J*, 93, 577-583.
- S.A.G.Y P. – C.F.I., 1996. El deterioro de las tierras en la República Argentina. Alerta amarillo. Buenos Aires.
- Salazar Lea Plaza J.C. y Moscatelli G. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500 000. SAGyP - INTA, Buenos Aires. 527 p.
- Santanatoglia O.J. y Fernández N.R. 1983. Estabilidad estructural y contenido de gomas microbianas, bajo distintos tipos de manejo, en un suelo de la Serie Ramallo (Argiudol vértico). *Ciencia del Suelo*. 1: 43-49.
- SAS Institute. 1999. SAS/STAT User's Guide. SAS Inst. Cary, NC.
- Sasal C. 2003. Cualidades del sistema poroso que condicionan la dinámica del agua bajo siembra directa continua en Argiudoles de la pampa ondulada. Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, UBA.
- Scheiner J.D., Alvarez Renzi D.F., Lavado R.S. y Torri S.I. 1997. Efecto de la fertilización fosforada y nitrogenada en soja, en el centro-oeste bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo*. 15: 36-38.
- Scheiner J.D., Gutierrez Boem F.H. y Lavado R.S. 2000. Root growth and phosphorous uptake in wide- and narrow-row soybeans. *J. Plant Nutr.* 23: 1241-1249.
- Schoonderbeek D. y Schoute I.F. 1994. Root and root-soil contact of winter wheat in relation to soil macroporosity. *Agr. Ecos. Environm.* 51: 89-98.

- Senigagliaesi C. y Ferrari M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. *International Crop Science I.* (Eds: Buxton, D.R.; Shibles, R.; Forsberg, R.A.; Blad, B.L.; Asay, K.H.; Paulsen, G.M.; Wilson, R.F.) Crop Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA: 27-35.
- Shipitalo M.J., y Protz R. 1987. Comparison of morphology and porosity under conventional and zero tillage. *Can. J. Soil Sci.* 67: 445-456.
- Soane B. D. y Vanouwerkerk C. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. *In: Soil compaction in crop production.* (Eds: Soane B. D. y Vanouwerkerk C.). *Developments in Agricultural Engineering*, 11). Elsevier Science Publ. B V, Netherlands, 1-21.
- Soane B. D. y Ball B. C. 1998. Review of management and conduct of long-term tillage studies with special reference to a 25 yr. Experiment on barley in Scotland *Soil and Tillage Research.* 45: 17-37.
- Stengel P., Douglas P., Guerif J.T., Goss M.J., Monnier M. y Cannell R.Q. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. *Soil and Tillage Research.* 4: 35-53.
- Stone L.F. y Silveira P.M-da. 1999. Effects of type of site preparation on soil compaction, soil water availability, and response of beans. *Pesquisa Agrop. Brasileira*, 34: 83-91.
- Taboada M. A, Micucci F.G., Cosentino D.J. y Lavado R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research.* 49: 57-63.
- Taboada M.A., Folcia A.M., Rodriguez M.B., Cosentino D.J. y Godeas A.M. 2000. Relación entre porosidad y biota en suelos pampeanos no cultivados.

Presentado al XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires.

Taylor H.M., Parker J.J., y Robertson G.M. 1966. Soil strength and seedling emergence relations. II_ A generalized relation for Gramineae. *Agron. J.* 58: 393-396.

Taylor H.M. y Gardner H.R. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.* 96: 153-156.

Taylor H.M. y Burnet E. 1964. Influence of soil strength on the root – growth habits of plants. *Soil Sci.* 98: 174-180.

Tebrügge F. y Düring R.A. 1999. Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research.* 53: 15-28.

Thomas G.W., Hazsler G.R y Robins R.L. 1996. The effects of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the Proctor test. *Soil Sci.* 161: 502-508.

Tisdall J.M. y Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.

Totis de Zeljkovich L.E., Zeljkovich V.J., Blotta L. y Hansen O. 1993. Evaluación de sistemas de manejo continuado. II Efecto sobre los rendimientos del cultivo de trigo integrando la secuencia maíz-trigo/soja en un suelo Argiudol típico de Pergamino (Bs.As.). XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Trabajos y Comunicaciones Resumidos. 311-312.

- Towner G.D. 1987. The mechanisms of cracking of drying clay. *J. Agric. Eng. Res.* 36: 115-124.
- Towner G.D. 1988. The influence of sand and silt-size particles on the cracking during drying of small clay-dominated aggregates. *J. Soil Sci.* 39: 347-356.
- Unger P.W. 2002. Conservation tillage for improving dryland crop yields. *Ciencia del Suelo.* 20: 1-8.
- Unger P.W. 1990. Conservation tillage systems. *Adv. Soil Sci.* 13: 27-68.
- Urricariet S. y Lavado R.S. 1999. Indicadores del deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo.* 17: 37-44.
- VandenBygaart A.J., Protz R. y Tomlin A.D. 1999. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, southern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 79: 149-160.
- Vázquez M.E., Berasategui L.A., Chamorro E.A., Taquini L.A. y Barberis L.A. 1990. Evolución de la estabilidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la Pradera Pampeana. *Ciencia del Suelo.* 8: 203-210.
- Voorhees W.B. y Lindstrom M.J. 1984. Long-term effects of tillage method on soil tilt independent of wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 152-156.
- Wambeke A. van y Scoppa C.O. 1980. Las taxas climáticas de los suelos argentinos. Determinación de las definiciones del Soil Taxonomy, utilizando el modelo matemático de Newhall y computación en Fortran. *Revista de Investigaciones Agropecuarias, Serie 3, (1976-77), 13, N°1; 3.*

- Wester D.B. 1992. Viewpoint: Replication, randomisation, and statistics in range research. *J. Range Manage.* 45: 285-290.
- White R.E 1985. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. *Adv. Soil Sci.* 3: 95-120.
- White I. 1988. Tillage practices and soil hydraulic properties: Why quantify the obvious? In "Proceedings of National Soil Conference, Review Papers". (Ed J. Loveday). pp. 87-126 (*Aust. Soc. Soil Sci.*)
- White I. y Perroux K.M. 1989. Estimation of unsaturated hydraulic conductivity from field sortivity measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1205-1215.
- White I. y Sully M.J. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and times scales from field infiltration. *Water Resour. Res.* 23: 1514-1522.
- Wilson M.G., Quintero C.E., Boschetti N.G., Benavides R.A., y Mancuso W.A. 2000. Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Rev. Facultad de Agronomía (UBA)* 20:23-30.
- Yusuf R.I., Siemens J.C. y Bullock D.G. 1999. Growth analysis of soybean under no-tillage and conventional tillage systems. *Agron. J.* 91: 928-933.
- Zeljkovich L.T. 1992. Evaluación de sistemas de labranza continuados. 1. Efectos sobre los rendimientos en cultivos de maíz integrando la secuencia maíz-trigo-soja. INTA, EEA Pergamino. Carpeta de Producción Vegetal, tomo XI. Información N° 107.

ANEXOS DE LA TESIS

1. Relación entre compactibilidad, textura y el carbono orgánico

Localidad	Situación	dummy1	dummy2	arena	limo	arcilla	CO(0-5)	CO(5-10)	Dmax
Bragado	PRI	0	0	571	165	264	21.86	15.76	1.39
Bragado	LC	1	0	667	121	212	9.51	8.97	1.54
Bragado	SD	0	1	550	197	253	11.59	11.49	1.49
Bragado	SD11	0	1	791	74	136	9.60	8.80	1.61
Pérez Millán	PRI	0	0	134	501	365	20.92	18.01	1.42
Pérez Millán	LC	1	0	134	531	335	15.24	14.81	1.56
Pérez Millán	SD	0	1	117	539	344	18.84	15.39	1.40
Uranga	PRI	0	0	135	542	323	34.50	25.05	1.36
Uranga	PRI	0	0	119	617	264	23.70	23.70	1.38
Uranga	SD	0	1	113	619	268	18.50	15.62	1.35
Uranga	SDd	0	1	105	657	238	16.42	11.84	1.42
Uranga	LC	1	0	73	679	248	16.54	15.65	1.46
Uranga	LC	1	0	151	573	277	14.20	14.80	1.55
Concordia	PRI	0	0	149	482	369	35.52	23.65	1.34
Concordia	LC	1	0	90	574	336	21.89	20.49	1.48
Concordia	SD	0	1	114	565	321	25.48	24.94	1.34

COMPARISON OF REGRESSION LINES FOR RAICES = PROF

SITIO	N	INTERCEPT	SLOPE	MSE
1	54	0.29148	-0.00711	0.00142
2	30	0.36587	-0.01138	0.00169
3	24	0.19733	-0.00180	0.00227
4	36	0.38900	-0.01266	0.00147

CHI-SQ DF P
BARTLETT'S TEST OF EQUAL VARIANCES 2.01 3 0.5701

	F	DF	P
COMPARISON OF SLOPES	30.72	3, 136	0.0000
COMPARISON OF ELEVATIONS	0.01	3, 139	0.9995

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF RAICES

PREDICTOR

VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P
CONSTANT	0.31567	0.00971	32.51	0.0000
PROF	-0.00850	4.986E-04	-17.05	0.0000

R-SQUARED	0.6719	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.00261
ADJUSTED R-SQUARED	0.6696	STANDARD DEVIATION	0.05109

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	1	0.75905	0.75905	290.81	0.0000
RESIDUAL	142	0.37064	0.00261		
TOTAL	143	1.12969			

CASES INCLUDED 144 MISSING CASES 0

COMPARISON OF REGRESSION LINES FOR RAICES = PROF

SITIO2	N	INTERCEPT	SLOPE	MSE
1	54	0.29148	-0.00711	0.00142
2	66	0.37848	-0.01208	0.00155
3	24	0.19733	-0.00180	0.00227

	CHI-SQ	DF	P
BARTLETT'S TEST OF EQUAL VARIANCES	1.89	2	0.3892

	F	DF	P
COMPARISON OF SLOPES	45.75	2, 138	0.0000
COMPARISON OF ELEVATIONS	0.01	2, 140	0.9941