

## CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE UN ARGUJUDOL VÉRTICO DE LA PAMPA ONDULADA CON EROSIÓN HÍDRICA EN EL SURCO Y ENTRESURCO

ALEJANDRO ESTEBAN MAGGI<sup>1\*</sup>; FILIPE BEHRENDTS KRAEMER<sup>1-2</sup>; RAFAEL MARIO INTROCASO<sup>1</sup>  
& DELFINA THOMPSON<sup>1</sup>

Recibido: 13-05-15

Recibido con revisiones: 09-11-15

Aceptado: 10-11-15

### RESUMEN

En la región pampeana, la erosión hídrica es uno de los principales causantes de la degradación de suelos. Se estudiaron los cambios en algunas características y propiedades físicas y químicas de un Argiudol vértico con erosión hídrica en el surco y entresurco, con y sin flujo concentrado. Se analizaron los cambios en los valores de carbono orgánico, granulometría, estabilidad estructural, densidad aparente y la profundidad del suelo hasta el límite superior del horizonte Bt como indicador de pérdida de suelo. Además se relacionaron algunas variables edáficas con el rendimiento del cultivo de soja. La intensidad de la erosión hídrica se expresó principalmente en la disminución del contenido de carbono orgánico total y la estabilidad estructural. Sin embargo, para la distinción entre los tipos de erosión en el surco (ES) y entresurco fue la profundidad hasta el límite superior del horizonte Bt el factor clave. La ES reduce en mayor medida la profundidad al horizonte Bt, generando características más adversas para el crecimiento vegetal. La merma de rendimientos en el cultivo de soja en el surco con respecto al entresurco, presentó un coeficiente de determinación positivo  $r^2=0,84$  y  $p < 0,0001$  y significativo con la profundidad hasta el límite superior del Bt. No se han detectado diferencias granulométricas resultantes en diferencias significativas entre ambos tipos de erosión.

**Palabras clave.** Carbono orgánico total, Densidad aparente, Horizonte Bt, soja.

### PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF A VERTIC ARGUJUDOLL AFFECTED BY RILL AND INTERRILL EROSION IN THE ROLLING PAMPA

#### ABSTRACT

In the Pampas region, water erosion is one of the main causes of land degradation. Changes in some physical and chemical characteristics and properties were studied in the rill and the interrill with water erosion, with or without concentrated flow in a Vertic Argiudoll. Changes in the values of organic matter, grain size, aggregate stability, bulk density and soil depth to the upper limit till the Bt horizon as an indicator of soil loss were analyzed. Furthermore, some soil variables were related with the soybean crop yield. The intensity of water erosion is mainly expressed in the reduction of total organic carbon content and aggregate stability. However, for the distinction between the rill and interrill erosion types, the depth of the upper boundary of the Bt horizon was the key factor. The reduce of the Bt horizon depth was higher because of the interrill, generating more adverse characteristics for plant growth. The decline in yields of the soybean cultivation in the rill respect to the interrill, showed a positive coefficient of determination,  $r^2 = 0.84$  and  $p < 0.0001$  with the depth of the upper limit of the Bt horizon. No significant differences in change of the percent of the different soil grains size were detected between the different types of water erosion.

**Key words.** Total organic carbon, Bulk Density, Horizon Bt, soybean.

<sup>1</sup> Cátedra Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

<sup>2</sup> Becario CONICET

\*Autor de contacto: maggi@agro.uba.ar

## INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es uno de los procesos de degradación más importantes, sin embargo no está suficientemente abordado en la Argentina, particularmente en las aéreas ocupadas por Molisoles en el sector del centro y noroeste del país (FAO, 1994). En la Pampa Ondulada, donde se concentra la mayor actividad agrícola del país, el 36% del área ya ha sido erosionado por el agua (SAGPYA, 1995). El 32% de la superficie está afectada por erosión hídrica moderada y severa, con pérdidas de 5 a 20 cm del horizonte A, en especial en el centro y el este y en zonas próximas a los ríos Arrecifes, Carcarañá, y arroyos Pavón y Del Medio, donde predomina la erosión hídrica severa a grave (GEO Argentina, 2004). La Pampa Ondulada se caracteriza por un paisaje con un sistema de drenaje bien definido, un relieve suavemente ondulado y gradientes del 2% al 5%, dominado por Argiudoles con elevados contenidos de limo en superficie. Si bien los Argiudoles típicos son los suelos dominantes en esta región y los más aptos para la actividad agrícola, los Argiudoles vérticos tienen una alta representatividad, principalmente en las márgenes del eje Paraná-Río de la Plata y son menos aptos para la agricultura que los anteriores, debido al alto contenido de minerales de arcilla expandibles en el material parental del suelo (Durán *et al.*, 2011).

Diversos autores han señalado que los suelos limosos conllevan a procesos de erosión y escurrimiento (Vermang, 2012; Roger Estrade *et al.*, 2011). Así, es de esperar que en los suelos de la región pampeana, con elevados contenidos de limos y fitolitos en el horizonte superficial, la fragilidad estructural sea alta (Wischmeier *et al.*, 1971; Pecorari *et al.*, 1988).

En esta región es posible observar en el terreno rasgos de degradación tales como horizontes A de menor espesor, surcos y cárcavas. Para el año 1988, Michelena *et al.*, ya describían procesos de erosión hídrica y degradación física de los suelos en dicha región causados por la agricultura continua. La erosión hídrica puede generar patrones de profundidad al horizonte argílico heterogéneos en su distribución espacial (Buján *et al.*, 2003), por lo cual se pueden visualizar, en cortas distancias, diferencias en el espesor del horizonte superficial. Esta modificación en el espesor del horizonte A puede ocasionar cambios en el contenido de carbono (Fenton *et al.*, 2005), en su textura (Tengberg *et al.*, 1997a, 1998) y en la estabilidad de los agregados (Gollany *et al.*, 1992), trayendo consecuencias negativas en los rendimientos agrícolas (Lal, 1998; Papiernik *et al.*, 2005).

La disminución en el contenido de carbono orgánico afecta negativamente la porosidad y la estabilidad estructural de los agregados (Le Bissonnais & Arrouays, 1997; Rhoton *et al.*, 2002). Fullen (1991) demostró que cuando los valores de materia orgánica son menores al 2%, el suelo se hace vulnerable a la erosión hídrica tanto por el proceso de desprendimiento por impacto de la gota de lluvia como por el escurrimiento. En síntesis, el escurrimiento de agua y la susceptibilidad a la erosión hídrica están estrechamente relacionados con la caída de materia orgánica y la estabilidad estructural. Además, la pérdida de carbono orgánico por erosión afecta la disponibilidad de nutrientes tanto directamente por la pérdida de nutrientes como fósforo y nitratos asociados a dicha fracción como indirectamente por la disminución de la capacidad de intercambio catiónico (Thompson *et al.*, 1989).

En las últimas décadas se produjo una importante expansión de la siembra directa (SD) en la región pampeana. Uno de sus objetivos fue el control de diferentes procesos de degradación de los suelos como la de disminuir la erosión y conservar su fertilidad (Hall *et al.*, 1992). Si bien algunos autores mencionan disminuciones en la erosión hídrica y en el escurrimiento bajo SD (De Ploey, 1988; Leys *et al.*, 2007), otros autores han encontrado incrementos de la erosión bajo dicho manejo (Martin, 1999; Roger Estrade *et al.*, 2011). Los últimos autores, atribuyen esto a la cobertura insuficiente, densificación del suelo o asentamiento del mismo "age hardening" (Utomo & Dexter, 1981). Además, en algunos trabajos se señala la importancia de considerar cambios en la intensificación del uso de suelo y de la secuencia agrícola como factores importantes en el control de la erosión hídrica (Sasal, 2012).

El proceso de erosión hídrica se manifiesta en tres formas: entresurcos (EES), surcos (ES) y cárcavas. La EES es espacialmente homogénea y su factor desencadenante es el desprendimiento por impacto de la gota de lluvia, mientras que la ES es localizada a las líneas de máxima pendiente donde se produce el corte por escurrimiento concentrado, cuando se concentra mayor volumen proveniente de los surcos y aumenta la velocidad del flujo se forman las cárcavas. El transporte y la sedimentación ocurren por salpicadura y escurrimiento superficial.

Mientras que la SD con una secuencia de cultivos diversificados ha demostrado en algunos casos disminuir la erosión entresurco, es cada vez más generalizada la ES. Esta, parecería estar asociada a la compactación del suelo, especialmente entre 5 y 10 cm de profundidad (Wander y

Bollero, 1999; De Battista, 2005; Alvarez *et al.*, 2009), provocando un mayor escurrimiento (Sasal, 2012).

Por todo lo expuesto, la erosión hídrica continúa siendo un problema ambiental y productivo importante en la región pampeana, aún bajo SD. Algunos de los artículos que estudian la ES, abordan la medición de transporte de sedimentos y la determinación de parámetros hidráulicos y su relación con las fórmulas usadas en los modelos de erosión de suelos (Wirtz *et al.*, 2013). En otros trabajos se busca la comprensión de los mecanismos que operan durante el flujo concentrado y que afectan el consumo de agua y la ES (Yu *et al.*, 2007). A pesar de ello, no son abundantes los estudios de los efectos de la erosión hídrica en la calidad del suelo. Si bien existen trabajos que estudian el proceso de ES, aún no se han desarrollado muchos estudios a campo que midan cambios en las propiedades de los suelos y que caractericen los surcos provocados por la erosión hídrica.

La caracterización de los sectores de surco y entresurco es relevante para comprender la producción y el tipo de sedimento generado. Tanto la calidad como la cantidad de dicho sedimento es importante en el estudio de procesos de transporte de contaminantes químicos como de contaminantes biológicos (Kraemer *et al.*, 2013; Kraemer *et al.*, 2013b; Chagas *et al.*, 2010). La erosión hídrica laminar incrementa la fracción de partículas primarias gruesas en el suelo remanente, mientras que remueve selectivamente a las fracciones finas, materia orgánica y nutrientes asociados a los coloides (Mathan & Kannan, 1993). Los sedimentos producidos y recogidos en la descarga de un surco son de composición similar al suelo que le dio origen. Sin embargo, dentro del surco y en su eje medio pueden existir otras granulometrías debido a cambios en la resistencia de corte provocados por un cambio en la secuencia de horizontes y grado de la pendiente. El objetivo de este trabajo fue analizar los cambios en algunas propiedades físicas y químicas de un Argiudol vértico bajo los efectos de la erosión hídrica en el surco y entresurco, en un sistema de SD. Para la concreción de este objetivo previamente se caracterizó el surco. Se analizaron los cambios en los valores de carbono orgánico, textura y estabilidad estructural y la profundidad del suelo hasta el límite superior del horizonte Bt como indicador de pérdida del horizonte A. Se evaluó también la densidad aparente en el entresurco y en el surco, la planimetría correspondiente al perfil del surco y se relacionaron algunas variables con la estimación del rendimiento del cultivo de soja.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Caracterización del sitio de muestreo

El trabajo se realizó en un lote sembrado con soja ubicado en la localidad de Vuelta de Obligado en el partido de San Pedro, provincia de Buenos Aires y dentro de él se realizó un levantamiento topográfico y edafológico de un surco y el entresurco asociado. El suelo evaluado corresponde a un Argiudol vértico perteneciente a la unidad cartográfica Ramallo 14 -consociación entre la serie Ramallo 80% y la serie Cañada Honda 20% (INTA, 1972 y 1973). El uso del suelo corresponde a agricultura continua bajo SD (>10 años), con una frecuencia de cultivo de soja superior al 80%. El lote en estudio posee una pendiente aproximada de 1,5%; es atravesado en diagonal por un surco activo de aproximadamente 250 m de longitud y un ancho regular de 20 m, de muy poca profundidad que varía entre 10 y 30 cm (Fig. 1a) permitiendo la siembra, cosecha y los labores requeridos por los cultivos. El mismo posee una pendiente principal del terreno hacia el arroyo Los Cueros (Fig. 1b).

### Diseño experimental

El muestreo fue realizado en otoño. La planimetría del área del surco se realizó con nivel de anteojo y se construyeron perfiles longitudinales y transversales para caracterizar el mismo. El muestreo se realizó de manera similar al utilizado por Apezteguía *et al.* (1987), que avanzando en forma paralela al surco tomaron muestras para cada cota en forma perpendicular a su eje medio en el fondo y costado del mismo. En las posiciones surco y entresurco se establecieron 12 puntos de muestreo en intervalos regulares de 25 metros (Fig. 1a). En cada punto se determinó la profundidad al horizonte Bt, por ser una variable que por su textura y color, es de fácil y rápida identificación. Para esos mismos puntos se determinó el rendimiento de cosecha del cultivo de soja mediante cosecha a mano (1 m<sup>2</sup>) posteriormente se secó, trilló y pesó para determinar el rendimiento en grano. Se tomaron muestras para determinar la densidad aparente (DAP) de 0-20 cm en 11 puntos (3 repeticiones) para cada tipo de erosión (Blake & Hartge, 1986). La DAP testigo asimismo fue evaluada en una situación casi prístina (n=3) debajo del alambrado con vegetación natural dominada por gramíneas.

Por otro lado, a partir de estos 24 puntos de muestreo a lo largo del surco y en el entresurco, se establecieron 4 sectores de muestreo coincidentes con quiebres o cambios de pendiente del terreno. Estos sectores fueron definidos de acuerdo a su gradiente con respecto al terreno (pendiente transversal al surco) (B: Bajo gradiente y A: alto gradiente) y a la longitud del surco (distancia relativa entre el comienzo del surco y la zona de descarga) (C: surco corto y L: surco largo), (Fig. 1a, Tabla 1). De esta forma los sectores quedaron definidos como B\_L, A\_L, A\_C y B\_C para ES y EES (Fig. 1a). En estos sectores defi-

Tabla 1. Caracterización de las diferentes posiciones topográficas de muestreo. B\_C: bajo gradiente, surco corto; A\_C: alto gradiente, surco corto; A\_L: alto gradiente, surco largo y B\_L: bajo gradiente, surco largo. Table 1. Topographic characterization of the different sampling positions. B\_C: low slope, shorter rill; A\_C: steep slope, shorter rill; A\_L: steep slope, rill of longer distance and B\_L: low slope, rill of longer distance.

Sector de muestreo	Gradiente (%)	Longitud del surco (m)
B_C	1,25	50
A_C	1,55	100†
B_L	1,27	75
A_L	1,60	112,5†

† Corresponde a la longitud acumulada.

nidos se tomaron muestras de suelo de 0-20 cm, para determinar la granulometría (Bouyoucous, 1962), el carbono orgánico oxidable total (COT) (Black *et al.*, 1965) y la inestabilidad estructural (IE) (De Leenheer & De Boodt, 1967). Todas las variables evaluadas en cada sector y cada punto dentro del mismo fueron determinadas con tres repeticiones.

### Análisis estadísticos

Para evaluar los efectos de los distintos tipos de erosión (EES y ES) y los sectores de muestreo (A\_L, A\_C, B\_L y B\_C) (factorial 2x2) sobre las variables físicas y químicas se realizaron análisis de varianza (ANOVA, Snedecor & Cochran, 1980). Cuando se encontraron diferencias significativas se aplicó el test de Tukey con un  $p=0,05$ . Además se establecieron correlaciones de Pearson y regresiones simples entre las variables medidas. Debido a que cada tipo de erosión y cada sector de muestreo no poseen repeticiones verdaderas, el experimento posee pseudoréplicas para inferir la relación entre las variables físicas y químicas y dichos factores a escala local (Hurlbert, 1984). Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el programa Infostat/P v1.1, 2002. Todos los supuestos normalidad y homocedasticidad de la variancia fueron corroborados y ninguna variable debió ser transformada.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características generales del surco

El surco de erosión presentó un área de 1,3 ha que representa un 16% del lote bajo estudio (7,7 ha). En el área el surco evaluado (0,5 ha), al comparar la cota de los puntos a lo largo del surco se observó que existen variaciones, encontrándose dos ramas principales, la primera del punto 1 al 4 con menor pendiente y más corta, y la segunda del punto 6 al 12 representando un tramo más largo y de mayor

pendiente. En el punto 5 donde la cota hace un pico se observó algo de sedimentación que acompaña a la pendiente (Fig. 1a).

Se debe destacar que el ancho del surco fue constante en todo el trazado del mismo (Fig. 1a). Esto responde al número de Froude, en donde, para flujo de descargas incrementales, solo una parte del incremento se transmite en el aumento del ancho del surco. El resto del incremento se tiene que adecuar a través de la velocidad del flujo y la profundidad del mismo (Gimenez & Govers, 2001). Esto explicaría porque el surco presenta una profundidad variable 10-30 cm, incrementándose en posiciones de mayor pendiente pero mantiene un ancho constante.

### Granulometría

No se encontraron diferencias significativas en la granulometría entre las muestras provenientes del surco y entresurco (Tabla 2). Sin embargo en promedio se observó que el contenido de arcillas del entresurco fue apenas menor con respecto al surco, mientras que el contenido de arenas también fue menor (Tabla 2).

Las únicas diferencias se encontraron entre los distintos sectores de muestreo donde se observaron para cada fracción granulométrica una interacción sector de muestreo x tipo de erosión ( $p<0,05$ ) (Tabla 2). Así se pudo determinar que los sectores de alto gradiente en el entresurco (A\_L y A\_C) presentaron contenidos de arcillas mayores, El movimiento de suelo en la pendiente por desprendimiento de la gota de lluvia es mínimo, la mayoría se mueve por flujo superficial y este se incrementa con la longitud y el gradiente de la pendiente (Young & Wiersma, 1973).

Los resultados para el sector de A\_C son similares a los descriptos por Meyer *et al.* (1975), y Monke *et al.* (1977), quienes trabajando con pendientes similares sugieren que el sedimento en el entresurco se enriquece en arcillas. Este proceso estaría favoreciendo igualmente las pérdidas de materia orgánica. En cambio en los sectores B\_C y B\_L probablemente el proceso dominante en el entresurco sea la erosión laminar, donde el menor gradiente de la pendiente facilita la pérdida de arcillas respecto de la fracción limo, probablemente por la formación de una lámina superficial cuando la capacidad de infiltración del suelo se vea superada. En un muestreo estratificado cada 5 cm, probablemente se observe que las pérdidas de material fino en superficie sean aún mayores dentro de los primeros centímetros de suelo, modificando la textura y dejando al suelo más inestable y con mayor facilidad de sellamiento dificultando el

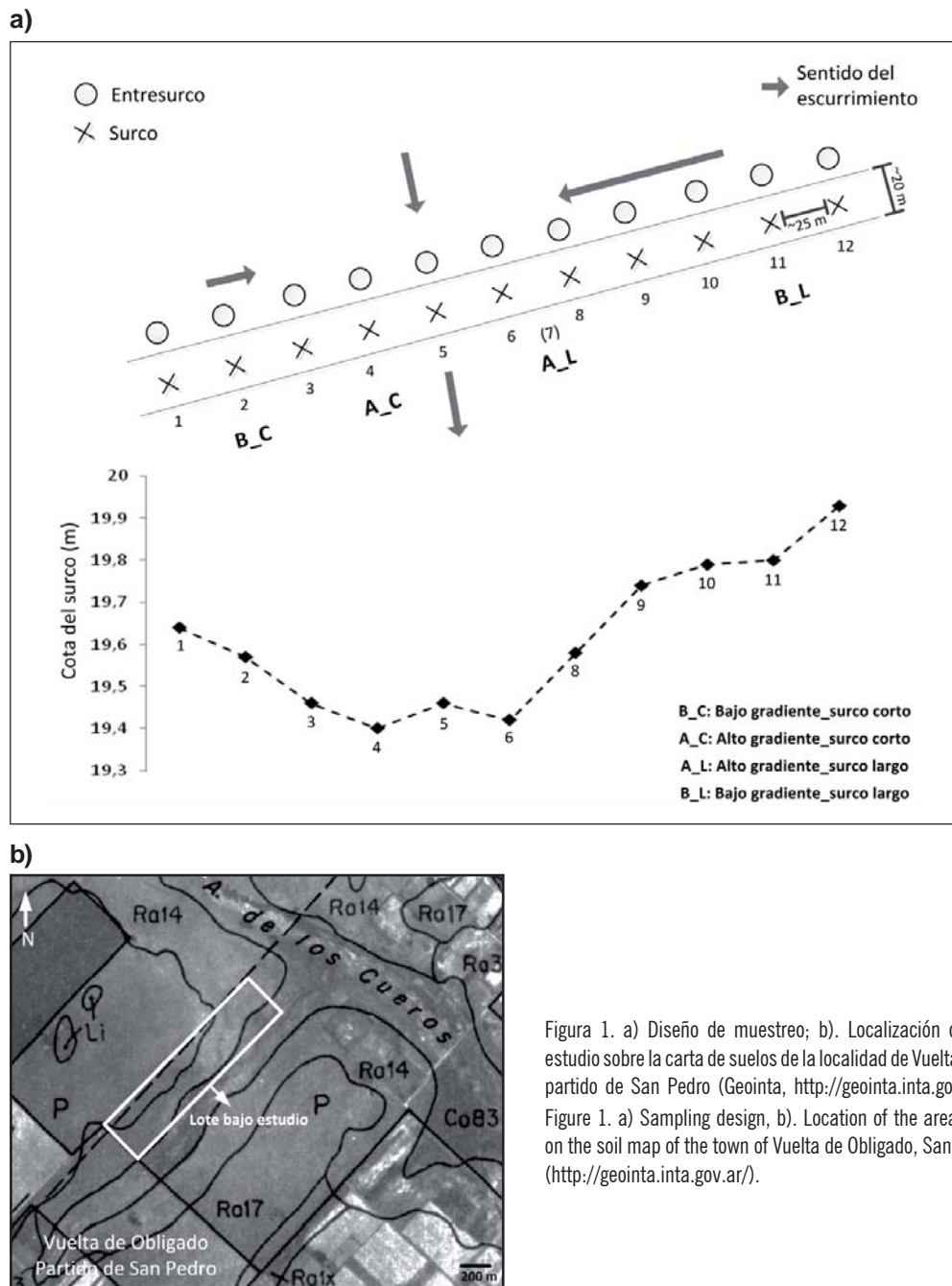


Figura 1. a) Diseño de muestreo; b). Localización del área bajo estudio sobre la carta de suelos de la localidad de Vuelta de Obligado, partido de San Pedro (Geointa, <http://geointa.inta.gov.ar/>).

Figure 1. a) Sampling design, b). Location of the area under study on the soil map of the town of Vuelta de Obligado, San Pedro county (<http://geointa.inta.gov.ar/>).

establecimiento de las semillas en futuras siembras. En el entresurco las porciones del terreno más elevadas y con menor gradiente estarían aportando arcillas hacia los sectores de cotas más bajas.

La EES posee menor capacidad de transporte y el origen del material es superficial provocando una modificación de la textura, mientras que en la ES el material provie-

ne principalmente del socavado de la pared del surco; es por esto que los sedimentos en este tipo de erosión podrían ser muy similares a las de las características originales del suelo en cuanto a su composición textural en la descarga (Meyer, 1984; Sharpley, 1985). Sin embargo, debido a las diferencias correspondientes a la sectorización del surco y entresurco se evidencian diferencias en el contenido de

arcillas que determinarían comportamientos diferenciales en el transporte y origen de los materiales a lo largo del mismo provocado por los cambios de la pendiente, que inciden en la velocidad del flujo, para ambos tipos de erosión.

En el surco este incremento en las arcillas fue comprobado únicamente en A\_L. En este sector se observó un incremento en el contenido de arcillas cercano al 50% respecto de lo observado al inicio del surco (13,8%), lo cual podría ser explicado por la baja cota de este punto de descarga y por pertenecer a sector del surco de mayor longitud. Así se depositaría una mayor cantidad de materiales más finos y livianos.

Resultados similares a lo observado en el sector (A\_L) del surco (Tabla 2), pudo encontrarse en el trabajo de Young & Onstad (1978) donde muestran una tendencia a la migración de los materiales más finos hacia el surco cuyo sedimento estaba enriquecido en la fracción arcilla. En condición erosionada, no se podría descartar que parte del horizonte BA sea incorporado a la muestra modificando el contenido de arcillas. En ensayos futuros, la realización de

un muestreo estratificado que considere solo los primeros 5 cm podría confirmar estos resultados, teniendo en cuenta la escasa profundidad hallada hasta el horizonte Bt.

Por su parte, la fracción arena presentó una menor diferenciación entre los tipos de erosión y sectores de muestreo, mientras que en la fracción limo, el comportamiento de cada sector fue notoriamente dependiente del gradiente de la pendiente, cuando este es elevado, se favorece su movimiento (Tabla 2).

### Profundidad al horizonte Bt

En primer lugar se puede observar en el entresurco una disminución de la profundidad a la que se encuentra el horizonte Bt desde el sector más alto del lote hacia el sector más bajo del área analizada (Fig. 2). La profundidad hallada en todos los puntos hasta el horizonte Bt siempre fue menor al descrito en el perfil modal (40 cm).

Asociado a este comportamiento, para toda la transecta evaluada, la profundidad hasta el límite superior del horizonte Bt en el surco es menor a la del entresurco (Tabla 3, Fig. 2). Para esta variable se encontró una interacción

Tabla 2. Granulometría de los diferentes sectores de muestreo (B\_C: bajo gradiente, surco corto; A\_C: alto gradiente, surco corto; A\_L: alto gradiente, surco largo y B\_L: bajo gradiente, surco largo) para el entresurco y el surco. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas para el promedio del surco y entresurco. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para la interacción tipo de erosión x sector de muestreo ( $p < 0,05$ ).

Table 2. Particle-size distribution of the different sampling area (B\_C: low slope, shorter rill; A\_C: steep slope, shorter rill; A\_L: steep slope, rill of longer distance and B\_L: low slope, rill of longer distance) in rill and interrill. Different uppercase letters indicate significant differences for the average of rill and interrill. Different lowercase letters indicate significant differences between the interaction erosion type x sampling area ( $p < 0.05$ ).

Tipo de erosión	Sectores de muestreo	Granulometría		
		Arcilla ( $< 2 \mu m$ )	Limo ( $2-50 \mu m$ )	Arena ( $> 50 \mu m$ )
(%)				
Entresurco EES	B_C	15,8 (1,3) c	75,2 (0,8) a	9,1 (1,0) b
	A_C	20,0 (1,0) ab	66,6 (1,9) c	13,5 (1,9) a
	A_L	16,3 (1,1) bc	72,9 (1,1) ab	10,9 (1,8) ab
	B_L	15,0 (1,3) c	73,8 (3,7) a	11,2 (1,3) ab
Surco ES	B_C	16,3 (1,3) c	70,2 (0,6) b	13,6 (0,7) a
	A_C	16,2 (0,1) bc	70,1 (1,3) b	13,7 (1,3) a
	A_L	21,9 (3,8) a	65,8 (2,2) c	12,3 (1,8) ab
	B_L	13,8 (1,3) c	76,3 (2,6) a	9,9 (1,3) ab
Promedio				
Entresurco		16,8 A	72,1 A	11,2 A
Surco		17,1 A	71,1 A	11,8 A



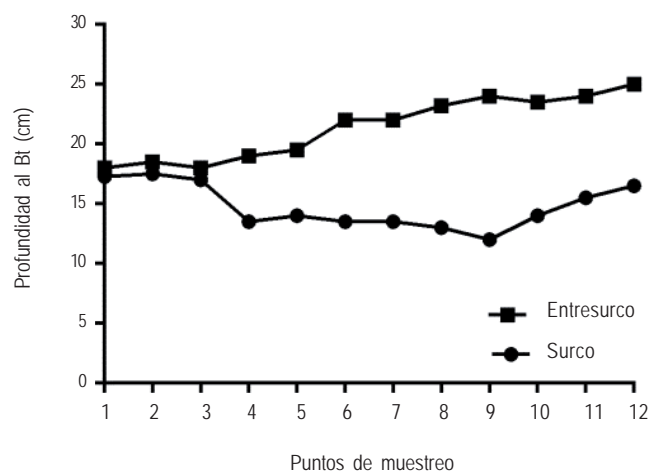


Figura 2. Profundidad (cm) hasta el límite superior del horizonte Bt para el surco y entresurco en los diferentes puntos de muestreo.  
Figure 2. Depth (cm) to the top of the Bt horizon for the rill and inter-rill erosion at different sampling points.

Tabla 3. Valores promedio de densidad aparente (DAP) y profundidad al horizonte (Bt) para diferentes sectores de muestreo (B\_C: bajo gradiente, surco corto; A\_C: alto gradiente, surco corto; A\_L: alto gradiente, surco largo y B\_L: bajo gradiente, surco largo) para el entresurco y el surco. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas para el promedio del surco y entresurco. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para la interacción tipo de erosión x sector de muestreo ( $p < 0,05$ ).

Table 3. Average of bulk density (DAP) and depth to the horizon (Bt) of the different sampling area (B\_C: low slope, shorter rill; A\_C: steep slope, shorter rill; A\_L: steep slope, rill of longer distance and B\_L: low slope, rill of longer distance) in rill and inter-rill. Different uppercase letters indicate significant differences for the average of rill and inter-rill. Different lowercase letters indicate significant differences between the interaction erosion type x sampling area ( $p < 0.05$ ).

Tipo de erosión	Sector de muestreo	DAP ( $g\ cm^{-3}$ ) $n=66$			Espesor al Horizonte B (cm) $n=24$		
Entresurco EES	B_C	1,16	(0,03)	a	18,25	(0,76)	bc
	A_C	1,19	(0,02)	a	18,83	(0,62)	bc
	A_L	1,09	(0,02)	a	23,07	(0,62)	a
	B_L	1,17	(0,02)	a	24,17	(0,62)	a
Surco ES	B_C	1,37	(0,04)	b	17,40	(0,76)	bc
	A_C	1,40	(0,03)	b	14,83	(0,62)	de
	A_L	1,31	(0,03)	b	12,83	(0,62)	e
	B_L	1,34	(0,03)	b	15,33	(0,62)	cde
<i>Promedio</i>							
Entresurco		1,15	(0,03)	B	21,34	(0,03)	A
Surco		1,35	(0,03)	A	14,89	(0,03)	B
Testigo (n=3)		0,95	(0,03)	C	-		

significativa ( $p < 0,0001$ ) entre el sector de muestreo y el tipo de erosión (Tabla 3). Entre los puntos 1 y 4 (B\_C–A\_C), las diferencias de profundidad al horizonte Bt, entre el surco y entresurco, no superan los 5 cm (Tabla 3). Estas diferencias se asocian con pendientes suaves hacia el eje del surco de aproximadamente 1,2%. Por otro lado, en el punto 9 (A\_L) se observa la menor profundidad hasta el Bt con diferencias entre ambos pares de puntos (surco y entre-surco) de 12 cm, coincidiendo con el sector de mayor gradiente de la pendiente perpendicular hacia el eje medio del surco, que es de aproximadamente 2,7% y mientras que es de 0,5% en el sentido del eje del surco (Tabla 3). Si consideramos que para los proyectos de las terrazas con desagües empastados la máxima pendiente aceptada es del 3 por 1000, para no tener velocidades erosivas en el surco, está pendiente en el surco de 5 por 1000, puede considerarse erosiva. Debido a la concentración de agua en el surco a lo largo de la pendiente, la velocidad del flujo se incrementa, esta función responde a la longitud de la pendiente con un exponente de 0,175–0,21 para el entresurco y de 0,409–0,42 para el surco. (Liu *et al.*, 2011a). La concentración de sedimentos que se produce por erosión se intensifica al incrementarse la longitud de la pendiente, siendo esta mayor en el surco que en el entresurco. Con el incremento de la longitud de la pendiente la ES se incrementa mucho más que la EES (Liu *et al.*, 2011b), esto se comprueba en los sectores A\_L y B\_L con menor profundidad al horizonte Bt en la ES respecto de la EES.

Por otro lado, existen diversos inconvenientes cuando la profundidad al Bt se encuentra a una distancia de un cincuenta por ciento más cerca de la superficie que el suelo original no erosionado. De esta forma es probable que el laboreo pueda producir una mezcla del horizonte A con el B, tal como fue encontrado por Taboada (2004) que empeorarían sensiblemente las características del suelo superficial.

Una de las consecuencias adversas de lo anteriormente mencionado para el proceso de erosión son los cambios en la relación infiltración–escurrimiento medidos a través de la conductividad hidráulica. Castiglioni *et al.* (2007) encontraron en un Argiudol vértico del partido de Hurlingham, Buenos Aires, una conductividad saturada en el Bt menor a  $0,3 \text{ mm h}^{-1}$ . Mientras que registraron una mayor tasa de infiltración en el BA,  $5 \text{ mm h}^{-1}$  y aún mayor en el horizonte A,  $10 \text{ mm h}^{-1}$ . De la misma forma en la serie Ramallo (Argiudol vértico), Chagas *et al.* (2011) encontraron en el horizonte A valores cercanos a los  $25,4 \text{ mm h}^{-1}$ . Así, una baja profundidad al Bt disminuiría la conductividad hidráu-

lica y repercutiría en el aumento del escurrimiento y por consiguiente incrementaría la ES. Por otra parte, el efecto de las grietas en el Bt de un suelo Argiudol vértico tendría un efecto muy bajo. Favré *et al.* (1997) observaron en Vertisoles de Senegal, que el paso preferencial del agua por grietas ocurría durante un tiempo muy corto debido a un rápido cierre de las mismas.

### Carbono orgánico

El COT presentó valores significativamente superiores en el entresurco con respecto al surco (Fig. 3). En todas las zonas de muestreo, con excepción del sector A\_C. Los contenidos de COT encontrados en todas las zonas de muestreo, tanto en el surco como en el entresurco, se hallan por debajo del valor modal de 2,5–3% para la unidad cartográfica (consociación Ra14 dominada por la serie Ramallo). Esto podría deberse al manejo que se realizó históricamente en el lote bajo estudio, con baja a nula rotación de cultivos, tendientes al monocultivo de soja, lo que determina una baja cobertura vegetal, afectando así la fracción orgánica.

En relación al contenido según el sector de muestreo, se pudo observar que en el surco, las posiciones con alto gradiente fueron las que presentaron un menor contenido de CO, coincidente con las zonas donde el horizonte Bt se halla más cerca de la superficie, diferenciándose significativamente únicamente de B\_L (Fig. 3). Por otro lado, en el entresurco, las posiciones de bajo gradiente presentaron valores más altos que la posición A\_C, pero no así de A\_L donde se estima que existe una importante sedimentación. Incluso, el contenido de COT en el surco sigue la tendencia de la profundidad del Bt, cuando la profundidad del mismo es mayor, el contenido de COT también es mayor. La profundidad al horizonte Argílico condicionaría la dinámica de la materia orgánica ya que influiría en la mayor o menor proporción de raíces al modificar las condiciones en el espacio explorable para las mismas (Costa, 2003).

En la zona del surco de pendiente corta \_C se afectaría la profundidad al Bt en la EES por tener bajos contenidos de COT siendo pocas las diferencias de la profundidad hallada entre pares de puntos ES y EES. Mientras que las diferencias en la profundidad del horizonte Bt entre ES y EES son mayores en los sectores de pendiente larga \_L y siempre con mayores profundidades al horizonte Bt en la EES, asociadas al mayor contenido de COT y menor IE.



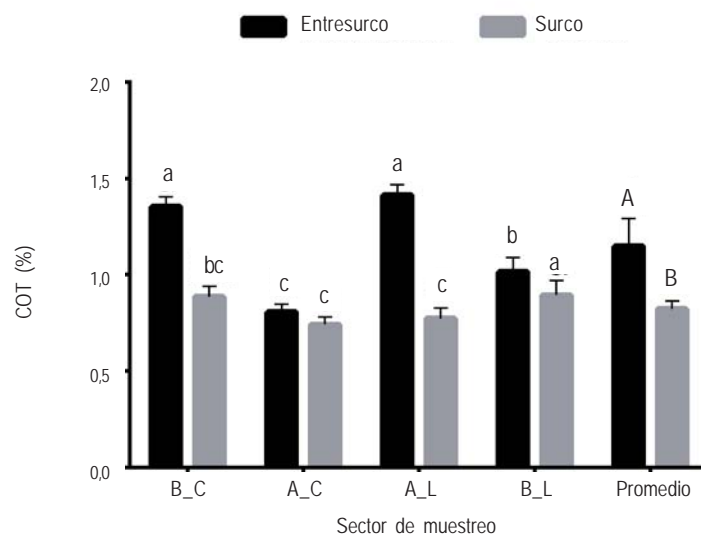


Figura 3. Contenido de orgánico total (COT) del horizonte A (0-20 cm) en diferentes sectores de muestreo para el surco y entresurco. B\_C: bajo gradiente, surco corto; A\_C: alto gradiente, surco corto; A\_L: alto gradiente, surco largo y B\_L: bajo gradiente, surco largo. Letras minúsculas diferentes corresponden a diferencias significativas para la interacción tipo de erosión x sector de muestreo. Letras en mayúscula corresponde a diferencias significativas entre los tipos de erosión ( $p > 0,05$ ).

Figure 3. Total organic carbon (TOC) in the A horizon (0-20 cm) in different sampling area in rill and interrill B\_C: low slope, shorter rill; A\_C: steep slope, shorter rill; A\_L: steep slope, rill of longer distance and B\_L: low slope, rill of longer distance. Different lowercase letters indicate significant differences of the interaction among erosion type x sampling area. Different uppercase letters indicate significant differences between the different erosion type ( $p < 0.05$ ).

### Estabilidad estructural

De la misma forma que el COT, la IE presentó diferencias significativas, mostrando en este caso valores menores en el entresurco que en el surco. Esto también se observó para cada sector de muestreo (Fig. 4). Cuando se analiza la IE por sector, se puede observar que ambas situaciones con alto gradiente (A\_C y A\_L) presentaron valores de IE muy altos y significativamente diferentes a los de bajo gradiente. Incluso cuando se compararon según la longitud y gradiente del surco, se detectó una mayor IE en longitudes más largas de surco (Fig. 4). Además, los valores más altos de IE se corresponden con los sectores donde el surco alcanza las cotas más bajas. Coincidentemente, estos sectores dentro del eje del surco, son los que presentan el horizonte Bt a menor profundidad (Figs. 1a y 2, Tabla 3).

También, se puede observar que la alta IE encontrada en el surco en los sectores A\_C y A\_L se correspondieron con los valores más bajos de COT evaluados. Esto es coincidente con diversos autores que relacionan la estabilidad

de los agregados con el contenido de carbono orgánico, que muestra una relación directa y positiva entre ambas variables (Le Bissonnais & Arrouays, 1997; Rhoton *et al.*, 2002, Castiglioni *et al.*, 2013). Se observa una tendencia al aumento de la IE ante bajos contenido de COT con una pendiente de la recta más marcada para ES. Numerosos autores resaltan el efecto positivo del COT sobre la agregación y estabilidad del suelo (Six *et al.*, 2004; Novelli *et al.*, 2011; Alvarez *et al.*, 2006; Eiza *et al.*, 2006; Echeverría *et al.*, 2012). Los umbrales COT a partir del cual se manifiesta esta relación pueden variar según el orden de suelos que se esté analizando. Para algunos Molisoles de la llanura pampeana de la Argentina, valores de COT superiores a 2,5-3% no producen aumentos importantes de EE (Novelli *et al.*, 2013; Kraemer, 2015), mientras que para el orden de Vertisoles se encontró una relación positiva entre el CO y la estabilidad recién a partir de 3,5% (Novelli *et al.*, 2013). Los datos hallados en este trabajo sugerirían que a partir de 1,3% de COT se producirían pocos cambios en la IE y esta estaría afectada por otros factores.

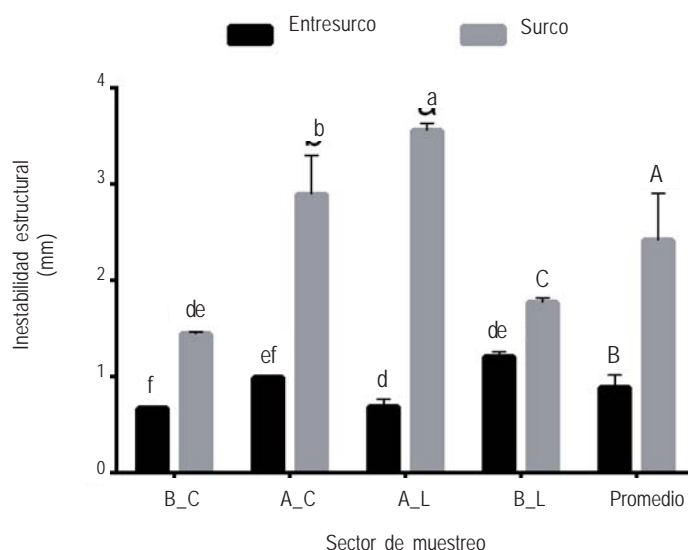


Figura 4. Inestabilidad estructural en diferentes sectores de muestreo para el entresurco y surco. B\_C: bajo gradiente, surco corto; A\_C: alto gradiente, surco corto; A\_L: alto gradiente, surco largo y B\_L: bajo gradiente, surco largo. Letras minúsculas diferentes corresponden a diferencias significativas para la interacción tipo de erosión x sector de muestreo. Letras en mayúscula corresponde a diferencias significativas entre los tipos de erosión ( $p > 0,05$ ).  
 Figure 4. Instability of soil aggregates in different sampling areas in rill and interill B\_C: low slope, shorter rill; A\_C: steep slope, shorter rill; A\_L: steep slope, rill of longer distance and B\_L: low slope, rill of longer distance. Different lowercase letters indicate significant differences of the interaction among erosion type x sampling area. Different uppercase letters indicate significant differences between the different erosion type ( $p < 0.05$ ).

### Densidad Aparente

La densidad aparente (DAP) del suelo cuasi prístino presentó valores significativamente menores al del entresurco y el surco, mientras que el surco presentó los valores más elevados entre las situaciones evaluadas (Tabla 3). Igualmente todos los valores de DAP de los sectores de muestreo del surco fueron mayores a su par medido en el entresurco, no existiendo interacción sector de muestreo x tipo de erosión ( $p=0,76$ ). Los valores de DAP más altos fueron encontrados en el sector A\_C, asociado al sector de quiebre de la cota del surco (Fig. 1a), correspondiéndose con una mayor inestabilidad, menor contenido de materia orgánica y rendimientos más bajos.

Las diferencias en la DAP a lo largo del entresurco, se verificó fundamentalmente entre A\_L y A\_C, presentando este último punto el valor más elevado, coincidiendo con un alta IE y un bajo contenido de COT. Por otro lado, la DAP se correlacionó significativamente con la IE ( $r: 0,68; p=0,06$ ) y de forma negativa y significativa con el contenido de COT ( $r: -0,88; p < 0,01$ , la profundidad al Bt ( $r: -0,82; p=0,01$ ) y el rendimiento del cultivo de soja ( $r: -0,80; p=0,02$ ). Estos resultados se corresponden con las observaciones que

realizaron Díaz Zorita *et al.* (2002) donde la actividad biológica del suelo se eleva cuando aumentan los niveles de carbono del suelo y toda esta actividad favorece en gran medida la estabilidad de los agregados aumentando el desarrollo de la porosidad y reduciendo la densidad aparente. Si bien en este estudio no se midió la tasa de erosión, en un lote donde el sistema de labranza permanece constante con cultivo de soja en SD continua, los cambios en las propiedades del suelo estarían ligadas a las modificaciones en la profundidad del suelo y estas pueden atribuirse a las distintas posiciones y sectores dentro y fuera del surco. Es probable que en algunos de los sectores del entresurco como por ejemplo A\_L, donde los cambios de las propiedades y características del suelo sufran menos modificaciones respecto del suelo original debido al sistema de labranzas utilizado, la profundidad al horizonte Bt, como indicador de la pérdida de suelo se asemeje a la condición cuasi prístina y no cause una aceleración de la erosión.

### Rendimiento del cultivo de soja

El rendimiento del cultivo de soja en el surco presentó un valor significativamente menor al del entresurco (Fig. 5). Los rendimientos obtenidos en el entresurco y en el

surco presentaron diferencias entre los pares de puntos de muestreo de la transecta. En el punto 9 del entresurco se encontró un alto rendimiento ( $4660 \text{ kg ha}^{-1}$ ) que coincide a su vez con una mayor profundidad medida hasta el límite superior del horizonte Bt ( $0,24 \text{ m}$ ). A su vez para este último punto de muestreo se puede inferir un valor moderadamente elevado de COT (interpolación entre los puntos 7 (A\_L) y 11 (B\_L)). Ambas características edáficas podrían explicar el mayor rendimiento alcanzado por este punto de muestreo. Por otro lado, los valores más bajos en rendimiento ( $292 \text{ kg ha}^{-1}$ ) corresponden al surco en punto 8 con elevado gradiente (Fig. 1a).

A su vez, el rendimiento de la soja a lo largo del surco y del entresurco acompaña la profundidad a la que aparece el horizonte argílico presentándose los menores rendimientos donde éste se encuentra a escasa profundidad. Como ambos tipos de erosión presentaron pendientes semejantes ( $p < 0,05$ ), se presenta esta relación con una misma función (Fig. 5). En anteriores trabajos desarrollados sobre Argiudoles típicos y vérticos (Serie Rojas, Pergamino y Ramallo), ya indicaban que la presencia del Bt, de forma conjunta con su espesor y granulometría influyen frecuentemente en los rendimientos de los cultivos (INTA, 1972, 1973). Estas asociaciones entre el límite superior en la que se halla el horizonte Bt y los rendimientos de los cultivos también fueron corroborados por Introcaso *et al.*, (2011).

Por otro lado, como se observa en la Figura 5, por cada centímetro de suelo perdido, el rendimiento disminuyó en  $413,3 \text{ kg ha}^{-1}$ . Ahora bien si esta relación se desglosa por tipo de erosión, se obtiene una caída de rendimiento para el entresurco y el surco de  $242,8$  y  $184,6 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente. Si bien esta caída es mayor en términos absolutos para el entresurco, cuando se lo relaciona con el rendimiento promedio de cada posición en el primer caso representa una merma del 6% y en el surco del 18%.

Esta diferencia en la caída es esperable ya que las propiedades del suelo del entresurco son mejores (mayor contenido de COT, menor DAP y menor IE) mientras que en el surco, el horizonte A o su mezcla con el BA presenta condiciones menos favorables para las raíces de los cultivos, menos COT, mayor IE y DAP asemejándose a las propiedades del horizonte Bt. Esta disminución de los rendimientos es alta, si se la compara con otros autores. Por ejemplo, Weir (1995), trabajando en suelos Argiudoles con parcelas de escurrimiento, encontró caídas en los rendimientos de trigo y soja que oscilaron entre  $121$  y  $62,8 \text{ kg ha cm}^{-1}$  y de  $30$  a  $47,5 \text{ kg ha cm}^{-1}$ , respectivamente. Estos estudios conducen a la predicción de cambios de costos causados por erosión Tengberg *et al.* (1997b), Asimismo Gvozdenovich & Paparotti (2012), encontraron una caída en el rendimiento de la soja de segunda de  $66,43 \text{ kg ha cm}^{-1}$  en suelos Argiudoles ácuicos. Una de las posibles explicaciones de

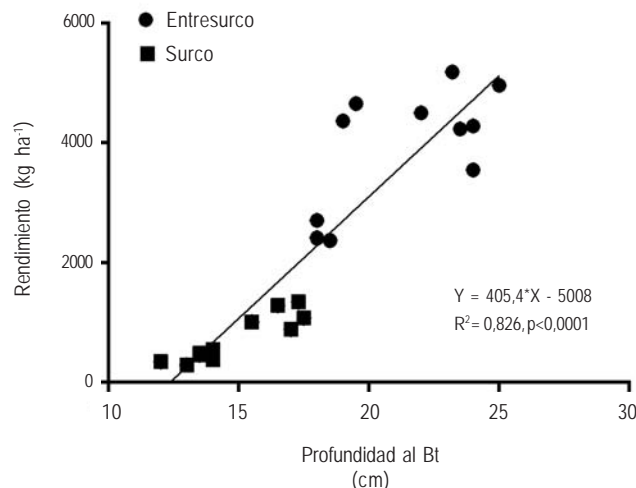


Figura 5. Regresión lineal entre el rendimiento del cultivo de soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y profundidad al horizonte Bt (cm) considerando ambos tipos de erosión (● Entresurco, ■ Surco).

Figure 5. Linear regression between soybean crop yield ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) and depth to the Bt horizon (cm) considering both erosion types (● Interrill, ■ Rill).

esta diferencia es que las condiciones en la zona de actividad radicular en el Bt del Argiudol ácuico son distintas a las de un Argiudol vértico (Maggi *et al.*, 1996). Las diferencias mineralógicas entre ambos horizontes B, muestra un predominio de arcillas expansibles (esmeclitas) en los Argiudoles vérticos (Castiglioni *et al.*, 2007) y de arcillas más rígidas (illitas) en el Argiudol ácuico que pueden alterar la porosidad y conductividad hidráulica de ese horizonte, presentando el primero condiciones más adversas al flujo de agua debido a la diferente geometría de ambas y por ende su comportamiento frente a la hidratación (Min *et al.* 2015; Karaborni, 1996). Por ello, cuanto mayor sea la pérdida de suelo, más cerca de superficie se encuentran estas condiciones limitantes para los cultivos y ello podría explicar porque en el Argiudol vértico la pérdida de un centímetro de suelo provoca una reducción en el rendimiento del cultivo de soja cuatro veces mayor respecto del Argiudol ácuico.

## CONCLUSIONES

- La intensidad de la erosión hídrica se expresó principalmente en el contenido de COT y en la IE.
- La profundidad al horizonte Bt fue un indicador clave en la distinción de la erosión en surco y entresurco y expone a los sectores afectados por la erosión en surco a situaciones más frágiles debido a la cercanía al horizonte Bt, con características más adversas al crecimiento vegetal, tales como una DAP más elevada, disminución en el COT y aumento de la IE, propiciando un aumento de la erosión hídrica.
- Los aumentos en la *longitud* de la pendiente modificó la profundidad al horizonte Bt alcanzando los valores más altos en la EES y los más bajos en la ES. Mientras que el aumento en el *gradiente* de la pendiente incidió en los cambios en la granulometría observado en los distintos sectores favoreciendo las pérdidas de limos en A\_L en la ES y en A\_C en EES.
- Se observó una merma de rendimientos en el cultivo de soja en el surco con respecto al entresurco, presentado una relación directa del rendimiento con la profundidad hasta el límite superior del Bt.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, CR; A Bono; MA Taboada; FH Gutiérrez Boem; PL Fernandez & P Prystupa. 2006. Distintos manejos del suelo en la Pampa Ondulada: II Fracciones orgánicas y propiedades físicas. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta.
- Alvarez, C; MA Taboada; FH Gutiérrez Boem; A Bono; PL Fernández & P Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1251.
- Apezteguía, H; H Amaya & L Crusta. 1987. Medición de pérdidas de suelo y disminución de soja debidos a la erosión hídrica en la región semiárida central de Córdoba. *Ciencia del Suelo* 5(1):51-55.
- Black *et al.* 1965. *In:* CA Black, DD Evans, JL White, LE Ensminger, FE Clark (eds), Methods of Soil Analysis. Agronomy Number 9, Parts I and 2, American Society of Agronomy, Madison, WI (1965).
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density. *In:* Klute, A. (ed), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Madison, 363-376.
- Bouyoucos, GJ. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Buján A.; OJ Santanatoglia; C Chagas; M Massobrio; M Castiglioni; M Yañez; H Ciallella & J Fernandez. 2003. Soil erosion evaluation in a small basin through the use of <sup>137</sup>Cs technique. *Soil Till. Res.* 69(1-2): 127-137.
- Castiglioni, M; H Morrás; O Santanatoglia; M Altinier & D Tessier. 2007. Movimiento del agua edáfica en Argiudoles de la Pampa Ondulada con diferente mineralogía de arcillas. *Ciencia del Suelo* 25: 109-121.
- Castiglioni, MG; FB Kraemer & HJM Morrás. 2013. Efecto de la secuencia de cultivos bajo siembra directa sobre la calidad física de suelos de la región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 31: 93-105.
- Chagas, CI; FB Kraemer; S Utin; C Irurtia & OJ Santanatoglia. 2011. Influencia de las propiedades edáficas y la posición en el paisaje sobre la respuesta hidrológica de suelos pertenecientes a una cuenca de la Pampa Ondulada. *Cuadernos del Curiham* 17(1): 25-32.
- Chagas CI; OJ Santanatoglia; JA Moretton; M Paz & FB Kraemer. 2010. Microbiological contamination dynamics in runoff water and sediments in cattle production lands of Argentina. *Ciencia del Suelo* 28: 23-31.
- Costa, MC. 2003. Génesis, propiedades y comportamiento de los suelos en los interfluvios planos de un sector de la cuenca media del Río Luján. Tesis Magister scientist. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. 130pp.
- De Battista, J; C Pecorari & R Albrecht. 2005. Evaluación del estado estructural de suelos bajo agricultura continua en siembra directa. *En:* Indicadores de calidad física de suelos. Boletín N 4 INTA EEA General Villegas. 31-39.
- De Leenheer, L & M De Boodt, 1967. Aggregate stability determination by the change in mean weight diameter. *In:* West-European Methods for Soil Structure Determination. West-European Working Group on Soil Structure of the International Soil Science Society Gent, VI.Pp. 28-31.
- De Ploey, J. 1988. No tillage experiments in the central Belgian loess belt. *Soil Technol.* 1: 181-184.
- Diaz-Zorita, M.; GA Duarte & JH Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65(1): 1-18.

- Durán, A; H Morrás; G Studdert & X Lui. 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chin. Geogra. Sci.* 21(5): 511-530.
- Echeverría, N; S Querejazu; M De Lucia; J Silenzi; H Forjan & M Manso. 2012. Estabilidad y carbono orgánico de agregados bajo rotaciones en siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- Eiza, M; G Studdert; N Fioriti & G Dominguez. 2006. Estabilidad de agregados y materia orgánica total y particulada en Molisoles de Balcarce. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, Argentina.
- FAO. 1994. Erosión de Suelos para América Latina. Taller sobre un Sistema de información geográfica (SIG) en la evaluación de la erosión actual de los suelos y la predicción de del riesgo de la erosión potencial. Santiago, Chile. Proyecto GCP/RLA/107/JPN. Santiago, Chile. ISBN 92-854-3001-5. <http://www.fao.org/docrep/t2351s/t2351s00.htm>. Última visita 06-11-2015.
- Favré, F; P Boivin & MCS Wopereis. 1997. Water movement and soil swelling in a dry, cracked Vertisol. *Geoderma* 78: 113-123.
- Fenton TE; M Kazemi & MA Lauterbach-Barrett. 2005. Erosional impact on organic matter content and productivity of selected Iowa soils. *Soil Till. Res.* 81: 163-171.
- Fullen, MA. 1991. Soil organic matter and erosion processes on arable loamy sand soils in the west Midlands of England. *Soil Technol.* 4: 19-31.
- Giménez, R & G Govers. 2002. Flow detachment by concentrated flow on smooth irregular beds. *Soil Science Society of America Journal* 66(5): 1475-1483.
- Gollany, HT; TE Schumacher; MJ Lindstrom; PD Evenson & GD Lemme. 1992. Topsoil depth and desurfacing effects on properties and productivity of a Typic Argiustoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 220-225.
- Gvozdenovich J & O Paparotti. 2012. Variación del rendimiento del cultivo de soja debido a la erosión hídrica en Entre Ríos. Camapañas 2009/10-2010/11. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, «Latinoamérica unida protegiendo sus suelos». 16 al 20 de abril. Mar del Plata, Argentina.
- Hall, AJ; CM Rebella; CM Ghera & JP Cullot. 1992. Field-crop systems of Pampas. In: C.J. Pearson (ed). *Ecosystems of the world. Field Crops Ecosystems*. Elsevier Scientific, Amsterdam-London-New York-Tokyo. Pp 413-450.
- Hurlbert, SH. 1984. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs* 54: 187-211.
- Infostat / P v1.1. 2002. InfoStat, v. 1.1. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. 336pp.
- INTA, 1972, 1973. Carta de suelos de la República Argentina. Hojas 3360-32 (Pergamino) y 3360-33 (Perez Millán). CIRN. Reconocimiento de Suelos, Buenos Aires.
- Introcaso, R; A Halliburton & A Maggi. 2012. Evaluación de la erosión hídrica a través del monitor de rendimiento. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Karaborni, S; Smit, B; Heidug, W; Urai, J & Van Oort. E. 1996. The swelling of clays. *Science* 271: 1102-1104.
- Kraemer, FB; CI Chagas; HJM Morrás; J Moretton; M Paz & LA Garibaldi. 2013a. Influence of physical and chemical soil properties on the adsorption of *Escherichia coli* in Mollisols and Alfisols of Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29(1): 7-20.
- Kraemer, FB; CI Chagas; D Cosentino & LA Garibaldi. 2013b. Adsorption and affinity of *Escherichia coli* to different aggregate sizes of a silty clay soil. *Int. J. of Sediment Res.* 28: 535-543.
- Kraemer, FB. 2015. Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento hidro-físico y estructural en suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. 236pp.
- Lal, R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sci.* 17: 319-464.
- Le Bissonnais, Y & D Arrouays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: 2. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 39-48.
- Leys, A; G Govers; K Gillijns & J Poesen. 2007. Conservation tillage on loamy soils: explaining the variability in interrill runoff and erosion reduction. *Eu. J. Soil Sci.* 58: 1425-1436.
- Liu HP; XY Wang & BY Liu. 2011a. Study on rill and interrill flow velocity along hillslopes with simulated rainfall. *Geogr. Res.* 30(9):1660-1668. doi 10.11821/yj2011090010.
- Liu, HP; XY Wang & BY Liu. 2011b. Relationship between Soil Erosion and Slope Length on Short Slopes. *J. Soil Water Conserv.* 2:001. ISSN 1009-2242 [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-TRQS201102001.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-TRQS201102001.htm). Última visita 06-11-2015.
- Maggi, AE; MG Castiglioni; OJ Santanatoglia & JL Torella. 1996. Comportamiento de algunos parámetros físicos en Argiudoles bajo siembra directa. *Rev. Inv. Agrarias de España, INIA. Producción y Protección Vegetales.* 11(3): 427-437.
- Martin, P. 1999. Reducing flood risk from sediment laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. *Soil & Till. Res.* 52: 233-245.
- Mathan KK & N Kannan. 1993. Influence of rainfall on nutrient loss in sediment and runoff water in two watersheds under contrasting landscape systems. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 41: 606-608.
- Meyer LD & WC Harmon. 1984. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci.* 48: 1152-1156.
- Meyer, LD; GR Foster & MJM Romkens. 1975. Mathematical simulation of upland erosion using fundamental erosion mechanics. Proc. of Sediment Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss. ARSS-40:177-189.
- Michelena RO; CB Irurtia; A Pittaluga & FVavruska. 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la pampa ondulada. *Ciencia del Suelo* 6(1): 60-66.
- Min, F; C Peng & L Liu. 2015. Investigation on hydration layers of fine clay mineral particles in different electrolyte aqueous solutions. *Powder Technology* 283: 368-372.
- Monke, EJ; HJ Marelli; LD Mayer & JF De Jong. 1977. Runoff, erosion, and nutrient movement from interrill areas. *Transactions of the ASAE* 20: 58-61.
- Novelli, LE; OP Caviglia & RJM Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168: 254-260.
- Novelli, LE; OP Caviglia; MG Wilson & MC Sasal. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196: 260-267.

- Papiernik, SK; MJ Lindstrom; JA Schumacher; A Farenhorst; KD Stephens; TE Schumacher & DA Lobb. 2005. Variation in soil properties and crop yield across an eroded prairie landscape. *J. Soil Water Conserv.* 60: 388-95.
- Pecorari, C. 1988. Inestabilidad estructural de los suelos en la región de la E.E.A. Pergamino. Informe Técnico N° 216. E.E.A. Pergamino. 16 p.
- Rhoton, FE; MJ Shipitalo & DL Lindbo 2002: Runoff and soil loss from Midwestern and southeastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content. *Soil Till. Res.* 66: 1-11.
- Roger-Estrade, J; J Labreuche & G Richard. 2011. Effects of no-ploughing methods on soil physical properties: Consequences on soil erosion in a temperate climate. *Cah. Agric.* 20: 186-193.
- Sasal, MC. 2012. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires Argentina. 126 pp.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Buenos Aires (Argentina) Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina para América Latina y el Caribe. 2004. GEO Argentina 2004. Perspectivas del Medio Ambiente en la Argentina.
- SAGPyA (Secretaría de Ganadería, Agricultura, Pesca y Alimentación), 1995. El deterioro de las tierras en la República Argentina. 288 PP.
- Sharpley AN. 1985. The selective erosion of plant nutrients in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1527-1534.
- Six, J; H Bossuyt; S Degryze & K Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79: 7-31.
- Tengberg A; MA Stocking & M da Virga. 1997a. The impact of erosion on the productivity of a Ferralsol and a Cambisol in Santa Catarina, southern Brazil. *Soil Use & Management* 13: 90-96.
- Tengberg, A; M Peretti & E Weir. 1997b. Predicción de cambios de rendimiento y costos causados por erosión en Marcos Juárez, Córdoba. Resumen Expandido Congreso Mundial de Suelos, Montpellier, Francia. 7 PP.
- Tengberg, A; J Ellis-Jones; R Kioma & M Stocking. 1998. Applying the concept of agrodiversity to indigenous soil and water conservation practices in eastern Kenya. *Agricultural Ecosystems & Environment* 70: 259-272.
- Thompson, ML; H Zhang; M Kazemi & JA Sandor. 1989. Contribution of organic matter to cation exchange capacity and specific surface area of fractionated soil materials. *J. Soil Sci* 148: 250-257.
- Utomo, WH & AR Dexter. 1981. Tilt Mellowing. doi: 10.1111/j.1365-2389.1981.tb01699.x. *J. Soil Sci* 32: 187-201.
- Vermang, J. 2012. Erosion Processes and Physical Quality of Loamy Soils as Affected by Reduced Tillage. Ghent, Belgium: Ghent University. Faculty of Bioscience Engineering. 192pp.
- Wander, MR & GA Bollero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts of Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961-971.
- Weir, E. 1995. Informe de Avance INTA-FAO. Cartas Acuerdo. Parcelas de escurrimiento y parcelas de productividad. EEA Marcos Juárez, Córdoba.
- Wirtz, S; M Seeger; A Remke; R Wengel; JF Wagner & JB Ries. 2013. Do deterministic sediment detachment and transport equations adequately represent the process-interactions in eroding rills? An experimental field study. *Catena* 101: 61-78.
- Wischmeier, WH; CB Johnson y BV Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26: 189-193.
- Young, RA, & JL Wiersma. 1973. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. *Water Resour. Res.* 9(6): 1629-1636.
- Young, RA, & CA Onstad. 1978. Characterization of rill and interrill eroded soil. *Transactions of the ASAE* 21: 1126-1130.
- Yu, J; TW Lei; I Shainberg; AI Mamedov & GJ Levy. 2007. Inflow rates and interrupted flow effects on concentrated flow erosion and intake rate in two soils. *Soil Sci.* 172(5): 378-385.