

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**



Trabajo Final presentado para optar el Grado de Ingeniero Agrónomo

Modalidad: Proyecto

**PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN  
FUNCIÓN DE LA ROTACIÓN Y LA COBERTURA  
SUPERFICIAL DE RASTROJOS.**

Alumno: Ohanian Ignacio  
DNI: 33885664

Director: Ing. Agr. Cholaky Carmen

Co-Director: Ing. Agr. Esposito Gabriel

Río Cuarto – Córdoba  
Septiembre / 2014

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

CERTICADO DE APROBACIÓN

**Título del Trabajo Final:** “Pérdida de suelo por erosión hídrica en función de la rotación y la cobertura superficial de rastrojos”.

Autor: Ohanian, Ignacio.

DNI: 33885664

Director: Cholaky, Carmen.

Co-Director: Espósito, Gabriel.

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

Cisneros, José Manuel \_\_\_\_\_

Degioani, Américo \_\_\_\_\_

Cholaky, Carmen \_\_\_\_\_

Fecha de presentación: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

---

**Secretario Académico.**

*Agradecimientos*

*A mis padres, Alfredo y Graciela*

*Mis hermanos Agustín y Florencia, mi novia Luciana*

*A Carmen Cholaky mi Directora y compañera en esta experiencia*

*A todos los compañeros que me ayudaron en la fase de campo y de laboratorio*

*A todos por su apoyo incondicional.*

*Y por supuesto a la Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río*

*Cuarto. Por la oportunidad de formarme profesionalmente*

## ÍNDICE GENERAL

	Pag.
<b>Índice general</b> .....	IV
Índice de tablas.....	V
Índice de figuras y fotos.....	VII
Resumen.....	VIII
Summary.....	IX
<b>I. Introducción</b> .....	1
<b>II. Hipótesis y Objetivos</b> .....	9
<b>III. Materiales y métodos</b> .....	10
<b>IV. Resultados y discusión</b> .....	27
- Tiempo de encharcamiento y escurrimiento.....	27
- Lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento.....	30
- Pérdida de suelo a campo.....	37
- Pérdida de suelo a través de la RUSLE.....	43
- Lámina Total Infiltrada y Velocidad de Infiltración Final.....	47
- Profundidad de humedecimiento.....	53
- Enriquecimiento de materia orgánica.....	56
- Enriquecimiento de fósforo.....	62
<b>V. Conclusión</b> .....	67
<b>VI. Recomendaciones</b> .....	69
<b>VII. Bibliografía</b> .....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características morfológicas del suelo desarrollado bajo la siembra directa, en la pendiente de “Pozo del Carril” .....	14
Tabla 2. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo desarrollado en siembra directa en la pendiente de “Pozo del Carril” .....	15
Tabla 3. Diferencia de medias del tiempo de encharcamiento (min) entre coberturas .....	27
Tabla 4. Diferencia de medias del tiempo de encharcamiento (min) entre rotaciones.....	28
Tabla 5. Diferencia de medias del tiempo de escurrimiento (min) entre rotaciones.....	28
Tabla 6. Diferencia de medias del tiempo de escurrimiento (min) entre coberturas.....	29
Tabla 7. Coeficiente de correlación de Pearson entre el tiempo de escurrimiento y encharcamiento.....	29
Tabla 8. Diferencia de medias de lámina escurrida (mm) entre coberturas.....	30
Tabla 9. Diferencia de medias del coeficiente de escurrimiento entre coberturas.....	30
Tabla 10. Diferencia de medias de lámina escurrida (mm) entre rotaciones.....	32
Tabla 11. Diferencia de medias del coeficiente de escurrimiento entre rotaciones.....	32
Tabla 12. Coeficiente de correlación de Pearson.....	36
Tabla 13. Diferencia de medias de la pérdida de suelo (tn.ha <sup>-1</sup> ) por efecto de la cobertura superficial.....	37
Tabla 14. Diferencia de medias de la pérdida de suelo (tn.ha <sup>-1</sup> ) entre rotaciones.....	40
Tabla 15. Representación de los factores que componen la RUSLE-2 y resultados a seis (6) y veinte (20) años.....	44
Tabla 16. Diferencia de medias de la lámina total infiltrada (mm) entre coberturas superficiales.....	47
Tabla 17. Diferencia de medias de la lámina total infiltrada (mm) entre rotaciones.....	48
Tabla 18. Diferencia de medias de la velocidad de infiltración (mm.h <sup>-1</sup> ) entre coberturas superficiales.....	50
Tabla 19. Diferencia de medias de la velocidad de infiltración (mm.h <sup>-1</sup> ) entre rotaciones...50	50
Tabla 20. Coeficiente de correlación de Pearson.....	52
Tabla 21. Diferencia de profundidad de humedecimiento (cm) de la lámina infiltrada (mm) entre coberturas superficiales.....	53
Tabla 22. Diferencia de profundidad de humedecimiento (cm) de la lámina infiltrada (mm) entre rotaciones.....	55
Tabla 23. Coeficiente de correlación de Pearson.....	56
Tabla 24. Concentración de materia orgánica en el suelo (%) y sedimento (%), enriquecimiento (g.kg <sup>-1</sup> ) y tasa de enriquecimiento (coeficiente).....	57

Tabla 25. Diferencia de enriquecimiento de MO ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) del suelo entre coberturas.....	57
Tabla 26. Diferencia de enriquecimiento de MO ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) del suelo entre rotaciones.....	60
Tabla 27. Coeficiente de correlación de Pearson.....	62
Tabla 28. Concentración de fósforo en el suelo (ppm) y sedimento (ppm), enriquecimiento ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) y tasa de enriquecimiento (coeficiente).....	63
Tabla 29. Diferencia de enriquecimiento de fósforo ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) entre rotaciones.....	64
Tabla 30. Diferencia de enriquecimiento de fósforo ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) entre coberturas.....	65
Tabla 31. Coeficiente de correlación de Pearson.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS Y FOTOS

### FIGURAS

Figura 1: Mapa de la República Argentina. Donde: se identifica la Provincia de Córdoba, la Ciudad de Río Cuarto y el paraje “La Aguada”.....	10
Figura 2: Imagen satelital, que muestra la Ciudad de Río Cuarto y el campo experimental “Pozo del Carril” próximo al paraje “La Aguada”.....	12
Figura 3: Esquema del diseño experimental del ensayo.....	18
Figura 4: Esquema básico del microsimulador de lluvias.....	19
Figura 5: Vista del modelo de simulación RUSLE-2.....	25

### FOTOS

Foto 1. Vista del lote donde se realizó el presente estudio.....	17
Foto 2. Vista del lote donde se realizó el presente estudio, con los simuladores de lluvia representando a los niveles con y sin cobertura superficial de rastrojos.....	18
Foto 3. Vista del vertedero del simulador de lluvias y colocado aguas abajo, el recipiente colector de la lámina escurrida (mm).....	20
Foto 4. Turbidez de la lámina escurrida (mm).....	38

## PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN FUNCIÓN DEL SISTEMA DE ROTACIÓN Y DE LA COBERTURA SUPERFICIAL DE RASTROJOS.

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal, evaluar la pérdida de suelo por erosión hídrica, a través, de un simulador de lluvia (Iruetia y Luque, 2005) de un Hapludol típico en función de la rotación y de la cobertura superficial de rastrojos. Este ensayo es manejado con siembra directa y está situado en el campo de docencia y experimentación “Pozo del Carril” (32° 58' 02,89”S y 64° 36' 12,42”O, a 638 msnm) de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Se midieron indicadores de funcionalidad del suelo como: coeficiente de escurrimiento, infiltración; concentración de carbono orgánico total y fósforo extractable, en el suelo y sedimento erodado; y a su vez se estimó la pérdida de suelo en  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  mediante el modelo de simulación RUSLE-2. La experimentación comprendió cuatro tratamientos: Rotación agrícola pura con 100% de cobertura superficial (RA 100); Rotación agrícola-ganadera con 100% de cobertura superficial (RAG 100); Rotación agrícola pura con 0% de cobertura superficial (RA 0) y Rotación agrícola-ganadera con 0% de cobertura superficial (RAG 0). En la RAG, la evaluación coincidió con el tercer y último año del ciclo agrícola. La cobertura superficial, consistió en rastrojo de “maíz” (*Zea mays* L). En primer lugar, no existió interacción entre las variables de clasificación rotación y cobertura para con cada una de las variables dependientes, es decir, todas aquellas que se han medido. Los resultados indicaron, que la RA obtuvo menores pérdidas de suelo ( $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) con respecto a la RAG, presentándose esta diferencia con significancia estadística ( $p \leq 0,05$ ). Este resultado, estaría asociado a una situación puntual (3<sup>er</sup> año de la RAG) de un sistema de rotación que se extiende por seis (6) años y que se inició veinte (20) años atrás, es decir, que no sería válido para aseverar con exactitud, a partir de la evaluación realizada en el presente trabajo, cual de ambas rotaciones es más sustentable a lo largo del tiempo. En cambio, la pérdida de suelo obtenida a través de la RUSLE, sirvió para indicar lo que pasaría a campo a largo plazo. En la simulación realizada a seis (6) años se obtuvieron valores de 16 y 20  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , para la RAG y RA, respectivamente; mientras que por el lado de la cobertura, se halló 17,5 para la situación 0 % C y 21,5  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  para 100 % C.

**Palabras claves:** erosión hídrica, pérdida de suelo, rotación, cobertura superficial, simulador de lluvia, rusle-2.

## LOSS OF SOIL BY WATER EROSION IN FUNCTION OF THE SYSTEM OF ROTATION AND THE SURFACE COVERAGE OF STUBBLE.

### SUMMARY

This work has as main objective, evaluate soil loss by erosion, through, a rainfall simulator (Irrutia y Luque, 2005) a typical rotation according to Hapludol and superficial coverage of stubble. This essay is handled with direct seeding and is located in the field of teaching and experimentation "Pit lane" (32 ° 58' 02,89 "S and 64 ° 36' 12.42" or, to 638 metres above sea level) of the Faculty of Agronomy and veterinary medicine of the National University of Río Cuarto. Measured indicators of soil as functionality: coefficient of runoff, infiltration; concentration of total organic carbon and extractable phosphorus in soil and sediment changes; and at the same time estimated soil loss in  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  using RUSLE-2 simulation model. The experiment comprised four treatments: churn farm pure with 100% surface coverage (RA 100); Rotation farming with 100% surface coverage (RAG 100); Rotation agricultural pure with 0% surface coverage (RA 0) and livestock rotation with 0% surface coverage (0 RAG). On the RAG, the assessment coincided with the third and final year of the agricultural cycle. Surface coverage, consisted of "corn" Stover (*Zea mays* L.). First, there was interaction between the variables of rotation classification and coverage for each of the dependent variables, i.e., all those that have been measured. Results indicated, the RA obtained minor losses of soil ( $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) with respect to the RAG, presenting this difference with statistical significance ( $p \leq 0.05$ ). This result would be associated with a specific situation (3<sup>rd</sup> year of the RAG) a rotation system which extends for six (6) years and which began twenty (20) years ago, namely, that it would not be valid to assert with certainty, from the assessment in the present work, which both rotations is more sustainable over time. On the other hand, soil loss obtained through the RUSLE, served to indicate what would happen to long-term field. In the simulation performed at six (6) years 16 to 20  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  values, were obtained for the RAG and RA, respectively; While that was found by the side of the cover, 17.5 for the situation 0% C and 21.5  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  for 100% C.

**Keywords:** water erosion, soil loss, rotation, surface cover, rainfall simulator, rusle-2.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1. PLANTEO DEL PROBLEMA.

La degradación de los suelos por erosión hídrica es una de las principales causas de la disminución de la productividad y del abandono de tierras en todo el mundo.

De manera simultánea a los perjuicios sobre los cultivos agrícolas (perjuicios ambientales), afecta las actividades socioeconómicas en su conjunto debido a inundaciones, torrentes, contaminación de aguas o acumulación de sedimentos en ríos y represas (Kugler, 1983).

Los procesos de erosión hídrica vienen afectando a los suelos de la República Argentina desde hace mucho tiempo. Ya en el año 1957 el ex Instituto de Suelos y Agrotécnica estimaba que alrededor de 34.254.000 hectáreas estaban afectadas por procesos erosivos, y de ellas el 53,4 % (aprox. 18.300.000 hectáreas) sufrían erosión hídrica. Datos de la Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura (1995), indican que la erosión hídrica afecta aproximadamente a 25.000.000 de hectáreas. Teniendo en cuenta la superficie erosionada estimada en 1957, el incremento en treinta años fue de 6.700.000 hectáreas, (Durán, 1998) Por lo tanto la superficie afectada por erosión hídrica en el país creció a un ritmo de 223.000 hectáreas por año, (Gvozdenovich *et al.*, 2014).

La región central Argentina se caracteriza por presentar condiciones de relieve, suelos y clima que predisponen a la degradación de los suelos por erosión hídrica y eólica. Los materiales originarios de los suelos se caracterizan por presentar baja estabilidad por falta de cohesión y adhesión, asociados a pendientes fuertes y climas de alta erosividad que determinan fenómenos graves de los diferentes tipos de erosión: laminar, en surcos, cárcavas para tierras agrícolas. Por otra parte las cuencas de áreas serranas definen una profusa red de cursos permanentes que están sometidos a erosión de fondo y márgenes. Otros impactos negativos asociados a las cuencas agrícolas tienen relación con el uso creciente de agroquímicos (fertilizantes y biocidas) y sistemas de producción ganadera concentrados, que pueden incrementar la contaminación por fuente puntual y difusa de las aguas de ríos y arroyos de la región, Cisneros *et al.*, (2012).

La erosión de suelos es reconocida como uno de los problemas más importantes de la agricultura, con impactos económicos y ambientales dentro y fuera del establecimiento agropecuario en el sur de Córdoba, (de Prada *et al.*, 2008) es por esto que no quedan al margen de estos procesos. De un sistema de producción mixta (agrícola - ganadera), se generó una reorientación productiva hacia una agricultura continua, (proceso conocido como

“Agriculturización”) obligando a extender la frontera agrícola hacia zonas marginales para el cultivo de granos, donde las características fisiográficas y edáficas de la región sur de Córdoba, la hacen más susceptible para que se generen procesos erosivos. (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2008).

Los cambios en el uso del suelo en las cuencas periserranas del sur de Córdoba, revelan una intensificación y especialización hacia la agricultura, aunque de menor intensidad que en la región pampeana húmeda. Dichos cambios habrían producido un aumento en las tasas de erosión hídrica anual, la emisión de sedimentos y el avance de cárcavas (Cisneros *et al.*, 2005).

En los últimos años se produjo un notable aumento de las áreas cultivadas debido al auge de los precios agrícolas lo que llevó a desplazar la ganadería; y a los productores a cultivar suelos de baja aptitud agrícola. En el suroeste de la provincia de Córdoba el uso continuo de la tierra provocó un fuerte deterioro físico (Parra, 2006; Parra *et al.*, 2007), físico-químico, químico (Musso, 2003) y biológico (Bedano *et al.*, 2005, 2006) de diferente magnitud con la consecuente disminución de la calidad de los suelos (Cantú *et al.*, 2004, Cantú *et al.*, 2006, Cantú *et al.*, 2007).

La erosión hídrica se manifiesta a través del desprendimiento y movimiento de las partículas de suelo por efecto de las fuerzas erosivas del agua (Marelli, 2004), y puede apreciarse en diferentes grados, manifestados desde movimientos laminares de suelos casi imperceptibles, hasta cárcavas de grandes magnitudes (Marelli *et al.*, 1984). Este proceso genera importantes pérdidas de sedimentos, carbono orgánico, nutrientes y partículas afectando la fertilidad y productividad del suelo, calidad del agua y biodiversidad, dentro y fuera del sistema.

Es por esto que numerosos autores se han dedicado a estudiar dichos acontecimientos (Adema *et al.*, 2001; Avnimelech y McHenry, 1984; Chagas *et al.*, 1999; Rienzi y Grattone, 2002; Schietecatte *et al.*, 2002; Zanzano y Fadda, 2006; Cisneros *et al.*, 2012 entre otros). Otros, mientras tanto demuestran la correlación positiva existente entre erosión hídrica y la pérdida de productividad de los suelos (Apezteguía *et al.*, 1987; Casas e Irurtia, 1995; Gvozdenovich y Paparotti, 2010, 2011, 2012; Paparotti *et al.*, 1996).

A pesar de esto, en la mayoría de los casos, los rendimientos continúan en aumento, lo que significa un problema encubierto debido al avance de tecnologías genéticas, agroquímicas, mecánicas, de manejo, entre otras, que están al alcance del productor. Consecuentemente para Díaz *et al.*, (2008) la estimación de la pérdida de sedimentos y de

nutrientes del suelo, como resultado de la actividad agropecuaria es uno de los objetivos claves para caracterizar la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios.

La erosión es un proceso que ocurre naturalmente, no obstante, es casi siempre intervenido por la acción del hombre, es por esto que su estudio adquiere vital importancia. Unos de los manejos que potencian su efecto es la remoción parcial o total de la cobertura vegetal; aquí la erosión hídrica aumenta en relación directa a la intensidad de la precipitación, y en general, al estado de degradación del ecosistema, (Wilcox, 1994). Distintos estudios demuestran la importancia de la vegetación como agente biológico protector del suelo. Las tasas de escorrentía y erosión disminuyen en relación inversa a la cobertura, debido a que la vegetación y el mantillo disipan la energía cinética de las gotas de lluvia, retardan la velocidad del escurrimiento y aumentan la permeabilidad del suelo (Blackburn et al., 1986, Ruan et al., 2001). La vegetación ejerce su influencia estabilizadora de los materiales del suelo a través de la acción de la porción viva y muerta superficial (tallos, hojas, residuos) como subterránea (raíces, materia orgánica humificada), modificando propiedades, hidrológicas (evapotranspiración, intercepción, infiltración, escurrimiento, flujo subsuperficial), hidráulicas (rugosidad superficial, velocidad del agua), y mecánicas (resistencia a la tensión, resistencia al corte, cohesión-adhesión, agregación, raíces en cuña, anclaje y arqueado del suelo) del suelo, (Cisneros *et al.*, 2012).

Uno de los mayores problemas de los suelos dedicados a la producción intensiva de cultivos agrícolas con diferentes sistemas de labranzas, como así también pasturas permanentes con manejos inadecuados, es que pierden su estructura favorable y forman costras superficiales debido a que los agregados pierden su estabilidad (Silva *et al.*, 2000). La porosidad estructural del suelo es dinámica y está afectada por factores exógenos como el clima a través de los ciclos de humedecimiento-secado y/o congelamiento-descongelamiento, los sistemas de cultivos a través de sus efectos sobre el sistema radical, el pisoteo y pastoreo animal junto con otros factores bióticos y por el manejo del suelo, a través, de la labranza, manejo de los residuos y tránsito agrícola (Taboada, 2008).

Para estudiar el fenómeno de la erosión hídrica se han desarrollado diferentes modelos que permiten estimar la producción de sedimentos, entre ellos, la más usada y adaptada a nivel mundial es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE/RUSLE), (Wischmeier y Smith, 1978), que permite estimar en forma empírica la pérdida de suelo en  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , combinando la energía erosiva de la lluvia (R), la erosionabilidad del suelo (K), el largo e intensidad de la pendiente (LS), manejo de los cultivos (C) y prácticas de conservación (P). Este modelo además de ser una herramienta para estimar la erosión de los suelos, permite calificar la sustentabilidad de los sistemas de producción agropecuario, ya

que a nivel de las unidades productivas (predios) la erosión reduce el potencial productivo por la propia pérdida de masa de suelo y porque se asocia siempre a degradación de las propiedades del suelo que permanece in situ.

Es en este contexto ambiental, donde existe la necesidad de incorporar masivamente las técnicas de bioingeniería en los futuros planes de ordenamiento territorial. Esta, se refiere al uso de la vegetación para la estabilización de laderas, riberas de cursos de agua y el control de erosión hídrica y eólica en áreas críticas. Estas son técnicas que usan cualquier forma de vegetación, ya sea una simple planta o una colección de ellas como material de ingeniería (es decir aquel material que tiene características y comportamientos cuantificables). A su vez, se incorpora aquellas técnicas en las cuales la vegetación se combina con estructuras inertes, tales como muros de piedra o gaviones, de modo de combinar los beneficios estructurales de los componentes vegetativos y no vegetativos, (Cisneros *et al.*, 2012).

Es por esto que por medio del presente trabajo se planteó contribuir en el conocimiento sobre las pérdidas de suelo, nutrientes y agua por erosión hídrica, considerando rotaciones de cultivos comunes en la región y la condición de cobertura superficial, en suelos representativos de la llanura fuertemente ondulada del centro-sur de la provincia de Córdoba, Argentina.

## 2. ANTECEDENTES.

El incremento en los contenidos de carbono orgánico (CO) en el horizonte superficial de suelos manejados en siembra directa (SD) ha sido reportado por numerosos autores (Havlin *et al.*, 1990; Alvarez *et al.*, 1995, 2004; Chagas *et al.*, 1995; Galantini *et al.*, 2004, Musso *et al.*, 2006) causado por la falta de remoción y la no incorporación de los residuos de cosecha.

En Argiudoles, Argiustoles y Pelustertes del centro sur de EEUU que fueron fertilizados con fósforo, Sharpley (1985) realizó ensayos aplicando lluvia simulada sobre microparcels y encontró que los sólidos suspendidos (fracción particulada) presentaban contenidos de arcilla, CO y fracciones de fósforo (P) que superaban ampliamente a las que habían sido medidas en el suelo original.

En nuestro país, Chagas *et al.*, (1999) trabajó sobre dos tratamientos bien contrastantes agricultura continúa por más de diez años y pastura (campo natural) de 30

años. En ambos midió la pérdida de suelo y el contenido de CO y P extractable antes y después de la aplicación de la lluvia simulada. Los autores observaron diferencias significativas en la pérdida de suelo entre ambos tratamientos, con valores superiores para el tratamiento agricultura, y en cuanto a la calidad del material sólido recogido, sólo observaron diferencias significativas en el contenido de arena, que resultó menor para el caso de la agricultura comparado con la pastura; no habiendo diferencias en el CO y P. Por su parte, Santanatoglia *et al.*, (1997) midieron elevadas concentraciones relativas de nitratos y fosfatos totales en las aguas de escurrimiento y en sedimentos provenientes de una cuenca de Pampa Ondulada.

Chagas (1991, 1995) y Chagas *et al.*, (1997), trabajando sobre dos suelos de la Pampa Ondulada, encontraron que los sedimentos generados a campo en pequeñas parcelas, bajo lluvia simulada, estaban enriquecidos significativamente en arcilla y CO. En uno de los trabajos citados anteriormente Chagas, (1995) evaluó a través de un simulador de lluvias, el efecto de la rugosidad superficial, el tamaño de agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión laminar bajo dos condiciones de degradación estructural de un Argiudol típico en Marcos Juárez: degradado (agricultura continua durante 15 años) y no degradado (rotación agrícola-ganadera con dos ciclos de pastura de 5 años de duración) y dos condiciones de rugosidad superficial: lisa y rugosa. Los resultados indicaron que la presencia de agregados grandes en superficie (cama rugosa) disminuyó en un 70% y 68% el escurrimiento superficial y la erosión, respectivamente, en comparación con la superficie lisa, mientras que la estabilidad estructural no tuvo un efecto muy sobresaliente ya que una diferencia de 63% en el nivel de degradación de los suelos, sólo redujo un 25% el volumen de escurrimiento y no afectó la pérdida total de suelo.

Sasal *et al.*, (2008) trabajando en Arguidoles en parcelas con 10 años de siembra directa, encontraron que el tratamiento “suelo descubierto” superó en 9 veces la pérdida de agua por escurrimiento de la “pastura” y a su vez, los monocultivos de “maíz” y “soja” continuos presentaron pérdidas de agua que superaron 7 veces a las de la “pastura”. En cuanto a las pérdidas de suelo esta última fue el tratamiento que menor valor obtuvo con 0.5 tn.ha<sup>-1</sup>, mientras que la mayor pérdida se obtuvo en el tratamiento “suelo desnudo” con 15.3 tn.ha<sup>-1</sup>, superando el límite de tolerancia admitido por el Sistema de Conservación de Suelos de USA, 11.2 tn.ha<sup>-1</sup> (Hall *et al.*, 1985). Los tratamiento de “maíz” y “soja” continua obtuvieron 1,8 y 2,4 tn.ha<sup>-1</sup> de pérdida de suelo, respectivamente.

La rotación agrícola-ganadera es reconocida como un medio adecuado para el mejoramiento del conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que definen la productividad de un suelo, frente a los efectos degradativos que suelen ocasionar las

prácticas agrícolas, (Denoia *et al.*, 2000). Entre otras acciones, se ha comprobado que el establecimiento de pasturas en tierras ordinariamente destinadas a agricultura puede influir positivamente sobre las propiedades físicas del suelo (García Tobar, 1985; Puricelli, 1985; Chagas *et al.*, 1993; Peralta, 2011) y que su efecto sobre las características edáficas suele persistir una vez iniciado el ciclo agrícola (Sauzano *et al.*, 1997).

Peralta, (2011) al respecto, determinó que la rotación agrícola-ganadera durante el ciclo que dura la pastura, produce un mejoramiento de la estabilidad estructural de la capa superficial del suelo respecto a la rotación agrícola pura y los sistemas de laboreo conservacionistas o de escasa remoción del suelo (i.e. siembra directa y labranza reducida) potencian este efecto. A su vez, comprobó que la estabilidad estructural, medida a través del diámetro medio ponderal de los agregados se aproxima al que presenta el mismo suelo en condición de mínimo disturbio.

Massobrio, (2012), concluyó que la implantación de pasturas perennes permite un incremento en el porcentaje de materia orgánica, respecto a la rotación agrícola pura, en los 16 años de transcurrido el ensayo, aunque con diferencias no significativas.

Marelli, (2003), a través de la “USLE/RUSLE” evaluó el potencial erosivo en la provincia de Córdoba en la zona donde se realizó el presente trabajo (planicie periserrana proximal). Las pérdidas de suelo promedio de los tratamientos “Suelo Desnudo”, “Maíz-Soja” y “Pasturas base alfalfa” fueron  $95.3 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ ,  $12.4 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  y  $1.9 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  respectivamente; en todos los casos estas pérdidas se estimaron considerando “siembra directa” y un 3% de pendiente y consideró una tolerancia de pérdida de suelo promedio de 2 a  $5 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ . Estos valores sirvieron de referencia para comparar con los calculados a campo en el presente trabajo.

Cléricsi y Garcia, (2001) también a través de la “USLE/RUSLE” estimaron la pérdida de suelo en varias localidades de la provincia de Buenos Aires con distintos usos y manejos de suelo. En la localidad de Pehuajó con 0,5 % de pendiente (serie Pehuajó) obtuvieron valores de 0.2, 0.2 y  $0.4 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  para campo natural, rotación agrícola-ganadera (2:2) y agricultura continúa, respectivamente. Cabe aclarar que estos últimos dos manejos son bajo SD. En el partido de Azul con 4% de pendiente (serie Cinco Cerros) encontraron valores de  $1.6 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  para campo natural,  $1.6 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  para rotación agrícola-ganadera y  $2.5 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  para agricultura continua; mientras que para la localidad de Coronel Suarez con 0,5 % de pendiente, (serie Laprida) hallaron 0.3, 0.3 y  $0.6 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  para campo natural rotación agrícola-ganadera y agricultura continua, respectivamente.

En el centro-sur de la provincia de Córdoba, Cisneros *et al.*, (2004) estimaron incrementos en la pérdida de suelo, a pesar del avance generalizado del sistema de siembra directa, sosteniendo además que este sistema de labranza no ha podido mitigar los impactos del cambio de uso mixto a agrícola puro.

Torres *et al.*, (2000) en Venezuela y sobre un suelo Ultisol, diseñaron un sistemas de dos manejos con cobertura, residuos orgánicos de gramíneas (RG) y leguminosas (RL), y un tratamiento sin residuos (SR). Las propiedades hidrológicas fueron evaluadas por simulación de lluvia con una intensidad de  $120 \text{ mm.h}^{-1}$ . Los autores pudieron determinar que el tiempo de encharcamiento y escurrimiento fue significativamente menor en las parcelas donde no se colocaron residuos como cobertura.

Cisneros *et al.*, (2012) concluyeron que: “la cobertura protege la superficie del suelo de los efectos erosivos de la lluvia y del viento generando un impedimento para que la gota no impacte directamente sobre el suelo y aumente la rugosidad en superficie. De este modo evita el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas, mantiene condiciones propicias para la infiltración de agua en el perfil, disminuye las pérdidas de agua por escurrimiento y la pérdida de suelo por erosión”.

A su vez, el efecto protector que genera el rastrojo va a estar en función de la proporción de suelo cubierto por el mismo, de su distribución, de la cantidad y del tamaño de los residuos, ya que residuos grandes tardan más en descomponerse que residuos de menor tamaño, generando de esta forma una protección duradera en el tiempo. Los mismos autores, explican que; “es conveniente que el residuo este anclado en el suelo para que no sea arrastrado por el viento y/o el agua, además de producir un contacto suelo-rastrojo lo que aumenta la actividad microbiana generadora de uniones mecánicas y químicas entre agregados”, (Cisneros *et al.*, 2012).

Blackburn *et al.*, (1986) y Ruan *et al.*, (2001), sostienen que las tasas de escorrentía y erosión disminuyen en relación inversa a la cobertura, debido a que la vegetación disipa la energía cinética de las gotas de lluvia, retarda la velocidad de escurrimiento y aumenta la permeabilidad del suelo.

En relación a la temática en cuestión, De la Vega *et al.*, (2004) realizaron un experimento en un Argiudol vértico, sobre un planteo de siembra directa, considerando dos tratamientos, SD con cobertura y SD sin cobertura, utilizando un simulador de lluvia. Los autores encontraron diferencias ampliamente significativas a favor del tratamiento con cobertura en variables como, duración de la etapa de infiltración inicial, tasa final de infiltración, coeficiente de escurrimiento, concentración de sedimentos en el agua escurrida y

pérdidas de suelo medias. Al mismo tiempo los autores encontraron que en la situación con cobertura el escurrimiento se inició más tarde, en comparación con el suelo descubierto. Betancourt *et al.*, (2000) trabajando con lluvia simulada, manifestaron que el escurrimiento se presentó más rápido en las parcelas con suelo desnudo, en comparación con las parcelas de Grama rhodes y pasto nativo.

Marelli *et al.*, (2001) sugieren que la eficiencia en el control de la erosión hídrica de este sistema de siembra directa ocurrirá siempre y cuando se obtengan coberturas superficiales adecuadas, ya que de lo contrario las pérdidas de suelo sufridas serán similares a las registradas bajo sistemas de labranza convencional. Bajo esta inquietud Merrill *et al.*, (2004) concluyen que el riesgo de erosión disminuye marcadamente a partir de un 40% de cobertura superficial, reduciendo principalmente la capacidad de los agentes erosivos (i.e. energía cinética de la lluvia y velocidad de escurrimiento superficial) de generar el desprendimiento de las partículas del horizonte superficial y de transportarlas en el agua de escurrimiento.

Bonvecchi *et al.*, (2014) evaluaron el efecto de la cobertura de rastrojos sobre la captación y almacenaje de agua en el suelo en distintos escenarios climáticos en un sistema de siembra directa continua, durante cinco campañas agrícolas. Los tratamientos fueron: (T0): 0% de cobertura de rastrojo (descubierto); (T1): 65% de cobertura y (T2): 100% de cobertura. Para las cinco campañas evaluadas los contenidos de agua útil hasta los 40 cm de profundidad en el momento de la siembra del cultivo de verano variaron entre años y entre tratamientos, observándose una mayor oferta de agua en los tratamientos con cobertura independientemente del cultivo. La ventana temporal analizada permitió expresar la variabilidad de las precipitaciones y su relación con el agua disponible para los distintos niveles de cobertura. De esta manera, en los años con menores precipitaciones la cantidad de residuos fue menos importante que en un año húmedo donde solamente los tratamientos con cobertura 100% mostraron una disponibilidad hídrica superior al testigo. Los autores concluyeron que: “conocer y cuantificar la disponibilidad de agua asociada a la dinámica de los residuos y su relación con la variabilidad climática permite mejorar la planificación de estrategias de producción de cultivos”.

## **II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

### **1. HIPÓTESIS.**

La rotación agrícola-ganadera potencia el efecto mejorador de la cobertura superficial en la disminución de la pérdida de agua y suelo por erosión hídrica, debido al mayor aporte de materia orgánica, respecto a una rotación agrícola pura.

### **2. OBJETIVO GENERAL.**

- Evaluar la pérdida de suelo por erosión hídrica en función de la rotación y de la cobertura superficial de rastrojos, con un manejo en siembra directa.

### **3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Medir indicadores de funcionalidad del suelo como: coeficiente de escurrimiento, infiltración y pérdida de suelo por erosión hídrica.
- Evaluar la concentración de carbono orgánico total y fósforo extractable en el suelo y sedimento erosionado.
- Estimar la pérdida de suelo en  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  para las condiciones estudiadas a campo (precipitación, coberturas, rotaciones), mediante el modelo de simulación RUSLE-2.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

De acuerdo a la Zonificación y Descripción de las Tierras del Departamento Río Cuarto (Córdoba) (Cantero *et al.*, 1986), el establecimiento donde se desarrolló el presente estudio se encuentra situado dentro de la unidad catastral N° 12, que ocupa una superficie de 30.000 has y se encuentra ubicada al norte y oeste del departamento; bordeada al norte y al oeste por el pedemonte llega hasta La Invernada y Rodeo Viejo prolongándose en una estrecha faja paralela al Río Cuarto o Chocancharava, hasta el paraje “La Morocha”, (Figura 1).



**Figura 1. Mapa de la República Argentina.**

Se identifica la Provincia de Córdoba, la Ciudad de Río Cuarto y el paraje “La Aguada”.

El relieve es normal, fuertemente ondulado, con pendientes medias, complejas y de gradientes entre el 3 y 8% al oeste de la unidad, mientras que en áreas localizadas hacia el curso del Río Cuarto son pendientes medias con gradientes entre el 3 y 5 %.

Los suelos representativos son Hapludoles típicos de textura franca-arenosa muy fina para todos los horizontes y en las laderas erosionadas presenta Hapludoles énticos de textura franco-arenosa muy fina en todo el espesor del perfil.

Las problemáticas ambientales de las tierras del área se asocian a procesos de erosión hídrica grave y muy grave con presencia de cárcavas de variada magnitud, con suelos muy desagregados superficialmente, con elevada susceptibilidad a la formación de densificaciones y en algunos sectores localizados existe la presencia de calcáreo cercano a la superficie, debido a la interacción del relieve ondulado, precipitaciones de alta intensidad, suelos con predominio de materiales muy finos y sistemas de producción agrícola-ganaderos, basados en una larga historia de laboreo permanente, (Cantero *et al.*, 1998).

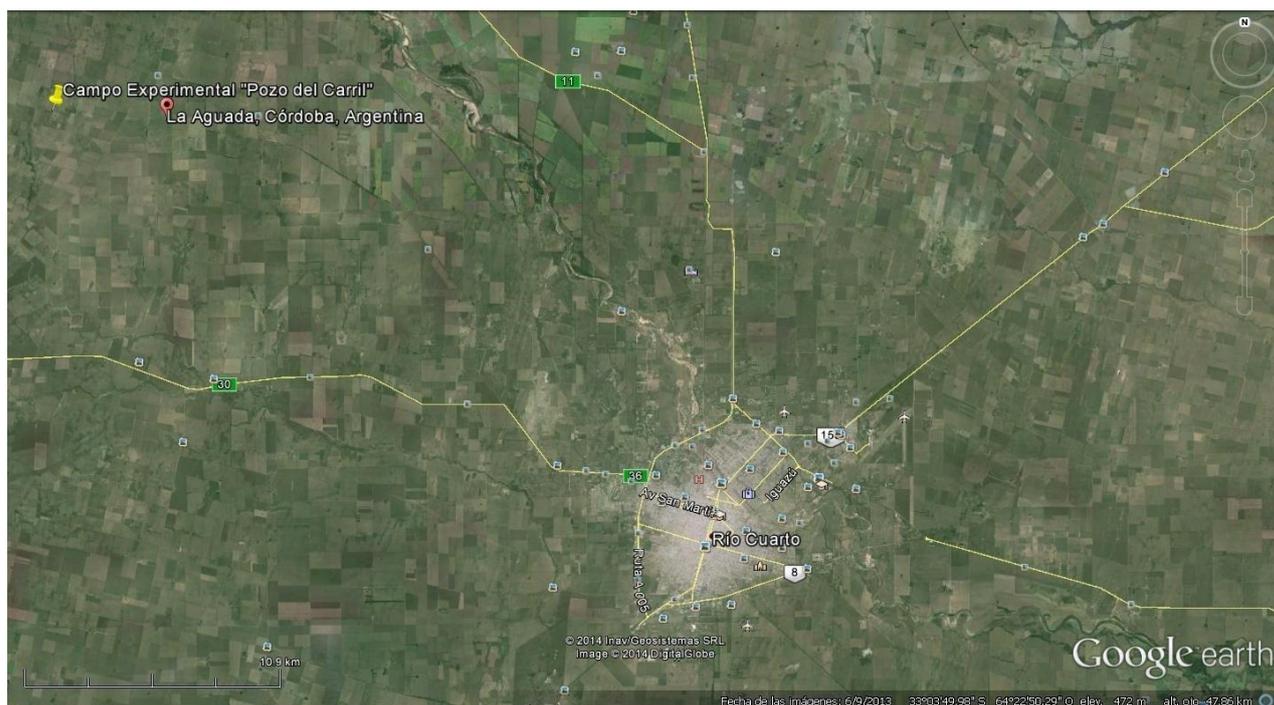
Dadas estas características del área, la aptitud de uso de sus tierras está condicionada al ordenamiento hidrológico de las cuencas, a la consolidación de la red de drenaje y al manejo de las condiciones físicas de los suelos para aumentar la captación e infiltración de agua. (Cantero *et al.*, 1986).

La vegetación natural pertenecía al Espinal (bosque de leñosas y pastizales) (Cabrera, 1976) del que sólo quedan vestigios. La actividad principal fue históricamente agrícola-ganadera y a partir del año 2000 se produjo una profundización de la agriculturización en desmedro de la ganadería. En este contexto, se incrementó la utilización de la siembra directa (SD) con respecto al resto de los sistemas de labranza, (Cantú *et al.*, 2007). El uso actual de la tierra es predominantemente agrícola extensivo con predominio de cultivos estivales, (Becker *et al.*, 2008).

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL ESTABLECIMIENTO.

### 2.1. Ubicación del Establecimiento.

El estudio se llevó a cabo en el campo de docencia y experimentación (CAMDOCEX) de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto “Pozo del Carril”, ubicado próximo al paraje “La Aguada” (32° 58' 02,89”S y 64° 36' 12,42”O, a 638 msnm.), departamento de Río Cuarto, Córdoba. (Figura 2).



**Figura 2. Imagen satelital, que muestra la Ciudad de Río Cuarto y el campo experimental “Pozo del Carril” próximo al paraje “La Aguada”. Fuente: Google earth.**

### 2.2. Clima.

El clima predominante es templado sub-húmedo con estación seca, caracterizándose por poseer una precipitación media anual de 850 mm y una distribución del tipo monzónica donde la mayor proporción (81 %) se acumula en los meses de primavera – verano, con eventos de alta erosividad e intensidades máximas de 100 mm.h<sup>-1</sup>. La intensidad media se encuentra en el rango de 60-100 mm.h<sup>-1</sup>. La evapotranspiración potencial anual es de 901 mm. (Seiler *et al.*, 1989).

La temperatura media del mes más caluroso (enero) es de 23° C, la del mes más frío (Julio) es de 9°C, mientras que la temperatura media anual es de 17°C. (Cruzate *et al.*, 2008). El período libre de heladas se extiende por más de 6 meses.

De julio a noviembre predominan los vientos de dirección NE-SO, en menor frecuencia del S-N y del SO-NE; de diciembre a junio, el predominio es de N-S, en menor medida del NE-SO, S-N y del SO-NE. Las mayores velocidades se registran en los meses de julio a noviembre con valores medios de 18-22 km.h<sup>-1</sup>. La frecuencia de granizo es de 1 en 5 a 10 años, (Seiler *et al.*, 1989).

### **2.3. Fisiografía.**

El establecimiento se encuentra ubicado en la provincia geomorfológica llanura chaco-pampeana y dentro de ella pertenece a la asociación geomorfológica faja eólica ondulada periserrana, (Cantú y Degiovani, 1984). El relieve es moderado a fuertemente ondulado con pendientes generales de longitud entre 3.000 y los 6.000 metros y gradientes medios del 2 al 3 %. La dirección predominante NE-SO, (Becker *et al.*, 2001; Becker *et al.*, 2008). Localmente se presentan pendientes más cortas pero de mayor gradiente, (Becker *et al.*, 2001).

En el sitio de ensayo se hallan pendientes de dirección NE-SO, con un gradiente medio de 3 %, (Google earth, 2014).

Hidrológicamente pertenece a la cuenca del arroyo “El Cipión”, el cual, a su vez pertenece al sistema del arroyo “Santa Catalina”. La red de drenaje es de baja densidad y está controlada por la tectónica y por la acción del hombre, (Cantú y Degiovani, 1984).

### **2.4. Suelo**

El suelo del sitio experimental es un Hapludol típico franco arenoso muy fino, con permeabilidad moderada y bien drenado a algo excesivamente drenado.

Las características morfológicas y analíticas fueron descriptas por Becker, (2006) y se presentan en la tabla 1 y 2.

**Tabla 1. Características morfológicas del suelo desarrollado bajo la siembra directa (SD), pendiente de “Pozo del Carril”.**

---

**Ap** (0-8 cm); color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares gruesos moderados con laminación; duro, firme; seco; límite inferior abrupto y suave. Se ha observado que después de 4 años la estructura es laminar gruesa fuerte, dura y firme.

**A2** (8-14 cm); color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares gruesos moderados que rompen a bloques angulares menores; duro, firme; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; seco; límite inferior abrupto y suave.

**Bw1** (14-29 cm); color pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares y prismas simples irregulares, muy gruesos que rompen a bloques angulares y prismas simples gruesos y medios, moderados; ligeramente duro, friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; abundantes lamelas discontinuas y onduladas arcillo-húmicas de 2 a 3 mm de espesor, horizontales y subhorizontales que en ciertos puntos se entrecruzan; seco; límite inferior abrupto y suave.

**Bw2** (29-41 cm); color pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en prismas simples irregulares gruesos, moderados que rompen a prismas y bloques menores; blando, friable; escasos barnices arcillo-húmicos, finos sobre las caras de agregados; fresco; límite inferior claro y suave.

**BC** (41-65 cm); color pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en prismas simples y bloques subangulares, finos, moderados a débiles que rompen a bloques menores débiles; blando en seco, muy friable en húmedo; fresco; límite inferior claro y suave.

**C** (65-85 cm); color pardo (10YR 4/4) en húmedo y pardo claro (10YR 6/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares irregulares muy finos y muy débiles; blando, muy friable; fresco; límite inferior abrupto y suave.

**Ck** (85-+ cm); color pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo y pardo claro (10YR 6/3) en seco; franco arenoso; estructura masiva; blando, friable; fresco a húmedo; alto contenido de carbonatos libres.

---

**Tabla 2. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo desarrollado en siembra directa (SD), pendiente de “Pozo del Carril”.**

Horizonte	Ap	A2	Bw1	Bw2	BC	C	Ck
Profundidad (cm)	0-8	8-14	14-29	29-41	41-65	65-85	85+
Carbono orgánico (%)	0,92	0,56	0,53	0,72	0,24	0,12	-
Nitrógeno total (%)	0,10	0,08	0,08	-	-	-	-
Relación C/N	9,2	7,00	6,63	-	-	-	-
Arcilla ≤ 2m (%)	17,48	12,30	12,50	14,80	13,02	14,50	14,30
Limo, 2-50 m (%)	30,32	25,20	26,10	24,30	25,20	29,60	29,80
Arena muy fina, 50-100 m (%)	52,80	61,50	55,60	60,40	60,80	55,30	55,30
Arena fina, 100-250 m (%)	0,60	0,70	2,20	0,50	0,80	0,60	0,40
Arena media, 250-500 m (%)	0,25	0,30	3,10	-	0,10	0,10	0,20
Arena gruesa, 500-1000 m (%)	0,08	0,10	0,50	-	-	0,40	-
Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)	0,01	0,10	-	-	0,20	-	-
pH en agua (1:2,5)	6,00	6,57	6,82	6,88	7,09	8,08	8,32
Cationes de Intercambio							
(meq/100g)							
Ca <sup>++</sup>	6,80	7,65	8,33	8,96	9,02	8,59	-
Mg <sup>++</sup>	2,52	1,60	1,60	1,71	1,95	2,04	-
Na <sup>+</sup>	0,38	0,43	0,30	0,30	0,29	0,26	0,25
K <sup>+</sup>	2,07	1,98	1,57	1,61	1,60	1,58	1,46
Suma de bases (meq/100g)	11,77	11,66	11,80	12,58	12,90	12,44	-
CIC (meq/100g)	12,03	11,30	10,53	12,90	11,20	11,00	10,50
Saturación con bases (%)	98	100	100	100	100	100	-

### 3. PLANTEAMIENTO DE LA EXPERIENCIA.

#### 3.1. Superficie de ensayo.

El trabajo se desarrolló en un ensayo de rotaciones y labranzas, implementado desde el año 1994 hasta la fecha sobre dos rotaciones históricas: agrícola (RA) y agrícola-ganadera (RAG).

La rotación agrícola se inició en base a maíz (*Zea mays L.*) – girasol (*Helianthus annuus L.*) y fue reemplazada a partir de la campaña 2003/2004 hasta la actualidad por maíz-soja (*Glycine max L.*). En la campaña 2012/2013 se realizó maíz, sobre cuyo rastrojo se trabajó en este estudio.

La rotación agrícola - ganadera de bovinos posee un esquema de rotación 3:3, es decir, 3 años agricultura en base a maíz soja: 3 años pastura consociada en base a alfalfa (*Medicago sativa L.*), cebadilla (*Bromus unioloides K.*) y pasto ovilla (*Dactylis glomerata L.*). El sistema de pastoreo es de alta intensidad y carga instantánea, con animales bovinos (terneros, vacas y vaquillonas) y un nivel de cosecha aproximado del 75% del forraje disponible. Desde el inicio del ensayo hasta el momento de realización del presente estudio ha habido 2 ciclos ganaderos de 3 años de duración intercalados con los ciclos agrícolas. El último año del ciclo de pastura concluyó en mayo de 2010 momento en el que la pastura fue roturada, posteriormente en el primer año del ciclo agrícola (campaña 2010/2011) se realizó maíz, en la campaña siguiente (2011/2012) se sembró soja y en la campaña 2012/2013 se volvió a sembrar maíz, es decir que al momento de realización de la experiencia, el lote se encontraba en su tercer y último año del ciclo agrícola.

El cultivo de maíz de la campaña 2012/2013 se implantó con el sistema de siembra directa y fue fertilizado a la siembra con 130 kg.ha<sup>-1</sup> de fosfato diamónico y 130 kg/ha de urea granulada en el estadio de 5 – 6 hojas.

Como ya se explicó anteriormente, independientemente de la rotación, el lote donde se realizaron los estudios del presente trabajo, se encontraba bajo la cubierta del rastrojo de maíz, (foto 1).



**Foto 1. Vista del lote donde se realizó el presente estudio, mostrando el abundante rastrojo que dejó el cultivo de maíz (05/2013).**

### **3.2. Tratamientos y Diseño Experimental.**

El diseño experimental fue en parcelas divididas (DPD), en el cual hubieron dos factores de clasificación: A) rotación y B) cobertura superficial con rastrojos, ambos con dos niveles.

En el primer factor los niveles fueron: rotación agrícola (RA) en base a maíz-soja y rotación agrícola – ganadera (RAG) (actualmente en ciclo agrícola, con maíz) y en el segundo factor: 100% de cobertura superficial de rastrojos, generada mediante el agregado y/o reacomodamiento de rastrojos de la cosecha de maíz y 0% de cobertura superficial, producido mediante la remoción total de dicho rastrojo, (foto 2).



**Foto 2. Vista del lote donde se realizó el presente estudio, con los simuladores de lluvia representando a los niveles con y sin cobertura superficial de rastrojos.**

El factor A) ocupó la parcela principal, mientras que el factor B) la parcela secundaria. De este modo quedaron constituidos cuatro (4) tratamientos: RA 100%, RA 0%, RAG 100% RAG 0%, con cuatro (4) bloques o repeticiones espaciales por cada uno de ellos (Figura 3). Cabe aclarar que el factor B fue aleatorizado con el fin de disminuir el error experimental.

	<b>R. A</b>		<b>R. A-G</b>
<b>BI</b>	100%	0%	0%
			100%
	<b>R. A-G</b>		<b>R. A</b>
<b>BII</b>	0%	100%	100%
			0%
	<b>R. A</b>		<b>R.A-G</b>
<b>BIII</b>	100%	0%	0%
			100%
	<b>R.A-G</b>		<b>R. A</b>
<b>BIV</b>	0%	100%	100%
			0%

**Figura 3. Esquema del diseño experimental del ensayo.**

### 3.3. Variables evaluadas.

Mediante un microsimulador de lluvia (Iruetia y Luque, 2005), se simularon precipitaciones de alta intensidad ( $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ), sobre parcelas de  $0,25 \text{ m}^2$  que duraron en promedio, una hora y media (1,30 h). En la figura 4 se muestra el esquema del simulador de lluvia, diseñado por Iruetia y Luque (1994), similar al utilizado en el presente estudio (foto 2).

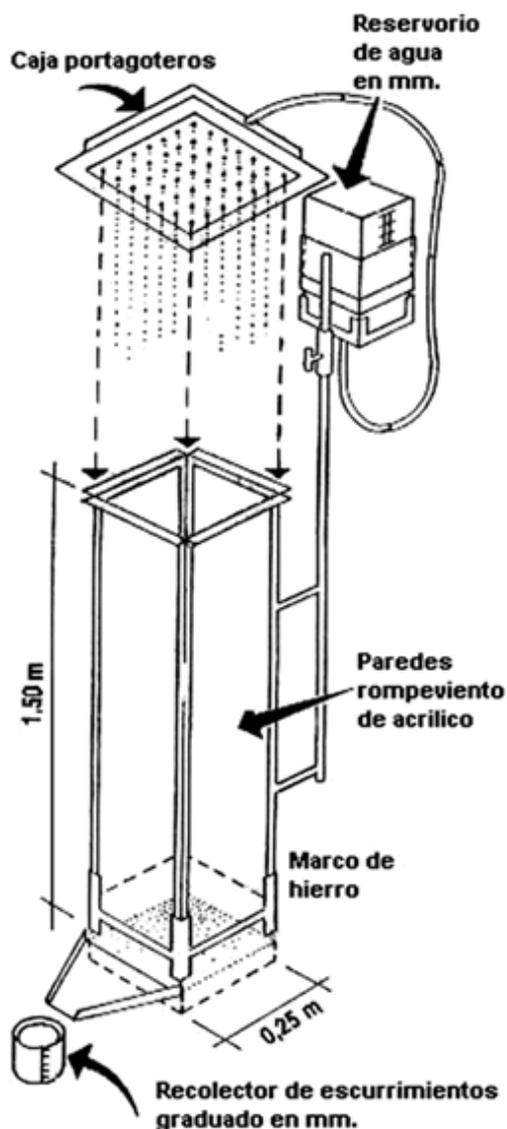


Figura 4. Esquema básico del microsimulador de lluvias. (Iruetia y Luque, 1994)

A intervalos de aproximadamente 5 a 10 minutos y en el lapso de duración de la simulación, se registró la lámina llovida y se tomó lectura y recogió la lámina de agua escurrida más los sedimentos erodados en un recipiente colector colocado en un pozo, aguas

abajo de la parcela del simulador donde desemboca el vertedero del mismo. El mismo se observa en la foto 3.



**Foto 3. Detalle del vertedero del simulador de lluvias y del recipiente colector de la lámina escurrida (mm), colocado aguas abajo.**

A partir de este procedimiento se determinaron las siguientes variables:

- Tiempo de encharcamiento: se registró a través de la observación del inicio del proceso de retención de agua en las microrugosidades superficiales presentes en la microparcela. Se expresó en minutos (min);
- Tiempo de inicio del escurrimiento: mediante el registro del momento en que el recipiente graduado comenzó a captar agua de escurrimiento. También fue expresada en minutos (min);
- Lámina total de agua infiltrada: se obtuvo a partir de la diferencia entre la precipitación total producida (mm) y la lámina de agua escurrida (mm) y se expresó en milímetros (mm);

- Velocidad de infiltración final: se obtuvo del promedio de las tres últimas velocidades parciales de infiltración, cercanas a la hora y media de simulación y se expresó en milímetros por hora ( $\text{mm.h}^{-1}$ ). La velocidad parcial de infiltración se logró partir de la relación entre la lámina parcial de agua infiltrada y el tiempo parcial de simulación. También se expresó en ( $\text{mm.h}^{-1}$ );
- Lámina total de agua escurrida: Se obtuvo a través de la sumatoria de las láminas parciales de escurrimiento (mm) a lo largo de toda la duración de la simulación. Se expresó en milímetros (mm);
- Coeficiente de escurrimiento (C) se consiguió mediante la relación entre los milímetros totales escurridos y los llovidos. Se expresó en coeficiente. La relación es la siguiente, (Cisneros *et al.* 2010):

$$C = (\text{mm escurridos/mm llovidos}) * 100$$

- Pérdida de suelo: el agua de escurrimiento junto con el material erodado fue colocado en botellas de plástico y llevado a laboratorio. Aquí se dejaron decantar alrededor de 2 días. Una vez sucedido esto se desechó la mayor cantidad de agua posible y se llevó a estufa a 30 °C para su secado hasta peso constante para determinar el peso de los sedimentos transportados por el agua de escurrimiento. La pérdida de suelo fue expresada en  $\text{tn.ha}^{-1}$ ;
- Contenido de materia orgánica disponible en el sedimento erodado: a partir del sedimento que fue preparado y tamizado, se tomó una pequeña alícuota en la cual se evaluó el carbono orgánico total (COT), según método de Mebius (Mebius 1960), y luego a través de la fórmula expuesta a continuación, fue transformado y expresado en porcentaje de materia orgánica (% MOT).

$$\% \text{ MOT} = \text{ml de Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2 \times (1 - T/S) \times 1,34$$

S: ml de disolución ferrosa gastados en la valoración del ensayo en blanco.

T: ml de disolución ferrosa gastados en la valoración de la muestra.

-Para 0,5 g de alícuota de suelo el factor es 1,34, esto se deduce de:

$$\text{Normalidad de Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2 \times (12 / 4000) \times (1,72/0,77) \times 100 / 0,5 = 1,34$$

**1,72:** factor de transformación de carbono orgánico en materia orgánica.

**12/4000:** peso en meq (miliequivalente) del C.

**0,77:** factor de recuperación del método, ya que está comprobado que el 77 % del carbono se oxida con Dicromato.

Este mismo procedimiento se realizó en el suelo de cada tratamiento y repetición, a través de la extracción de una muestra compuesta por tres sub-muestras del horizonte superficial. La muestra se extrajo entre los 0 y 10 cm de profundidad y la MOT se expresó en porcentaje (%);

- Enriquecimiento de materia orgánica: Esta variable surge de la diferencia entre el porcentaje de materia orgánica en el sedimento y el porcentaje de la misma en el suelo y fue expresado en gramos de materia orgánica por kilogramos de suelo. ( $\text{g.kg}^{-1}$ ). Además se estimó otra variable relacionada que es la tasa de enriquecimiento, que de acuerdo a Sharpley, (1985) es la relación comprendida entre la concentración en el sedimento del nutriente en cuestión (MOT) con la concentración de ese nutriente en el suelo original. Esta variable es adimensional;
- Contenido de fósforo extractable (Pe) en el sedimento erodado: se determinó el fósforo disponible a través del método de Bray (Bray y Kurtz ,1945) y se expresó en partes por millón (ppm). Al igual que para la variable MOT, también se midió el fósforo en el suelo de cada tratamiento y repetición, a partir de la extracción de una muestra compuesta por tres sub-muestras del horizonte superficial de 0-10 cm de profundidad y se expresó en ppm;
- Enriquecimiento de fósforo: se logró a partir de la diferencia entre la concentración de fósforo en el sedimento y la concentración del mismo en el suelo original. Se expresó en miligramos por kilogramo de suelo. ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ). Y se estimó la tasa de enriquecimiento de fósforo, mediante la relación entre la concentración de Pe en el sedimento erodado y el Pe en el suelo que le dio origen (Sharpley, 1985). La unidad de esta última variable es adimensional;
- Profundidad de humedecimiento de la lámina infiltrada: en el perfil de suelo donde fue realizada cada simulación de lluvia se realizó una calicata, donde

se midió la profundidad de humedecimiento (cm) de la lámina de agua infiltrada (mm). Esta variable se expresó en centímetros (cm);

- Simulación a través del modelo RUSLE-2: con el fin de estimar la pérdida de suelo mediante un modelo de simulación, se utilizó el “Revised Universal Soil Equation” (RUSLE-2) versión 2 (USDA-Agricultural Research Service, 2008), considerando las mismas condiciones de uso y manejo que se evaluaron a campo, (Wischmeier y Smith, 1978). Este sistema permite de forma empírica, estimar la pérdida de suelo en  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , combinando la energía erosiva de la lluvia (R), la erosionabilidad del suelo (K), el largo e intensidad de la pendiente (LS), cobertura y manejo (C) y prácticas de conservación (P). Este modelo ha sido utilizado para estimar la erosión en la provincia de Córdoba por Cisneros *et al.*, (2004), de Prada *et al.*, (2008), Marelli, (2012).

La ecuación básica del modelo EUPS es la siguiente:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

En donde:

**A** = pérdida anual de suelo, ( $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  ó  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ )

**R** = factor de erosividad por la precipitación pluvial, ( $\text{MJ}\cdot\text{mm}/\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{año}$ )

**K** = factor de erodabilidad del suelo, ( $\text{tm}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}/\text{ha}\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm}$ ).

**L** = factor de longitud de la pendiente, (Adimensional).

**S** = factor de gradiente de pendiente; (Adimensional).

**C** = factor de manejo de cosechas; (Adimensional).

**P** = factor del método de control de erosión. (Adimensional).

**Referencias:** mm= milímetros: MJ= Mega Joule: ha= hectárea: tm= tonelada métrica: h= hora.

Cabe aclarar, que el modelo calcula la pérdida de suelo en  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , mientras que la simulación realizada a campo se expresa en  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{tormenta}^{-1}$ . Debido a esto, se decidió utilizar el modelo para obtener una información adicional sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica en una escala de tiempo mayor y realizada a través de un modelo ampliamente utilizado (Cisneros *et al.*, 2004; De Prada *et al.*, 2008; Marelli, 2012) y adaptada a nivel mundial, (Wischmeier y Smith, 1978); ya que los resultados obtenidos por ambos modelos no son comparables entre sí.

Como se explicará en el capítulo de “resultados y conclusión” las variables de clasificación rotación y cobertura superficial, no tuvieron interacción estadísticamente significativa, por lo tanto se realizó la simulación de todas las situaciones o niveles: rotación agrícola (RA); rotación agrícola-ganadera (RAG); cobertura superficial del 100% (C 100%) y cobertura superficial del 0% (C 0%). Para cada situación se simularon dos períodos de tiempo, 20 años (antigüedad del ensayo) y 6 años, período que corresponde a la duración de la RAG.

*Todos los factores del modelo, a excepción del factor C, se calcularon de la misma forma para todas las situaciones simuladas:*

**R** = Fue calculado a través de un registro histórico de precipitaciones y temperaturas medias mensuales para la localidad del presente estudio. A su vez, el modelo exige poner una tormenta con un intervalo de recurrencia de ocurrencia de 10 años, por lo que se decidió escoger la precipitación con la que se trabajó a campo ( $100 \text{ mm.h}^{-1}$ ).

**K** = Se incorporaron la textura (franco arenosa), el porcentaje de las distintas fracciones, el grupo hidrológico de suelo (C) y la permeabilidad del suelo en cuestión (moderada), entre otras cosas.

**L y S** = En este caso, tanto la longitud (m) como el gradiente (%) de la pendiente fueron seleccionados a través de trabajos anteriores realizados en el mismo sitio experimental (Becker et al., 2008) y a su vez corroborado a través de Google earth. El valor fue de 200 m y 2.5 %.

**C** = En la RAG se simularon los tres años correspondientes al ciclo ganadero, con pastura base “alfalfa” (*Medicago sativa. spp*) y los tres años del ciclo agrícola con una rotación de maíz-soja-maíz. En la RA, se realizó la simulación de la rotación soja-maíz.

El rendimiento medio de los cultivos fue 31 y 95 qq.ha<sup>-1</sup> para soja y maíz, respectivamente. En el caso de la alfalfa se estimó un rendimiento anual aproximado de 10.000 kg.año<sup>-1</sup>, con 10 cortes a lo largo de su vida útil. Estos rindes fueron escogidos de acuerdo al rendimiento medio de los últimos ciclos agrícolas-ganaderos, con el fin de aproximarse lo más posible a la realidad experimentada en el ensayo a campo.

Para simular las dos situaciones de cobertura superficial, se tuvo en cuenta la cobertura dejada por maíz simulado (57 %) , por lo tanto para realizar el nivel C 0% se retiró

la cantidad total de rastrojo y para la situación C 100% se agregó el 43 % de cobertura superficial de rastrojos.

Todos los cultivos realizados fueron bajo el sistema de siembra directa. Para todas las actividades realizadas hasta la cosecha, se indicó la velocidad óptima de trabajo para cada caso.

**P** = La única practica de conservación que se realizó, fue la siembra de los cultivos cortando la pendiente diagonalmente, es decir, con una pendiente relativa del 25 % de la pendiente general del terreno (2.5%), citada anteriormente.

En la figura 5 se aprecia un ejemplo del modelo de simulación RUSLE-2, donde se indica la ubicación de cada uno de los módulos o factores y los resultados obtenidos.

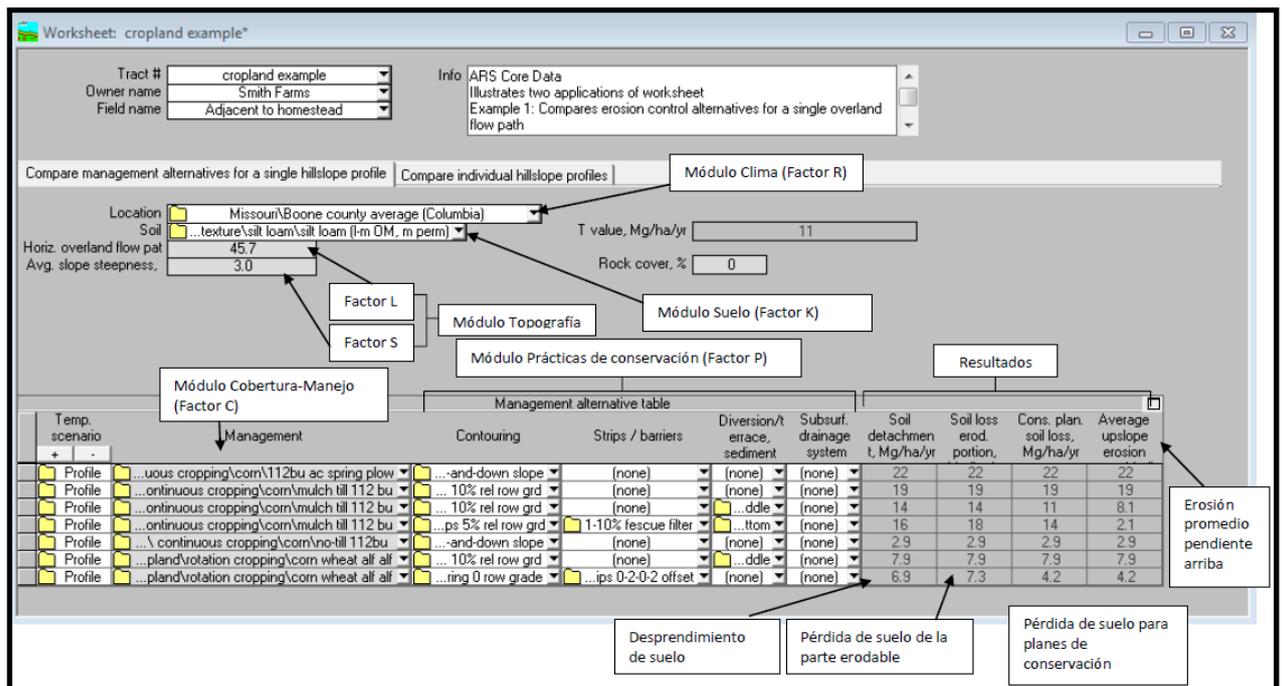


Figura 5. Vista del modelo de simulador RUSLE-2, (USDA-Agricultural Research Service, 2008).

### 3.4. Análisis Estadístico.

Mediante el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011) se realizaron ANOVAs, comparación de medias a través del test de Tukey con un nivel de significancia del 5 %, y se realizaron análisis de correlación entre las variables medidas que fueron valorados a través del coeficiente de correlación de Pearson, también con un nivel de significancia del 5 %.

Cuando no existió interacción estadísticamente significativa (ANOVA) entre ambas variables de clasificación (rotación y cobertura), no se observó la necesidad de aclararlo en el capítulo de “resultados y discusión”, ya que cada variable de clasificación se analizó individualmente con cada variable evaluada.

Un ejemplo de esto es analizar: por un lado la variable pérdida de suelo con la rotación y sus dos niveles (RA y RAG) y por el otro la pérdida de suelo con la cobertura superficial de rastrojos con sus dos niveles (C 0 % y C 100%).

Tanto la variable pérdida del suelo ( $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) como la profundidad de humedecimiento (cm) no cumplieron con los supuestos necesarios para poder realizar el ANOVA, por lo tanto, se tuvo que realizar la transformación de las mismas a Logaritmo natural (Ln) para poder analizarlas estadísticamente. A pesar de esto, una vez realizado los análisis estadísticos pertinentes, las unidades de medición de ambas variables se volvieron a transformar, en  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  y cm para pérdida de suelo y profundidad de humedecimiento, respectivamente.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 1. TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO Y ESCURRIMIENTO.

El tiempo de encharcamiento no tuvo diferencias estadísticamente significativas ( $p \geq 0,05$ ) entre ambos niveles de cobertura. Sin embargo, en el suelo desnudo el encharcamiento se presentó antes que en el suelo con cobertura, (Tabla 3). Esta diferencia, aunque mínima se debe en parte al efecto de la cobertura, que protege la superficie del suelo de los efectos erosivos de la lluvia y del viento generando un impedimento para que la gota no impacte directamente sobre el suelo y manteniendo la rugosidad en superficie. De este modo evita el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas y mantiene condiciones propicias para la infiltración de agua en el perfil, (Cisneros *et al.*, 2012).

**Tabla 3. Diferencia de medias del tiempo de encharcamiento (min) entre coberturas, en La Aguada, Córdoba.**

COBERTURA	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	5,97	8	0,91	A
0 % Cobertura	5,35	8	0,91	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

La diferencia entre la rotación agrícola y agrícola-ganadera en el tiempo de encharcamiento, aunque mayor que en el anterior caso, también careció de significancia estadística, ( $p \geq 0,05$ ). En el suelo de la rotación mixta, el tiempo de retención del agua fue mayor que en la rotación agrícola pura (Tabla 4), es decir, que el suelo de la primera rotación, independientemente del porcentaje de cobertura edáfica, mantuvo la infiltración inicial constante por mayor tiempo.

**Tabla 4. Diferencia de medias del tiempo de encharcamiento (min) entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	6,40	8	1,29	A
Agrícola	4,92	8	1,29	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Torres *et al.*, (2000) sobre un Ultisol de Venezuela, evaluaron dos manejos de la cobertura, con residuos orgánicos de gramíneas y leguminosas (CR), y un tratamiento sin residuos (SR). Las propiedades hidrológicas fueron evaluadas por simulación de lluvia con una intensidad de  $120 \text{ mm.h}^{-1}$ . Los autores pudieron determinar que el tiempo de encharcamiento e inicio del escurrimiento fueron significativamente menores en las parcelas donde no se colocaron residuos como cobertura, respecto a las situaciones que poseían cobertura vegetal.

En el presente trabajo, el tiempo de inicio de escurrimiento careció de diferencias estadísticamente significativas ( $p \geq 0,05$ ) entre los niveles de cada una de las variables de clasificación (rotación y cobertura). Sin embargo, del análisis de los valores absolutos surge que en la rotación agrícola-ganadera, el tiempo de escurrimiento fue mayor que en la rotación agrícola pura (Tabla 5), pudiéndolo asociar a las diferencias halladas en el tiempo de encharcamiento.

**Tabla 5. Diferencia de medias del tiempo de escurrimiento (min) entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	7,65	8	1,69	A
Agrícola	6,47	8	1,69	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Cuando se consideró el efecto de la cobertura superficial, se observó que tampoco hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos e incluso las diferencias en los valores absolutos fueron mínimas (10 segundos) (Tabla 6).

**Tabla 6. Diferencia de medias del tiempo de escurrimiento (min) entre coberturas, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	7,11	8	0,70	A
0 % Cobertura	7,01	8	0,70	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Cabe aclarar, que las variables tiempo de encharcamiento y tiempo de inicio de escurrimiento estuvieron íntima, directa y positivamente correlacionadas, (Tabla 7); por lo tanto al presentarse antes el encharcamiento en la rotación agrícola, el tiempo en el que comenzó a escurrir el agua también lo hizo.

**Tabla 7. Coeficiente de correlación de Pearson.**

Variable 1	Variable 2	N	Pearson	p - valor
Tiempo de Encharcamiento (min)	Tiempo de Escurrimiento (min)	16	0,92	$\leq 0,0001$

Correlación significativa ( $p \leq 0,05$ ).

Betancourt *et al.*, (2000) trabajando en México con lluvia simulada y tres intensidades,  $50 \text{ mm.h}^{-1}$ ,  $70 \text{ mm.h}^{-1}$  y  $120 \text{ mm.h}^{-1}$ , manifestaron que el tiempo necesario para el inicio del escurrimiento fue mayor en la menor intensidad evaluada cuando la cobertura era de “Gramma rhodes” (*Chloris gayana spp*) y “pasto nativo”. Por otro lado, a diferencia de lo observado en el presente trabajo, el escurrimiento se presentó más rápido en las parcelas con suelo desnudo, siendo apenas entre 1 y 4 min los tiempos necesarios para el inicio de éste proceso. De La Vega *et al.*, (2004) encontraron que en la situación cubierta el escurrimiento se inició a los 24, 1 mm de lluvia acumulada, mientras que, cuando el suelo estuvo descubierto el escurrimiento se inició a los 11, 6 mm de la lámina de lluvia acumulada.

## 2. LÁMINA ESCURRIDA Y COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO.

Tanto la lámina escurrida como el coeficiente de escurrimiento fueron mayores en el tratamiento sin cobertura que en el de 100 % de cobertura, sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativas ( $p \geq 0,05$ ), (Tablas 8 y 9).

**Tabla 8. Diferencia de medias de lámina escurrida (mm) entre coberturas, en La Aguada, Córdoba.**

COBERTURA	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	61,53	8	5,28	A
0% Cobertura	75,57	8	5,28	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

**Tabla 9. Diferencia de medias del coeficiente de escurrimiento entre coberturas en La Aguada, Córdoba.**

COBERTURA	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	0,37	8	2,72	A
0% Cobertura	0,43	8	2,72	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Estos resultados pueden ser explicados a través de lo expuesto por Cisneros *et al.*, (2012): “La cobertura protege la superficie del suelo de los efectos erosivos de la lluvia y del viento generando un impedimento para que la gota no impacte directamente sobre el suelo y aumente la rugosidad en superficie”. “De este modo evita el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas, mantiene condiciones propicias para la infiltración de agua en el perfil; disminuyendo así las pérdidas por escurrimiento”.

Otro factor que pudo haber influido en el menor escurrimiento observado en la situación de suelo cubierto es el gran volumen de materia seca que aportó la cosecha del

cultivo de maíz antecesor. Este aspecto es fundamental ya que si el rastrojo hubiese sido de algún cultivo leguminoso, como el de soja, ya sea por la cantidad como por la calidad del rastrojo aportado, el efecto de protección podría haber sido de menor intensidad que en el caso de la cubierta con rastrojo de maíz. Cisneros *et al.*, (2012), apoyan lo expuesto anteriormente, al sostener que en rotaciones que generen grandes cantidades de residuos y cobertura (e.g. soja-maíz, soja-trigo, maíz-soja-trigo-soja, sorgo-soja) como ocurre especialmente luego de la cosecha de la gramínea, junto con sistemas de labranza conservacionistas (e.g. siembra directa) que no produzcan gran enterramiento de los mismos, son alternativas interesantes de manejo de la cobertura superficial en zonas susceptibles a la erosión.

Por su parte, De La Vega *et al.*, (2004) estudiando estas variables sobre un Argiudol vértico en siembra directa en la localidad de San Pedro, provincia de Buenos Aires, encontraron un distinto volumen de escurrimiento, reflejado en un coeficiente de escurrimiento mayor ( $p < 0.05$ ) en el suelo descubierto (0,57) respecto al cubierto (0,34). Chagas *et al.*, (2004) en las mismas situaciones que el estudio citado anteriormente, observaron que los valores totales de escurrimiento superficial resultaron significativamente más elevados para el tratamiento sin cobertura edáfica, principalmente durante la segunda lluvia aplicada. Estos resultados se apoyan en ECAF, (1999) que sostienen que bajo SD continúa la cobertura superficial de residuos de cosecha y el incremento en los niveles de materia orgánica en los primeros centímetros del suelo producen el aumento de la tasa de infiltración y de la capacidad de almacenamiento de agua y la reducción de la esorrentía.

En una experiencia con simulador de lluvia en Argiudoles típicos de Marcos Juárez, Marelli *et al.*, (2006) evaluaron el efecto de la cantidad de rastrojos superficiales sobre las pérdidas de agua por escurrimiento. Los autores determinaron que la importancia de la cantidad de rastrojos está asociada a la proporción de cobertura que esa cantidad genera. A su vez, estos pudieron apreciar que el máximo escurrimiento se produce en el tratamiento sin cobertura, mientras que los demás tratamientos (con cobertura), tuvieron valores menores. Con respecto a esto, Merrill *et al.*, (2002) estimaron que el riesgo de erosión disminuye marcadamente a partir de un 40% de cobertura superficial, reduciendo principalmente la capacidad de los agentes erosivos (i.e. energía cinética de la lluvia y velocidad de escurrimiento superficial) de generar el desprendimiento de las partículas del horizonte superficial y de transportarlas en el agua de escurrimiento. Los resultados mostraron la disminución del porcentaje de escurrimiento a medida que se incrementa la proporción de superficie cubierta, asociado fundamentalmente al mantenimiento de la velocidad de infiltración inicial al no haberse alterado la estructura de la capa superficial del suelo.

De la misma manera, aunque más marcadas en valor absoluto, las diferencias en la lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento entre los dos niveles de rotación carecieron de significancia estadística, ( $p \geq 0,05$ ). En la primer variable la lámina escurrida se presentó con 88,41 mm para la rotación agrícola-ganadera y 48,69 mm para la agrícola pura; si bien esta diferencia abultada no alcanzó para ser estadísticamente significativa ( $p = 0,06$ ), es importante destacar la proximidad con el valor “p” del test (0,05) (Tabla 10).

**Tabla 10. Diferencia de medias de lámina escurrida (mm) entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	88,41	8	9,59	A
Agrícola	48,69	8	9,59	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

El coeficiente de escurrimiento se comportó de la misma manera, aunque con diferencias no tan contrastantes. En la rotación mixta se obtuvo que un 51,36 % de la lámina total llovida escurría mientras que en la rotación agrícola pura solo fue de un 29,76 %, ( $p \geq 0,05$ ), (Tabla 11). Aquí el p-valor del test de Tukey fue un poco mayor que para la anterior variable ( $p = 0,07$ )

**Tabla 11. Diferencia de medias del coeficiente de escurrimiento entre rotaciones en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	0,51	8	5,57	A
Agrícola	0,29	8	5,57	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Estos valores resultan un tanto contradictorios si se consideran lo analizado por Peralta, (2011) en cuanto a la estabilidad estructural de la capa superficial del suelo en el mismo sitio, lote y sistemas de manejo (rotaciones) analizados en el presente trabajo. El

autor demostró que la rotación agrícola-ganadera durante el ciclo que duró la pastura, produjo un mejoramiento de la estabilidad estructural del suelo respecto a la rotación agrícola y el diámetro ponderal de los agregados se aproximó al que presentó el mismo suelo en condición de mínimo disturbio. Esto, Peralta (2011), lo atribuyó a que durante el período de la pastura hubo menor deterioro de la estructura como así también una recuperación de su estabilidad producto del aporte de materia orgánica por biomasa aérea y radical, y por la no remoción del suelo durante dicho período. Según Studdert *et al.*, (1997) en los períodos bajo pastura se incrementan los contenidos de MO y de sus fracciones lábiles debido a un mayor aporte de C por debajo de la superficie del suelo asociada al volumen y densidad de sus raíces.

Sin embargo, en el presente trabajo los valores tanto de coeficiente de escurrimiento como de lámina escurrida fueron mayores en la RAG, y esto podría estar relacionado al momento en el que se realizó el presente estudio. Como se había mencionado con anterioridad, el trabajo se realizó sobre un rastrojo de maíz perteneciente al tercer y último año del ciclo agrícola de la rotación mixta, cuestión que tal vez hizo disminuir la estabilidad estructural del suelo generada y ganada durante el ciclo que duró la pastura, de acuerdo a lo planteado por Studdert *et al.*, (1997).

Otro motivo por el cual pudo haberse obtenido estos resultados, está relacionado al porcentaje de materia orgánica total (MOT), ya que como se verá más adelante en la rotación agrícola-ganadera el % MOT fue menor que en la rotación agrícola pura (tabla 21), aunque con diferencias no significativas. Al respecto, Massobrio, (2012), trabajando también en el mismo sitio experimental que el presente trabajo, halló que: “la intervención antrópica sobre suelos no disturbados, para el uso agrícola y/o agrícola-ganadero, genera una fuerte caída en los contenidos de MOT”. Sin embargo el autor concluyó que en general, en la rotación mixta la implantación de pasturas perennes permite un incremento en el porcentaje de materia orgánica, respecto a la rotación agrícola pura, en los 16 años de transcurrido el ensayo, aunque las diferencias no son significativas.

Casanovas *et al.*, (1995) concluyeron: “Las situaciones con mayor intensidad de agricultura los niveles de MO tienden a ser menores y algo más estables en el tiempo que aquellas en las que se incluyen pasturas dentro de la rotación. En estas últimas el contenido de MO tiende a elevarse durante los ciclos de pasturas para disminuir en el siguiente ciclo agrícola, originándose una variación en los niveles de MO”.

Como esta estudiado, la MOT ha mostrado ser una función de estabilidad de los agregados (Studdert *et al.*, 1997; Angers, 1998; Dominguez *et al.*, (2008), es por esto que tal

vez hubo mayor escurrimiento en la rotación agrícola-ganadera, donde el menor % de MOT se tradujo en una menor estabilidad estructural de este suelo con respecto al de la rotación pura.

Sin embargo, todas estas son conjeturas, ya que si bien los valores de “p” del test de Tukey fueron muy cercanos al 5 % confianza, no fueron suficientes como para que las variables lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento posean diferencias estadísticamente significativas entre las distintas rotaciones,

En este sentido, Chagas (1995), evaluó el efecto de la estabilidad estructural y rugosidad superficial, sobre la erosión laminar en dos condiciones de degradación estructural de un Argiudol típico de Marcos Juárez: degradado (agricultura continua durante 15 años) y no degradado (rotación agrícola-ganadera con dos ciclos de pastura de 5 años de duración). Los resultados indicaron que la estabilidad estructural (rotación) no tuvo un efecto muy sobresaliente ya que una diferencia de 63% en el nivel de degradación de los suelos, sólo redujo un 25% el volumen de escurrimiento. En otro trabajo realizado en la provincia de Entre Ríos sobre un Argiudol ácuico, se encontró resultados opuestos a los hallados en el presente trabajo, ya que el suelo descubierto superó 9 veces la pérdida de agua de la pastura y los monocultivos de soja y maíz continuos tuvieron una importante pérdida de agua, que resultó: 7 veces mayor que la pastura. Las secuencias: soja continua con cultivo de cobertura otoño-invernal (T/S) y maíz-trigo/soja (M-T/S), tuvieron pérdidas de agua similares e intermedias. En conclusión, la pastura fue la que menor lámina escurrida arrojó, (Sasal *et al.*, 2004).

Por otro lado, está estudiado que el pastoreo directo a través del pisoteo, produce cambios perjudiciales en la estructura y propiedades hidrológicas del suelo, aspecto que pudo haber influido en la mayor pérdida de agua escurrida en la rotación agrícola-ganadera, respecto a la agrícola.

En el sitio estudiando en el presente trabajo, el sistema de pastoreo fue de alta intensidad y carga instantánea, con un índice de cosecha aproximado del 75% del forraje disponible.

Según Blanco y Lal, (2010), el excesivo pastoreo o sobrepastoreo incrementa el escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo por erosión debido a múltiples causas. Una de ellas, es la acción ejercida por el pisoteo animal repetido (e.g. pastoreo continuo), con elevadas cargas animales, especialmente cuando el contenido de agua edáfica es elevado, que genera compactación superficial como consecuencia del amasado y remoldeado (Taboada, 2010). En regiones áridas o semiáridas o en condiciones de escasa humedad, el

pisoteo animal rompe la estructura superficial y pulveriza la superficie del suelo, causando la pérdida de partículas finas por erosión eólica, (Blanco y Lal, 2010). También, esto genera el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas, afectando la infiltración del agua y por lo tanto generando mayor pérdida por escurrimiento. (Cisneros et al., 2012). A su vez, no deja de ser redundante remarcar, que el momento en el que se realizó el ensayo, el lote de experimentación de la RAG, se hallaba en el último año del ciclo agrícola, cuestión que tal vez redujo al mínimo los beneficios traídos por la pastura. De la misma manera es posible que haya influido, la calidad de la pastura (mediana a mala calidad), dada por su mala mantención y al mismo tiempo la duración de la misma (3 años), tiempo que quizás fue menor que el recomendado para la región, suelo, situación y manejo del lote estudiado.

Cabrera *et al.*, (2011) evaluó el efecto del pisoteo animal sobre algunas propiedades hidrofísicas de un Hapludol típico, implantado con Triticale, mediante un sistema de pastoreo rotativo, con cuatro niveles de carga animal que correspondieron a asignaciones de forraje de 2, 4, 6 y 8 kg materia seca cada 100 kg (%) de peso vivo animal por día, en dos condiciones de humedad edáfica: Suelo seco (11 %) y Suelo húmedo (18 %). Se tomó como referencia un sistema no pastoreado. Los autores determinaron que la densidad aparente (DA) presentó un aumento ( $p < 0,05$ ) en 0-10 cm de profundidad, siendo éste más acentuado en los primeros 0-5 cm y disminuyó la velocidad de infiltración inicial (VII) y final (VIF) respecto al testigo; el mayor contenido hídrico al momento del pastoreo incrementó estos efectos. El nivel de asignación de forraje y la humedad edáfica al momento del pisoteo demostraron ser dos factores que modificaron el comportamiento hidrofísico del suelo bajo estudio. El incremento de la carga animal produjo una disminución de la VII y un aumento en la DA, potenciándose este efecto en la condición de suelo húmedo. Las asignaciones del 6 y 8% podrían ser niveles de carga animal que no modificarían las condiciones hidrofísicas del suelo en relación a la condición sin pastorear.

Estos resultados hallados por Cabrera *et al.*, (2011) son un reflejo de lo que podría haber ocurrido o sucedido en el suelo del lote bajo estudio, ya que se realizó en el mismo establecimiento ("Pozo del Carril") y suelo (Hapludol típico) del presente trabajo. A su vez da una idea de la carga animal óptima para sistemas pastoriles en suelos representativos de la llanura fuertemente ondulada del centro-sur de la provincia de Córdoba, cuestión que no se repitió en el transcurso del ensayo que como ya se mencionó lleva 20 años de antigüedad.

La lámina escurrida (mm) y el coeficiente de escurrimiento (%) son variables que con distintas unidades de medidas, se interpretan de la misma manera. Al mismo tiempo se demostró que estuvieron correlacionadas positivamente ( $p \leq 0,05$ ), (Tabla 12).

**Tabla 12. Coeficiente de correlación de Pearson.**

<b>Variable 1</b>	<b>Variable 2</b>	<b>N</b>	<b>Pearson</b>	<b>p - valor</b>
Lámina escurrida (mm)	Coeficiente de escurrimiento	16	0,98	<0,0001
Lámina escurrida (mm)	Enriquecimiento de MO (g.kg <sup>-1</sup> )	16	0,61	0,0116
Coeficiente de escurrimiento	Enriquecimiento de MO (g.kg <sup>-1</sup> )	16	0,63	0,0086
Lámina escurrida (mm)	Infiltración Final (mm.h <sup>-1</sup> )	16	- 0,92	<0,0001
Coeficiente de escurrimiento	Infiltración Final (mm.h <sup>-1</sup> )	16	- 0,94	<0,0001
Lámina escurrida (mm)	Lámina total infiltrada (mm)	16	- 0,91	<0,0001
Coeficiente de escurrimiento	Lámina total infiltrada (mm)	16	- 0,97	<0,0001

Correlación significativa ( $p \leq 0,05$ ).

Del análisis de correlación realizado entre la lámina escurrida y/o coeficiente de escurrimiento con la velocidad de infiltración y el enriquecimiento de materia orgánica del sedimento erodado, surgieron evidencias estadísticamente significativas de la existencia de relación lineal entre ellas (Tabla 12). Se observó una correlación significativa y negativa entre la lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento con la infiltración final, indicando que a medida que se perdió mayor cantidad de agua por escurrimiento, menor fue la tasa de ingreso de agua al perfil, y en consecuencia menor fue el volumen de agua infiltrado en el suelo, coincidiendo con lo planteado por Cisneros *et al.*, (2012).

Por otro lado, independientemente del tratamiento, a medida que se perdió mayor cantidad de agua por escurrimiento (mm), mayor fue el enriquecimiento del sedimento con materia orgánica (g.kg<sup>-1</sup>). ( $p \leq 0,05$ ). Esto es un punto de gran interés a la hora de hacer sustentable un sistema. Si a través del manejo se logra disminuir la cantidad de agua perdida por escurrimiento, se incide en forma inversa sobre la pérdida de materia orgánica, cuestión que reflejará un menor deterioro desde el punto de vista físico y químico del suelo y el mantenimiento o mejoramiento de su productividad, (Corbella *et al.*, 2004; Eiza *et al.*, 2006).

Los efectos de las técnicas de manejo del relieve sobre las tasas de erosión, han reportado efectos importantes en la productividad de los cultivos, como consecuencia de una mejora en la economía del agua. Troeh *et al.*, (1991) reportan incrementos en los

rendimientos del orden de 10 % en maíz (*Zea mays*), 29 % en trigo (*Triticum aestivum*), 11 % en soja (*Glycine max*) y 28 % en sorgo (*Sorghum bicolor*). Resultados recientes en la zona de Río Cuarto, muestran incrementos en la producción de maíz del orden del 30 %, (Colombo *et al.*, 2012).

### 3. PÉRDIDA DE SUELO A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN DE LLUVIA A CAMPO.

Si bien no existió interacción estadísticamente significativa entre los dos factores de clasificación (rotación y cobertura) para con la pérdida de suelo por erosión, sí hubo diferencias significativas en esta variable respecto a los factores de clasificación y sus niveles.

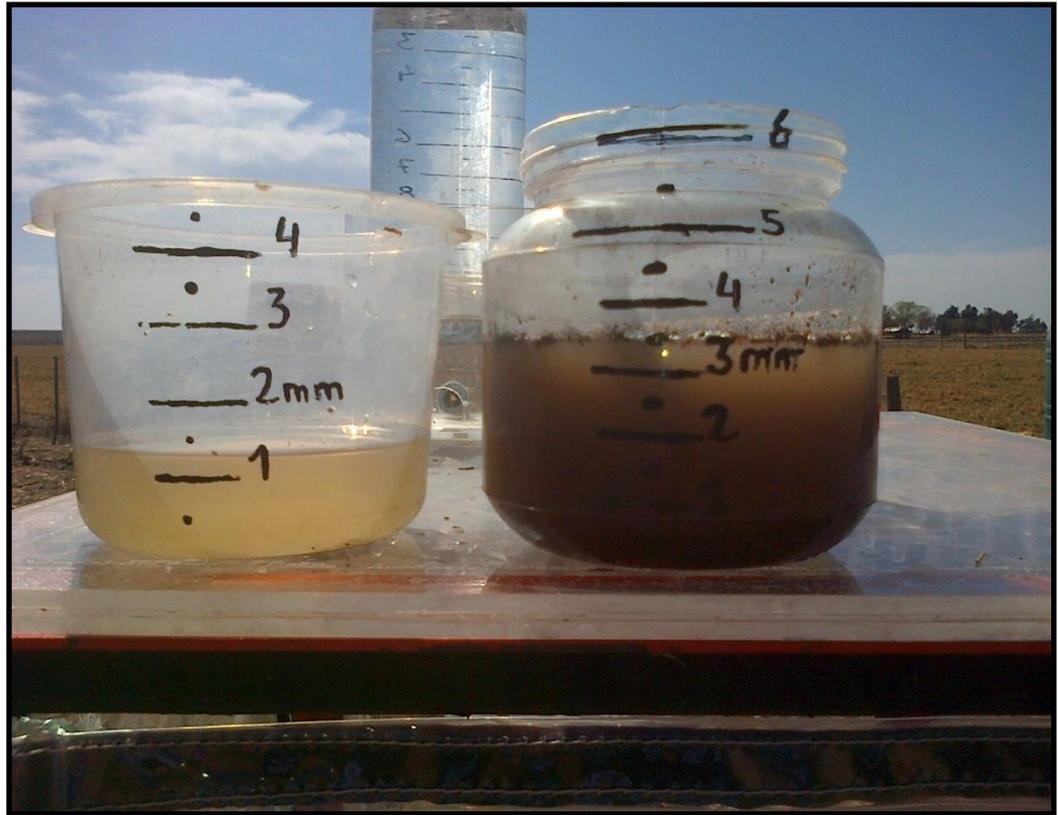
La pérdida de suelo fue estadística y significativamente mayor en el suelo desnudo que en el tratamiento de 100% de cobertura ( $p \leq 0,05$ ), con 2,42  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  y 0,48  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  respectivamente (Tabla 13).

**Tabla 13. Diferencia de medias de la pérdida de suelo ( $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) por efecto de la cobertura superficial, en La Aguada, Córdoba.**

COBERTURA	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	0.48	8	0,33	A
0% Cobertura	2,42	8	0,33	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Distintos estudios demuestran la importancia de la vegetación como agente biológico protector del suelo, y los resultados hallados en esta experiencia concuerdan con ellos. Si se considera la masa de sedimentos proveniente del suelo libre de cobertura como un máximo potencial de pérdida de suelo para las condiciones de ese sitio en una tormenta de las características simuladas, se observa que la cobertura redujo la pérdida de sedimentos en 5 veces, aproximadamente. En la foto 4, se puede observar la diferencia de turbidez de la lámina de agua escurrida (mm) recogida en los recipientes graduados, dando una magnitud de la importancia que cobra la cobertura superficial de rastrojos, como la del cultivo de maíz, para reducir la carga de sedimentos transportados.



**Foto 4. Turbidez de la lámina escurrida (mm).** El recipiente de la izquierda de la imagen, representa la situación con cobertura superficial, el otro la situación sin cobertura superficial.

Al respecto Blackburn *et al.*, (1986) y Ruan *et al.*, (2001), concluyen que la tasa de erosión disminuye en relación inversa a la cobertura, ajustándose a una regresión lineal con un  $R^2 = 0,8982$ , debido a que la vegetación y el mantillo disipan la energía cinética de las gotas de lluvia, retardan la velocidad de escurrimiento, aumentan la permeabilidad del suelo y además la cobertura superficial forma reservorios que impiden que las partículas de suelo sean arrastradas por el escurrimiento (Sanzano y Fadda, 2006).

Betancourt *et al.*, (2000) trabajando con lluvia simulada y tres intensidades,  $50 \text{ mm.h}^{-1}$ ,  $70 \text{ mm.h}^{-1}$  y  $120 \text{ mm.h}^{-1}$ , demostraron que para todos los casos la mayor producción de sedimentos correspondió a las parcelas de suelo descubierto, siguiéndole en magnitud las parcelas de alfalfa, pasto nativo y Grama rhodes, en orden decreciente; a su vez evidenciaron que el aumento de la intensidad de precipitación, incrementa en forma directa la erosión hídrica. Este estudio, coincide con lo expuesto por Wilcox, (2001) que expresa que cuando la cobertura es removida total o parcialmente, la erosión hídrica aumenta en relación directa a la intensidad de la precipitación y en general al estado de degradación del ecosistema.

Sasal *et al.*, (2004) trabajando en un Argiudol ácuico de la provincia de Entre Ríos estudiaron las pérdidas de suelo en siembra directa en el siguiente esquema de cultivos: soja continua; soja continua con cultivo de cobertura otoño-invernal (trigo) (T/S); maíz-trigo/soja (M-T/S); maíz continuo; pastura (con cortes manuales) y suelo descubierto; resultando sus pérdidas de suelo de 2,4 tn.ha<sup>-1</sup>, 0,5 tn.ha<sup>-1</sup>, 0,3 Tn.ha<sup>-1</sup>, 1,8 tn.ha<sup>-1</sup>, 0,5 tn.ha<sup>-1</sup> y 15,3 tn.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Los autores definieron que las mismas fueron muy bajas, aún con elevadas e intensas precipitaciones. Sin embargo, el tratamiento descubierto, superó el límite de tolerancia admitido por el Sistema de Conservación de Suelos de EE.UU, de 11.2 tn.ha<sup>-1</sup> (Hall *et al.*, 1985). El maíz continuo con más de 3 veces la producción de materia seca que los demás sistemas tuvo una pérdida de suelo equiparable a la soja continua, por lo tanto y en consecuencia, estos determinaron que, más importante que la cantidad de materia seca cubriendo el suelo durante el ciclo del cultivo sumado a los residuos sobre la superficie después de su cosecha, resulta el tiempo de ocupación con cultivos y raíces vivas.

A partir de la relación entre el riesgo de erosión producida en situaciones con diferente grado de protección superficial, respecto a una condición de superficie sin cobertura, Merrill *et al.*, (2002), estimaron el potencial relativo de erosión en relación a la cobertura superficial. El riesgo de erosión disminuye marcadamente a partir de un 40% de cobertura superficial, reduciendo principalmente la capacidad de los agentes erosivos (i.e. energía cinética de la lluvia y velocidad de escurrimiento superficial) de generar el desprendimiento de las partículas del horizonte superficial y de transportarlas en el agua de escurrimiento.

Por su parte, De La Vega *et al.*, (2004) comprobaron que la concentración de sedimentos en el agua escurrida del tratamiento sin cobertura (1983,8 mg.l<sup>-1</sup>) fue significativamente mayor ( $p < 0.10$ ) a la registrada en el suelo cubierto (536,6 mg.l<sup>-1</sup>), correspondiendo estos valores a pérdidas de suelo medias de 7000 kg.ha<sup>-1</sup> y de 1300 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Adema *et al.*, (2001) trabajando sobre tres tratamientos de cobertura que consistieron en vegetación natural manteniendo la cobertura de la vegetación y el mantillo presente en el lugar, vegetación cortada a cinco (5) cm de altura con reducción parcial de mantillo y suelo desnudo, en dos suelos diferentes, comprobaron que la pérdida de sedimentos fue mayor en el Haplustol que en el Ustipsamente y en ambos sitios el promedio de sedimentos perdidos fue mayor en el tratamiento sin cobertura que en el tratamiento de corte, y este a su vez fue mayor que en el tratamiento con vegetación natural. Aquí, cabe destacar que la cobertura redujo la pérdida de sedimentos aproximadamente 9 veces en el tratamiento de corte y 22 veces bajo vegetación natural, en el Haplustol, mientras que para el Ustipsament, la

reducción de la pérdida de suelo fue aproximadamente 2,5 veces en el tratamiento de corte y 11 veces bajo vegetación natural.

Otro trabajo realizado en la provincia de Santa Fe, sobre un Arguidol vértico vuelve a reafirmar los resultados encontrados en el presente trabajo. Se presentaron cuatro tratamientos. Tres de ellos soportaron la acción del pisoteo animal, diferenciándose en la altura de las plantas en los momentos de desplazamiento del ganado: suelo desprovisto de vegetación a lo largo de toda la duración del estudio (T1), vegetación cortada a dos (2) cm de altura (T2) y vegetación con altura normal (> 10 cm) (T3) y en el cuarto tratamiento (T4) no hubo tránsito animal y la vegetación se mantuvo sin cortar en las ocasiones en que se practicaba el pisoteo en T1, T2 y T3. La producción de sedimentos fue marcadamente más elevada (7,04 tn.ha<sup>-1</sup>) en el tratamiento con suelo desnudo (T1) que en T2; T3 y T4 con, 1,12; 0,64 y 0,32 tn.ha<sup>-1</sup>, respectivamente, (Denoia *et al.*, 2000).

Chagas *et al.*, (2004) trabajando en San Pedro, provincia de Buenos Aires sobre un Arguidol vértico, diseñaron dos tratamientos: suelo con cobertura y sin cobertura; ambos sobre el sistema de siembra directa. Luego de aplicar dos lluvias, la primera que durase 30 minutos y la segunda 15 minutos con una intensidad de 120 mm.h<sup>-1</sup>, determinaron que los valores totales de movimiento lateral de suelo, resultaron significativamente más elevados para el tratamiento sin cobertura edáfica. Estas diferencias se dieron más marcadamente durante la segunda lluvia simulada ( $p \leq 0,01$ ).

La pérdida de suelo, también tuvo diferencias estadísticamente significativas en los dos niveles de rotación ( $p \leq 0,058$ ); en la agrícola-ganadera la producción de sedimentos fue 2,09 tn.ha<sup>-1</sup>, mientras que en la rotación agrícola fue sensiblemente menor, 0,83 tn.ha<sup>-1</sup>, (Tabla 14).

**Tabla 14. Diferencia de medias de la pérdida de suelo (tn.ha<sup>-1</sup>) entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	n	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	2,09	8	0,21	A
Agrícola	0,83	8	0,21	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0,06$ )

En la rotación agrícola-ganadera el porcentaje de materia orgánica en el suelo original fue menor que la rotación pura, esta diferencia aunque no tan contrastante puede explicar en parte los resultados hallados en el presente estudio. La estabilidad de los agregados ha mostrado ser una función de la MO (Studdert *et al.*, 1997 y Angers, 1998). Es por esto que la estabilidad de agregados cumple un papel fundamental en la protección del suelo contra la erosión hídrica. A través de lo expuesto anteriormente, se puede asumir que el menor porcentaje de materia orgánica del suelo de la rotación mixta se tradujo en una menor estabilidad de agregados, afectando por lo tanto la infiltración total y final (Tabla 16), obteniendo mayor volumen escurrido (Tabla 10 y 11) y llevando consigo una mayor cantidad de sedimentos erodados (Tabla 14). Una forma de corroborar esto es ver la profundidad de humedecimiento, que en el caso de la rotación agrícola-ganadera fue menor que en la rotación agrícola pura, (Tabla 19), es decir, que en la rotación agrícola pura infiltró mayor cantidad de agua de la que escurrió.

En este sentido, si se considera que en el presente trabajo el suelo de la rotación agrícola-ganadera al momento de la medición se hallaba en el tercer año del ciclo agrícola, es decir a tres años desde la roturación de la pastura del ciclo ganadero, y considerando que previo a ello Peralta (2011) y Massobrio (2012) evaluaron la estabilidad de la estructura y la materia orgánica superficial del sitio bajo estudio, y aunque de sus resultados surge que no existía efecto de la rotación sobre estas variables, la tendencia que presentaban los valores favorecía a la rotación mixta respecto de la agrícola pura, ante los resultados obtenidos en la pérdida de suelo podría sostenerse que ese leve efecto mejorador en la estabilidad de la estructura se perdió en el transcurso del tiempo comprendido entre la roturación de la pastura y el momento de realización del presente trabajo. También pudo suceder, según lo planteado por Chagas (1995), que esta variable influyera poco en la pérdida de agua y suelo y si en cambio lo hiciera la rugosidad generada por los terrones en superficie.

Otra causa por la cual la rotación mixta haya perdido mayor cantidad de sedimentos pudo deberse al efecto del pastoreo o sobrepastoreo que incrementa el escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo (Blanco y Lal, 2010). En regiones áridas o semiáridas o en condiciones de escasa humedad, el pisoteo animal rompe la estructura superficial y pulveriza la superficie del suelo, causando la pérdida de partículas finas por erosión eólica o hídrica, (Blanco y Lal, 2010). En un trabajo citado anteriormente, Cabrera *et al.*, (2011) determinaron que la densidad aparente (DA) presentó un aumento en todos los niveles de asignación ( $p < 0,05$ ) en 0-10 cm de profundidad, siendo éste más acentuado en los primeros 0-5 cm y disminuyó la velocidad de infiltración inicial (VII) y final (VIF) respecto al testigo; el mayor contenido hídrico al momento del pastoreo incrementó estos efectos. El nivel de

asignación de forraje y la humedad edáfica al momento del pisoteo demostraron ser dos factores que modificaron el comportamiento hidrofísico del suelo bajo estudio. El incremento de la carga animal produjo una disminución de la VII y un aumento en la DA, potenciándose este efecto en la condición de suelo húmedo. Las asignaciones del 6 y 8% podrían ser niveles de carga animal que no modificarían las condiciones hidrofísicas del suelo en relación a la condición sin pastorear.

Chagas *et al.*, (1999) encontraron resultados opuestos a los de esta experiencia. El líquido que se recogió como resultado de aplicar un total de 33 mm de lluvia de alta intensidad ( $64 \text{ mm.h}^{-1}$ ), contenía un promedio de sólidos suspendidos de  $36,3 \text{ g.l}^{-1}$  para el caso del tratamiento agricultura (por más de diez años), y de  $23,4 \text{ g.l}^{-1}$  para el caso de la pastura (campo natural de treinta años), correspondiendo estos a  $2,42 \text{ tn.ha}^{-1}$  y  $1,56 \text{ tn.ha}^{-1}$  respectivamente. Las diferencias entre tratamientos presentaron una probabilidad  $p < 0,09$ . Cabe aclarar que el volumen de líquido recogido en ambos casos fue idéntico ya que las parcelas se hallaban saturadas, previo a la aplicación de las lluvias. En cambio, en nuestro estudio el suelo de la rotación mixta obtuvo mayor escurrimiento de agua con respecto al de la rotación agrícola, cuestión que como fue explicada anteriormente pudo traer aparejado mayor volumen de sedimentos erodados. La diferencia puede estar asociada al tipo de pastura y a la remoción del suelo asociada a ella, ya que en aquel trabajo se trataba de un pastura permanente, no removida durante 30 años y en el presente trabajo se trata de un ciclo de pasturas de 3 años de duración, alternado con un ciclo agrícola del mismo período de tiempo.

En Zavalla, provincia de Santa Fe, Denoia *et al.*, (2000) trabajaron sobre cuatro tratamientos, los cuales fueron: suelo desnudo con pisoteo (T1); suelo con vegetación a 2 cm de altura durante el pisoteo (T2); con vegetación de altura normal ( $> 10 \text{ cm}$ ) en el momento del pisoteo (T3); y con vegetación de altura normal ( $> 10 \text{ cm}$ ) sin pisoteo (T4). Si bien los autores encontraron diferencias significativas en la pérdida de suelo entre el tratamiento desnudo y los tratamientos con cobertura, no fue así entre el tratamiento sin pisoteo y los demás tratamientos con tránsito de animales, en cambio si determinaron cambios importantes en algunas propiedades físicas del suelo; como cambios en la densidad, tasa de infiltración, porosidad total, ante el efecto del pisoteo de los animales.

Chagas, (1995) evaluó el efecto de la rugosidad superficial, el tamaño de agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión laminar en dos condiciones de degradación estructural de un Argiudol típico de Marcos Juárez, Argentina: degradado (agricultura continua durante 15 años) y no degradado (rotación agrícola-ganadera con dos ciclos de pastura de 5 años de duración) y dos condiciones de rugosidad superficial: lisa y rugosa. Los

resultados indicaron que la presencia de agregados grandes en superficie (cama rugosa) disminuyó en un 70 % y 68 % el escurrimiento superficial y la erosión, respectivamente, en comparación con la superficie lisa, mientras que la estabilidad estructural no tuvo un efecto muy sobresaliente ya que una diferencia de 63% en el nivel de degradación de los suelos, sólo redujo un 25% el volumen de escurrimiento y no afectó la pérdida total de suelo. El mismo autor sostiene que el manejo de la rugosidad superficial a través del incremento en el tamaño de los terrones en la capa de labranza, retarda la formación de sellos y costras superficiales, tanto en la condición de suelo degradada como en la no degradada. Plantea además, que la generación de rugosidad podría facilitar el pasaje de agua a partir de la generación de caminos preferenciales entre los terrones, lo que incrementa la velocidad de infiltración siendo esto, al menos en parte, responsable del control de las pérdidas de suelo.

Chagas y Gratola, (1994) trabajando con lluvia simulada en un Arguidol típico en Marcos Juárez, provincia de Córdoba, plantearon tres situaciones bien contrastantes; parque no sujeto a pastoreo con cubierta vegetal de gramíneas y leguminosas anuales y perennes; un tratamiento degradado que fue sometido a agricultura continua convencional durante 15 años y un tratamiento no degradado que consistió en agricultura en rotación con pasturas en base a alfalfa. Los autores comprobaron que las pérdidas de suelo al cabo de una hora de ensayo fueron  $577 \text{ g.m}^{-2}$  y  $487 \text{ g.m}^{-2}$  en los tratamientos degradados y no degradados respectivamente, es decir que la diferencia entre ambos fue inferior al 10 % careciendo por lo tanto de significancia estadística.

Si bien en el presente trabajo no se obtuvo una correlación significativa entre la pérdida de suelo y la lámina escurrida ( $p = 0,29$ ), el mayor escurrimiento obtenido en la RAG respecto a RA pudo haber influido en la mayor pérdida de suelo observada en la primera situación, tal cual lo hallado por Rovera, (2013), quien obtuvo una ecuación de ajuste entre ambas variables [lámina escurrida (mm) y carga de sedimentos( $\text{kg.ha}^{-1}$ )] con un  $R^2$  de 0,55; indicando que no solo el volumen escurrido explica la pérdida de suelo, al igual que lo ocurrido en el presente trabajo.

#### 4. PÉRDIDA DE SUELO A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN DE LA RUSLE-2.

Como se mencionó en el capítulo de “materiales y métodos” este modelo de simulación realiza los cálculos de pérdida de suelo a escala anual, mientras que en la experiencia llevada a campo evaluó la pérdida de suelo producida por una tormenta, expresando la misma en  $\text{tn.ha}^{-1}.\text{tormenta}^{-1}$ . De aquí surgen las diferencias marcadas halladas en los resultados entre ambas experiencias; a campo las pérdidas de suelo fueron: 2.42, 2.09,

0.83 y 0.48  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{tormenta}^{-1}$  para C 0%, RAG, RA y C 100%, respectivamente, (tabla 13 y 14). En la tabla 15, se observan las pérdidas de suelo determinadas por la RUSLE a 6 y 20 años, representados cada uno, por la duración de la RAG y la antigüedad del ensayo, respectivamente.

**Tabla 15. Representación de los factores que componen la RUSLE-2 y resultados a 6 y 20 años.**

Módulos	Módulo	Módulo	Módulo		Módulo	Módulo	Resultados	
	Clima	Suelo	Topografía		Cobertura- Manejo	Práctica de Conservación	$\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$	
<i>Situación/Factor</i>	<i>R</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>S</i>	<i>C</i>	<i>P</i>	6 años	20 años
<b>Rotación agrícola</b>	4120	0.036	200	2.5	<i>Explicado en materiales y métodos</i>	<i>Explicado en materiales y métodos</i>	<b>20</b>	<b>34</b>
<b>Rotación agrícola-ganadera</b>	4120	0.036	200	2.5	<i>Explicado en materiales y métodos</i>	<i>Explicado en materiales y métodos</i>	<b>16</b>	<b>27</b>
<b>Cobertura superficial 0%</b>	4120	0.036	200	2.5	<i>Explicado en materiales y métodos</i>	<i>Explicado en materiales y métodos</i>	<b>21.5</b>	<b>33.5</b>
<b>Cobertura superficial 100%</b>	4120	0.036	200	2.5	<i>Explicado en materiales y métodos</i>	<i>Explicado en materiales y métodos</i>	<b>17.5</b>	<b>29.5</b>

Los resultados hallados en el presente trabajo, están apoyados por González *et al.*, (2009) quienes compararon ambos métodos de determinación de pérdida de suelo, (simulador de lluvia y USLE). Estos concluyeron que, “al calcular las pérdida de suelo aplicando la USLE es frecuente obtener una sobrestimación de las tasas de erosión y, por lo tanto su uso debería ir acompañado de trabajos de campo que cuantifiquen y corroboren la pérdida de suelo in situ”. Los autores justifican las conclusiones halladas, al considerar que, “aunque la USLE en su factor de erosionabilidad (K), tiene en cuenta la estructura del suelo, permeabilidad, contenido en materia orgánica y textura, no considera todas las vías de agua

que pueden permanecer abiertas y operativas para la circulación de agua que condicionan la permeabilidad del suelo en campo, bajo diferentes intensidades de lluvia”. En suelos poco estructurados la diferencia en la tasa de erosión entre ambos métodos, es casi nula, mientras que en suelos bien estructurados la diferencia es contrastante y significativa a favor de la USLE, con altos valores con respecto al del simulador de lluvias. Esa mejor estructura edáfica los autores se la adjudican en parte a la proporción de MO del suelo, es decir, que mayor cantidad de MO, mayor será la estructuración y por lo tanto mayores serán las diferencias entre ambos métodos de determinación de la pérdida de suelo.

Si se observa la tabla 15 expuesta anteriormente, se distingue la mayor pérdida de suelo ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) por erosión hídrica en la simulación a 20 años, con respecto a la de 6 años. Por otro lado, surge una contradicción en las tendencias halladas en la pérdida de suelo a través de la simulación de lluvias a campo y la simulación con la RUSLE, en las distintas rotaciones (tabla 14), ya que, a campo las pérdidas de suelo fueron menores en la RA que en la RAG, mientras que a través de la RUSLE, las menores pérdidas se registraron en la rotación agrícola-ganadera, respecto a la rotación agrícola pura, en ambos intervalos de tiempo. Existen múltiples causas por que pueden llegar a explicar la diferencia en la tendencia entre ambos métodos de determinación de pérdida de suelo:

- La pérdida de suelo hallada a través del simulador de lluvia estaría asociado a una situación puntual (3<sup>er</sup> año de la RAG) de un sistema de rotación que se extiende por seis (6) años y que se inició veinte (20) años atrás; mientras que la simulación de la RUSLE muestra lo que sucedería con la variable pérdida de suelo a largo plazo, es decir, a lo largo de la duración de la rotación y del ensayo.
- La realización del presente estudio, en el tercer y último año del ciclo ganadero de la RAG, pudo haber condicionado los resultados a favor de la RA, a través del decadencia de las condiciones hidrofísicas del suelo en estudio.
- La duración del ciclo ganadero en la RAG (3 años) puede llegar a ser un acotado, para que la pastura exprese todos los beneficios que apareja su implantación, desde el punto de vista hidrofísico. De la misma manera este beneficio, en los siguientes 3 años del ciclo agrícola, parece desaparecer, demostrado a través de los resultados hallados a campo en las variables como lámina escurrida (mm), pérdida de suelo, lámina total infiltrada (mm),

velocidad de infiltración final ( $\text{mm.h}^{-1}$ ), profundidad de humedecimiento (cm).

- La calidad de la pastura, implantada en los ciclos ganaderos no fue la mejor. Ya que su mantenimiento a través del control de malezas, fertilización, entre otras cosas, no fueron las óptimas para que la pastura exprese sus beneficios, como lo mencionamos anteriormente.
- El pastoreo realizado con altas cargas instantáneas, como se vino realizando históricamente, no es una situación óptima para las condiciones de uso y manejo y suelo del área estudiado en el presente trabajo. Cabrera *et al.*, (2011) concluyeron que el incremento de la carga animal produjo una disminución de la velocidad de infiltración inicial y un aumento en la densidad aparente, potenciándose este efecto en la condición de suelo húmedo. Estos resultados concuerdan con lo observado por Taboada *et al.*, (2008) y Du Toit, (2009) quienes señalan que el aumento en la carga animal es uno de los principales factores causantes de la compactación superficial en los suelos pisoteados por el pastoreo.
- En el espesor de 5-10 cm la porosidad total promedio del testigo (sin pastoreo) fue de 55%, valor que se redujo a un 48% en la situación pastoreada con 2 % de asignación de forraje (alta carga animal), (Cabrera *et al.*, 2011)
- Según, Cabrera *et al.*, (2011), para el área de estudio (“Pozo del Carril”) una asignación del 6 y 8% (bajas cargas animales) podrían ser niveles de carga animal que no modifican las condiciones hidrofísicas del suelo en relación a la condición sin pastorear, por lo que se recomienda manejar estos valores de carga animal para los sistemas con suelos similares al de esta investigación.

Para los niveles de cobertura se observa que los resultados hallados con la RUSLE siguen la misma tendencia que los observados bajo el experimento realizado a campo. En el intervalo de tiempo de 6 y 20 años, la mayor pérdida de suelo ( $\text{Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ ) ocurre en la situación sin cobertura superficial de rastrojos.

Marelli, (2003), utilizando “USLE/RUSLE” evaluó el potencial erosivo en la provincia de Córdoba en la zona donde se realizó el presente trabajo (planicie periserrana

proximal). Las pérdidas de suelo promedio de los tratamientos “suelo desnudo”, “maíz-soja” y “pasturas base alfalfa” fueron 95.3 tn.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, 12.4 tn.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y 1.9 tn.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Estos resultados los obtuvo con una pendiente del 3 %.

Por su parte, Clérico y Garcia, (2001) hallaron en la localidad de Pehuajó con 0,5 % de pendiente (serie Pehuajó) valores de 0.2, 0.2 y 0.4 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> para campo natural, rotación agrícola-ganadera (2:2) y agricultura continua, respectivamente; todos bajo el sistema de siembra directa. En el partido de Azul con 4% de pendiente (serie Cinco Cerros) encontraron valores de 1.6 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> para campo natural, 1.6 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> para rotación agrícola-ganadera y 2.5 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> para agricultura continua; mientras que para la localidad de Coronel Suarez con 0,5 % de pendiente, (serie Laprida) hallaron 0.3, 0.3 y 0.6 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> para campo natural rotación agrícola-ganadera y agricultura continua, respectivamente.

Es importante destacar que la causa por las que estos autores hallaron menores pérdidas de sedimentos, se debe a que todos los módulos o factores de la RUSLE, como el clima, suelo, topografía, manejo, entre otros, difieren significativamente de los utilizados en el presente trabajo.

##### 5. LÁMINA TOTAL INFILTRADA Y VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN.

La lámina total infiltrada (mm) careció de diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de cada una de las variables de clasificación (cobertura y rotación). Por el lado de las coberturas (tabla 16) las diferencias en la lámina total infiltrada (mm) fueron aún más acotadas que en el caso de las rotaciones, (tabla17)

**Tabla 16. Diferencia de medias de la lámina total infiltrada (mm) entre coberturas superficiales, en La Aguada, Córdoba.**

COBERTURA	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	93,32	8	3,49	A
0% Cobertura	88,24	8	3,49	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

**Tabla 17. Diferencia de medias de la lámina total infiltrada (mm) entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	75,01	8	9,30	A
Agrícola	106,54	8	9,30	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Son numerosos los estudios que demuestran la importancia de la cobertura en el proceso de infiltración. Uno de ellos fue realizado por De La Vega *et al.*, (2004) quienes evaluaron el efecto de la cobertura superficial sobre la dinámica de la infiltración en un Argiudol típico manejado en siembra directa continua de la Serie Ramallo, provincia de Buenos Aires, utilizando simulación de lluvia. Probaron dos tratamientos: con cobertura y sin cobertura superficial. Los autores observaron indirectamente a través del volumen escurrido expresado como coeficiente de escurrimiento, que la lámina de agua total infiltrada (mm) fue mayor en el suelo cubierto con respecto al descubierto. El suelo descubierto obtuvo un coeficiente de escurrimiento de 0,57; mientras que en el suelo cubierto 0,34, ( $p < 0.05$ ); dicho de otra manera, del total de lluvia aplicada, en el tratamiento sin cobertura infiltró el 43 % del agua aplicada, mientras que en el tratamiento con cobertura infiltró el 66% del total precipitado.

Chagas *et al.*, (2004) en similar suelo y tratamientos que los del trabajo de De La Vega *et al.*, (2004), encontraron que en el suelo descubierto se produjo menor infiltración y mayor escurrimiento en comparación con el suelo que presentaba cobertura, debido a la degradación estructural y formación de sello en superficie.

En lo que se refiere al efecto de la rotación en la lámina total infiltrada (mm), Sasal *et al.*, (2008) en un trabajo citado en párrafos anteriores, revelaron que el tratamiento con pastura superó 9 veces la infiltración de agua en el perfil con respecto al suelo descubierto; los autores concluyeron que más importante que la cantidad de materia seca cubriendo el suelo durante el ciclo del cultivo sumado a los residuos sobre la superficie después de su cosecha, resulta el tiempo de ocupación con cultivos y raíces vivas.

Por su parte, Bradford y Huang, (1994) concluyeron que el manejo del rastrojo tenía un efecto mayor sobre la dinámica de infiltración respecto a la influencia ejercida por el manejo del suelo.

Ribera *et al.*, (2004) trabajaron con un simulador de lluvia en Haplustoles. Estos plantearon 2 situaciones; área clausurada al pastoreo de ganado doméstico y área con pastoreo continuo. Entre otras determinaciones, pudieron demostrar que la infiltración fue mayor en la clausura definiendo así el efecto negativo del pisoteo producido por los animales en las propiedades físicas del suelo.

Chagas, (1995) en el mismo trabajo citado anteriormente, indicó que la presencia de agregados grandes en superficie (cama rugosa) disminuyó en un 70% el escurrimiento superficial, en comparación con la superficie lisa, mientras que la estabilidad estructural (sistema de rotación) no tuvo un efecto muy sobresaliente ya que una diferencia de 63% en el nivel de degradación de los suelos, sólo redujo un 25% el volumen de escurrimiento. Dicho de otra manera, el efecto de la rugosidad superficial sobre la infiltración fue mucho mayor que el de la estabilidad estructural. Plantea además, que la generación de rugosidad podría facilitar el pasaje de agua a partir de la generación de caminos preferenciales entre los terrones, lo que incrementa la velocidad de infiltración.

Yimer *et al.*, (2008) en un Andisol de Etiopia, estudiaron el efecto de tres usos de la tierra: agrícola, ganadero-pastoril y forestal, sobre la infiltración acumulada y la tasa de infiltración, encontrando diferencias significativas entre ellos. La mayor infiltración acumulada (cm) fue en el tratamiento Forestal con 45,72 cm, siguiéndole el Agrícola (12,98 cm) y por último el Ganadero pastoreado con 12,98 cm. Estas diferencias los autores se las atribuyeron a la compactación y a la degradación estructural en superficie, que traen aparejada la pérdida de macroporosidad.

En lo que respecta a la velocidad de infiltración ( $\text{mm.h}^{-1}$ ), se demostró que hubo diferencias en ambos niveles de cada variable de clasificación (rotación y cobertura), aunque estas no fueron estadísticamente significativas. En el nivel sin cobertura se obtuvo una velocidad de  $45,27 \text{ mm.h}^{-1}$ , mientras que en el suelo con cobertura fue de  $51,30 \text{ mm.h}^{-1}$  ( $p \geq 0,05$ ), (Tabla 18). En la RAG la velocidad fue de  $38,07 \text{ mm.h}^{-1}$ , mientras que en la RA de  $58,50 \text{ mm.h}^{-1}$  ( $p \geq 0,05$ ) (Tabla 19).

**Tabla 18. Diferencia de medias de la velocidad de infiltración (mm.h<sup>-1</sup>) entre coberturas superficiales, en La Aguada, Córdoba.**

<b>COBERTURA</b>	<b>MEDIAS</b>	<b>n</b>	<b>E.E</b>	<b>DIFERENCIA</b>
100 % Cobertura	51,30	8	4,67	A
0% Cobertura	45,27	8	4,67	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

**Tabla 19. Diferencia de medias de la velocidad de infiltración (mm.h<sup>-1</sup>) entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

<b>ROTACIÓN</b>	<b>MEDIAS</b>	<b>n</b>	<b>E.E</b>	<b>DIFERENCIA</b>
Agrícola-Ganadera	38,07	8	7,46	A
Agrícola	58,50	8	7,46	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

En el trabajo de Chagas *et al.*, (2004) citado en párrafos anteriores, determinaron que debido a la degradación estructural y formación de sello en la superficie del tratamiento desnudo, se produjeron partículas que migraron en sentido vertical junto con el agua percolada, ocasionando un taponamiento de poros que disminuyó la conductividad hidráulica saturada y la velocidad de infiltración final (mm.h<sup>-1</sup>).

En un trabajo citado precedentemente, De La Vega *et al.*, (2001), observaron que la presencia de rastros en superficie no modificó la velocidad de infiltración inicial, pero si la duración de la fase inicial del proceso de infiltración. Asimismo, en el tratamiento con cobertura la velocidad de infiltración final fue superior. El suelo cubierto tuvo una tasa final de infiltración de 20,08 mm.h<sup>-1</sup>, siendo esta mayor ( $p < 0.05$ ) a la obtenida por el tratamiento descubierto (10,63 mm.h<sup>-1</sup>). En relación a estos resultados, los investigadores concluyeron que si bien la siembra directa había incrementado la estabilidad de la estructura del suelo en estudio, este incremento no fue suficiente para que al quitar la cobertura, la tasa de infiltración final fuese la misma que en la situación con cubierta superficial.

Haciendo referencia al efecto de las distintas rotaciones de cultivos sobre la infiltración de agua en el suelo, Liebig *et al.*, (2004) y Blanco *et al.*, (2010) concuerdan que aquellas rotaciones más intensivas, con mayor cantidad de cultivos en el año, tuvieron tasas de infiltración estadísticamente más elevadas que aquellas rotaciones en donde luego de la cosecha de un cultivo seguía un período de barbecho mecánico para acumular agua y controlar malezas, como es el caso de los sitios de ambas rotaciones estudiadas en el presente estudio. Esta mayor infiltración la aluden a una mayor protección física de la superficie del suelo como así también, a un incremento del carbono orgánico del suelo y los beneficios que esto genera.

Yimer *et al.*, (2008), ya citados en párrafos anteriores, hallaron que la mayor tasa de infiltración fue en el tratamiento Forestal con  $2,67 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ , siguiéndole el Ganadero pastoreado ( $0,67 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) y por último el Agrícola con  $0,61 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Estas diferencias, al igual que para la infiltración acumulada; los autores se las atribuyeron a la compactación y a la degradación estructural en superficie, que traen aparejada la pérdida de macroporosidad.

Autores como Kiessling *et al.*, (2006) señalan que el pastoreo genera, en el corto plazo, una pérdida de macroporos en superficie (con implicancia en la infiltración del agua de lluvia) y que dicha pérdida es más importante en labranza convencional que en siembra directa, mostrando éste último sistema una mayor estabilidad en la distribución del espacio poroso, al ser sometido al pastoreo animal directo. En relación a ello, en el suelo de ambas rotaciones estudiadas en la presente experiencia, el manejo es en siembra directa continua durante 20 años aproximadamente y en la RAG el pastoreo que se realiza en la pastura durante el ciclo ganadero es intensivo (alta intensidad y carga instantánea).

En relación a ello, Denoia *et al.*, (2000) en el mismo trabajo presentado en variables anteriores, determinó que la infiltración total (%) fue marcadamente mayor en el tratamiento con vegetación normal (sin pisoteo) en comparación con los demás tratamientos que recibieron pisoteo. A su vez, el tratamiento T3 también se diferenció estadísticamente, con un valor mayor a los tratamientos de suelo desnudo (T1) y vegetación a 2 cm de altura (T2) y con un valor menor al tratamiento sin pisoteo (T4). Según los autores “el pisoteo conduce al aumento de la densidad superficial del suelo y a la disminución de la tasa de infiltración”; a su vez, “la presencia de vegetación incrementa la infiltración, pudiendo no ejercer acción protectora alguna frente a la densificación de la capa superficial del suelo”.

Si observamos la tabla 20, que corresponde a las correlaciones entre las variables expuestas, vemos que tanto la lámina total infiltrada (mm), como la velocidad de infiltración ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ), sugieren un similar comportamiento frente a las variables correlacionadas. Al

cumplirse esto, se explicó solamente las correlaciones de la variable, velocidad de infiltración ( $\text{mm.h}^{-1}$ ).

La correlación negativa entre la velocidad de infiltración final ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) y la lámina escurrida (mm) o coeficiente de escurrimiento (Tabla 20), encontrada en el presente estudio, demuestra el beneficio que dejan las estrategias agronómicas para aumentar la infiltración del agua precipitada o de manera complementaria a ellas, las técnicas que permiten disminuir la pérdidas de agua por escurrimiento.

**Tabla 20. Coeficiente de correlación de Pearson.**

Variable 1	Variable 2	n	Pearson	p - valor
Velocidad. Infiltración Final ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	Lámina escurrida (mm)	16	- 0,92	<0,0001
Velocidad. Infiltración Final ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	Coeficiente de escurrimiento	16	- 0,94	<0,0001
Velocidad. Infiltración Final ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	Enriquecimiento de MO ( $\text{g.kg}^{-1}$ )	16	- 0,57	0,0215
Velocidad. Infiltración Final ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	Profundidad de humedecimiento (cm)	16	0,53	<0,0350
Lámina total infiltrada (mm)	Velocidad. Infiltración Final ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	16	0,91	$\leq 0,0001$
Lámina total infiltrada (mm)	Lámina escurrida (mm)	16	- 0,91	$\leq 0,0001$
Lámina total infiltrada (mm)	Coeficiente de escurrimiento	16	- 0,97	$\leq 0,0001$
Lámina total infiltrada (mm)	Profundidad de humedecimiento (cm)	16	0,58	0,0186
Lámina total infiltrada (mm)	Enriquecimiento de MO ( $\text{g.kg}^{-1}$ )	16		

Correlación significativa ( $p \leq 0,05$ ).

Los resultados del presente trabajo, mostraron que la velocidad de infiltración se correlacionó negativamente con el enriquecimiento de materia orgánica en el sedimento.

Como se explicó anteriormente, el agua que no ingresa al sistema suelo, se pierde por escurrimiento, llevando consigo sedimento con grandes concentraciones de materia orgánica. En este caso se demostró que la técnicas agronómicas que tiendan a aumentar el agua infiltrada, disminuyen indirectamente la perdida materia orgánica en el sedimento erodado por la menor lámina de agua escurrida. Otra correlación hallada pero positiva, fue la existente entre la velocidad de infiltración final ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) y la profundidad de humedecimiento (cm). Esto evidencia que a medida que ingresó mayor cantidad de agua en el sistema suelo en el tiempo, mayor fue la profundización de la lámina, (Tabla 20).

#### 6. PROFUNDIDAD DE HUMEDECIMIENTO.

Se determinó que la profundidad de humedecimiento (cm) fue diferente entre las distintas coberturas (0 % y 100 %), teniendo además significancia estadística ( $p \leq 0,05$ ). Para la condición con cobertura, la profundidad hasta donde infiltró el agua fue 40,87 cm, mientras que para el estado sin cobertura 36,37 cm, (Tabla 21).

**Tabla 21. Diferencia de profundidad de humedecimiento (cm) de la lámina infiltrada (mm) entre coberturas superficiales, en La Aguada, Córdoba.**

COBERTURA	MEDIAS	n	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	40,87	8	0,03	A
0% Cobertura	36,37	8	0,03	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Una de las causas por las que la situación con cobertura evidenció mayor profundidad de humedecimiento, fue justamente porque a lo largo de las simulaciones, infiltró mayor cantidad de agua en el tiempo, ya sea, por la lámina total infiltrada como por la velocidad de infiltración, (Tabla 16 y 18). Estos resultados se pueden explicar a través de múltiples causas. Una de ellas puede estar asociada al efecto protector de la cobertura de rastrojos sobre el suelo, al respecto Cisneros *et al.*, (2012) concluyeron: “la cobertura protege la superficie del suelo de los efectos erosivos de la lluvia y del viento generando un impedimento para que la gota no impacte directamente sobre el suelo y aumente la rugosidad en superficie”. “De este modo evita el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas, mantiene condiciones propicias para la infiltración de agua en el perfil y disminuye las pérdidas de agua por escurrimiento”.

De La Vega *et al.*, (2004), ya citado múltiples veces, encontró los mismos resultados, en el tratamiento con cobertura la velocidad de infiltración final fue superior que en el que la cobertura estaba ausente. Chagas *et al.*, (2004) en similar suelo y tratamientos que los del trabajo anterior, encontraron que en el suelo descubierto se produjo menor infiltración y mayor escurrimiento en comparación con el suelo que presentaba cobertura. Estos trabajos fueron citados, ya que como se verá más adelante se comprobó que la profundidad de humedecimiento (cm) estuvo íntima, directa, positiva y estadísticamente correlacionados con la velocidad de infiltración, (tabla 23).

También, y a pesar de no encontrar resultados con diferencias estadísticamente significativas entre las coberturas, el tiempo de escurrimiento es otra de las variables que explica parte de los resultados obtenidos. Este fue mayor en el estado con cobertura, (Tabla 6) diferencia de tiempo que permitió infiltrar mayor cantidad de agua en el perfil, mientras el tratamiento descubierto, estaba escurriendo.

Por su parte, De La Vega *et al.*, (2004) explicó que en la situación cubierta el escurrimiento se inició a los 24, 1 mm de lluvia acumulada, mientras que cuando el suelo estuvo descubierto el escurrimiento se inició a los 11, 6 mm de lluvia.

Por otro lado, el tiempo de encharcamiento también puede explicar en parte estos resultados, ya que fue mayor en la situación de suelo con cobertura que en la sin cubierta vegetal. Betancourt *et al.*, (2000) en México, concluyó que “el escurrimiento se presentó más rápido en las parcelas con suelo desnudo, siendo apenas entre 1 y 4 min los tiempos necesarios para el inicio de éste”. En el mismo año, Torres *et al.*, (2000) en Venezuela y sobre un Ultisol, hallaron que la esorrentía y encharcamiento comenzó en mayor tiempo en los suelos que poseían cobertura vegetal.

Respecto a la influencia de la rotación, aunque la profundidad de humedecimiento (cm) fue mayor en la rotación agrícola (41,00 cm) con respecto a la agrícola-ganadera (36,25 cm), esta diferencia no fue estadísticamente significativa, ( $p \geq 0,05$ ), (Tabla 22).

**Tabla 22. Diferencia de profundidad de humedecimiento (cm) de la lámina infiltrada (mm) entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	n	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	36,25	8	0,23	A
Agrícola	41,00	8	0,23	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Al ser tan acotada, esta diferencia se la adjudica a la variabilidad y heterogeneidad física y estructural del suelo en el terreno de estudio. Sin embargo, parte de estos resultados se podrían explicar por las diferencias en el porcentaje de materia orgánica, que resultó ser levemente inferior en el suelo de la rotación mixta respecto a la agrícola pura y como se explicó con anterioridad, la materia orgánica está directamente relacionada con la estabilidad de los agregados, (Dominguez *et al.*, 2008), y quizá la pérdida de fracciones lábiles de la materia orgánica luego de la roturación de la pastura, pudo influir ya que es conocido que estas fracciones influyen positivamente en la formación de macroagregados estables al agua (Massobrio, 2012; Galantinni *et al.*, 2004 a; Galantinni *et al.*, 2004 b). Al poseer menor porcentaje de materia orgánica, tiene menor estabilidad de agregados, de forma tal que el suelo de la rotación mixta fue más propenso a desorganizarse ante la acción de lluvia y producir mayor volumen de escurrimiento. El agua que no ingresó al sistema suelo se tradujo en una menor infiltración (Tabla 17) y por lo tanto en una menor profundidad de humedecimiento de la lámina infiltrada, (Tabla 22). Por otro lado, se podría sostener que el potencial efecto recuperador de la condición edáfica que tiene la inclusión de pasturas en la rotación cuando el manejo es en siembra directa informado por Peralta (2011) y Massobrio (2012) se diluye en el próximo ciclo agrícola o no se percibe en el proceso de infiltración de agua en el suelo, ya que como se mencionó con anterioridad la rotación agrícola-ganadera estaba en su último año de su ciclo agrícola.

Como ya se explicó en la anterior variable, la correlación positiva y significativa existente entre la profundidad de humedecimiento (cm) y la velocidad de infiltración final ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) o lámina total infiltrada (mm) es un aspecto esencial en el proceso de toma de decisión de aspectos relacionados a estrategias que estén relacionadas con maximizar el ingreso de agua en el perfil, (Tabla 23).

**Tabla 23. Coeficiente de correlación de Pearson.**

Variable	Variable 2	N	Pearson	p - valor
Profundidad de humedecimiento (cm)	Velocidad. Infiltración Final (mm.h <sup>-1</sup> )	16	0,53	0,0350
Profundidad de humedecimiento (cm)	Lámina total infiltrada (mm)	16	0,58	0,0186

Correlación significativa ( $p \leq 0,05$ ).

## 7. ENRIQUECIMIENTO DE MATERIA ORGÁNICA.

Los contenidos de materia orgánica (MO) en el horizonte superficial no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo (rotación). El lote donde se presentó la rotación agrícola mostró 1,72 % de MO, mientras que la rotación mixta tuvo 1,44 % de MO, (Tabla 24). Masobrio, (2012) en el mismo sitio experimental halló disintiendo con el presente trabajo , una leve diferencia en el % MOT a favor de la rotación agrícola-ganadera con respecto a la rotación agrícola pura, sin embargo, coincidiendo con nuestro trabajo tampoco encontró diferencias estadísticamente significativas.

Casanovas *et al.*, (1995) manifestaron: “Las situaciones con mayor intensidad de agricultura los niveles de MO tienden a ser menores y algo más estables en el tiempo que aquellas en las que se incluyen pasturas dentro de la rotación. En estas últimas el contenido de MO tiende a elevarse durante los ciclos de pasturas para disminuir en el siguiente ciclo agrícola, originándose una variación en los niveles de MO”. Como ya se aclaró con anterioridad, cuando se realizó el presente estudio, la rotación mixta estaba en su tercer año de la fase agrícola con maíz, trascurso de tiempo (3 años) en el que la secuencia de cultivos: maíz-soja-maíz, tal vez pudo disminuir el contenido de MOT a un valor incluso menor que el suelo de la rotación agrícola pura.

De todas formas, al no poseer esta diferencia significancia estadística también se la puede adjudicar a la heterogeneidad espacial de la variable evaluada en el terreno donde se realizó el presente trabajo.

**Tabla 24. Concentración de materia orgánica en el suelo (%) y sedimento (%), enriquecimiento ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) y tasa de enriquecimiento (coeficiente), en La Aguada, Córdoba.**

TRATAMIENTO	MO Suelo (%)	MO Sedimento (%)	Enriquecimiento MO ( $\text{g.kg}^{-1}$ )	Tasa de Enriquecimiento MO
Rotación Agrícola	1,72	3,86	24,22	2,51
Rotación Agrícola-Ganadera	1,44	3,68	23,97	2,87
Sin Cobertura	1,58	4,56	31,30	3,19
Con Cobertura	1,58	2,97	16,89	2,19

Independientemente del tratamiento, el sedimento erodado tuvo mayor concentración de materia orgánica que en suelo original, es decir, que en ambos casos (rotación y cobertura) el sedimento se enriqueció del coloide orgánico, (Tabla 24).

Se encontraron diferencias en el enriquecimiento de materia orgánica entre la situación sin cobertura y el escenario con cobertura superficial, y si bien la primera situación tuvo valores que duplicaron a la segunda, la diferencia careció de significancia estadística. El escenario con cobertura presentó un enriquecimiento de  $16,89 \text{ g.kg}^{-1}$ , mientras que en la situación sin cobertura fue de  $31,30 \text{ g.kg}^{-1}$ , (Tabla 25).

**Tabla 25. Diferencia de enriquecimiento de MO ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) del suelo entre coberturas, en La Aguada, Córdoba.**

COBERTURA	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	16,89	8	5,51	A
0% Cobertura	31,30	8	5,51	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Otra forma de exponer estos resultados es a través de la tasa de enriquecimiento, que como antes fue explicado, es la relación entre la concentración de un elemento en el

sedimento y la concentración del mismo en el suelo que le dio origen. La situación sin cobertura presentó una tasa de enriquecimiento de 3,19, mientras que la situación con cobertura 2,19, (Tabla 24). Esta diferencia, fue debida principalmente al efecto de la falta de protección del suelo a través de la no cobertura superficial de rastrojos, coincidiendo con lo expresado por Cisneros *et al.*, (2012) en cuanto a que la cobertura superficial evita el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas, mantiene condiciones propicias para la infiltración de agua en el perfil, disminuye las pérdidas de agua y de suelo por erosión y consecuentemente la pérdida de nutrientes y CO<sub>2</sub>. Dejar los residuos de cosecha sobre la superficie del suelo en combinación con no laboreo (siembra directa) es una estrategia interesante o adecuada para reducir la erosión hídrica y eólica, incrementar el secuestro de C, el reciclado de nutrientes, el mejoramiento de las propiedades físico-químicas, biológicas y el aumento de la productividad general del suelo (Blanco-Canqui y Lal, 2009).

En Argiudoles, Argiustoles y Pelustertes del centro sur de EEUU, realizó ensayos aplicando lluvia simulada sobre microparcels y encontró que los sólidos suspendidos (fracción particulada) presentaban contenidos de carbono orgánico que superaban ampliamente a las que habían sido medidas en el suelo original, (Sharpley, 1985).

La rápida pérdida de materia orgánica que se produce en suelos sin vegetación y sus consecuencias sobre las propiedades físicas, fue considerada por Albaladejo *et al.*, (1998) como el principal factor de degradación de suelo en ambientes semiáridos, sin encontrar síntomas de recuperación natural, dos años después de haberse provocado el disturbio. Este hecho confirma que las actividades antrópicas que implican una reducción de la cobertura, pueden provocar un importante proceso de desertificación en estos ambientes. La declinación de los contenidos de materia orgánica en un suelo sin cobertura puede atribuirse a varios factores, entre los que pueden citarse la falta de residuos que retornan al suelo debido a la ausencia de vegetación (Parton *et al.*, 1987), el incremento de la temperatura del suelo que provoca una mayor mineralización (Scott *et al.*, 1994), y la pérdida ocurrida por erosión (Wan, El-Swaify, 1998).

En el actual estudio, la concentración promedio de MO presente en los sedimentos, se triplicó en la situación sin cobertura superficial (3,19) respecto de la cantidad presente en la capa superficial de los suelos a partir de los cuales fueron movilizados, (Tabla 24). Albaladejo *et al.*, (1998) concluyen que los procesos de degradación del suelo luego de eliminar la vegetación en zonas semiáridas, se manifiestan a través de la disminución del contenido de CO<sub>2</sub> y de la estabilidad estructural; coincidiendo en parte con lo expuesto por Tapia *et al.*, (2000) quienes concluyeron: “la práctica individual de no-labranza (siembra

directa) por sí misma, no es capaz de mantener la sostenibilidad de la fertilidad del suelo, lo cual sólo es posible conservar con la cobertura residual vegetal.

Un hallazgo importante realizado por Blanco-Canqui *et al.*, (2012) es que quitando el 75% o más de los residuos después de la cosecha puede anular todos los beneficios de la siembra directa para reducir las pérdidas de CO en el escurrimiento. La pérdida de sedimentos y CO de la siembra directa es igual a los de suelos arados cuando fueron retirados los residuos en o por encima del 75%. Esto coincide con lo expuesto por Marelli *et al.*, (2001) quienes concluyen que la eficiencia en el control de la erosión hídrica, de la siembra directa, ocurrirá siempre y cuando se obtengan las coberturas adecuadas, ya que de lo contrario las pérdidas de suelo sufridas serán similares a las regidas bajo sistemas de labranza convencionales. Este comportamiento tiene implicancias importantes como indicador de qué tecnología de labranza se debería utilizar si se retiran los residuos a tasas elevadas después de la cosecha. La eliminación de residuos a valores tan bajos como el 25%, reduce la habilidad de la siembra directa para controlar la erosión del suelo en distintas pendientes, (Blanco-Canqui *et al.*, 2012).

Adema *et al.*, (2001) quienes trabajaron sobre tres situaciones: vegetación natural, vegetación cortada a 5 cm de altura, y suelo descubierto en un Haplustol éntico, comprobaron que la tasa de enriquecimiento de CO medida en dos estaciones del año y como valor relativo a la concentración del nutriente en el suelo, fueron siempre mayores en el tratamiento de suelo desnudo, seguido en magnitud por el tratamiento de vegetación cortada y por último el valor más bajo para la situación de vegetación natural, ( $p \leq 0,05$ ). Los autores le atribuyen estos resultados al daño provocado por una lluvia de alta intensidad a suelos desprotegidos de cobertura y la consecuente degradación del horizonte superficial, que por su carácter éntico, posee una débil estructuración natural.

Por el lado de la rotación, la diferencia entre ambos niveles: agrícola y agrícola-ganadera tampoco tuvo significancia estadística y los valores absolutos de la diferencia de enriquecimiento fueron prácticamente similares (Tabla 26).

**Tabla 26. Diferencia de enriquecimiento de MO (g.kg<sup>-1</sup>) del suelo entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	N	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	23,97	8	10,68	A
Agrícola	24,22	8	10,68	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Expresados como tasa de enriquecimiento los valores fueron: 2,51 para la rotación agrícola y 2,87 para la rotación agrícola-ganadera, (Tabla 24). Por lo tanto y en consecuencia, los diferentes enriquecimientos de MO (g.kg<sup>-1</sup>) entre tratamientos pudieron deberse a la variabilidad espacial en la distribución de los contenidos de materia orgánica en suelo y no a un efecto de los tratamientos. Estos resultados, también pueden ser explicados en parte por Sharpley, (1985) que coincidiendo con Massey *et al.*, (1953) y Chagas, (1995) manifiestan que: si bien la pérdida de MO está en función de la pérdida de suelo, ésta no es una función lineal, ya que a medida que se incrementa el volumen de sedimentos movilizados, disminuye el contenido de MO en la masa total. Si se observa la tabla 14 se puede ver que la pérdida de suelo de la rotación mixta es significativamente mayor que la rotación pura, caso contrario ocurrió en la cantidad de materia orgánica en el sedimento, donde la RA aunque por poco, supera a la RAG.

Ronco *et al.*, (2012) consideran que “a pesar de que con la erosión se pierde P y N, elementos nutritivos que son de importancia para el crecimiento de los cultivos, éstos pueden reponerse con fertilizantes, mientras que la pérdida de CO podría ser más importante, por su efecto en otras propiedades del suelo tales como la estructura, aireación y retención de agua, especialmente en suelos como los estudiados, con una alta susceptibilidad a la degradación de la estructura y de baja capacidad de retención de agua “. Todas estas cualidades desfavorecidas, hacen que el suelo sea sin dudas mucho más susceptible a la erosión hídrica y por ende pierda mayor cantidad de sedimentos en el agua de escurrimiento. A esta apreciación realizada por Ronco *et al.*, (2012) se podría agregar que si bien la pérdida de nutrientes como P y N puede ser repuesta a través de la fertilización y otro tipo de enmiendas, no se puede dejar de desconocer que estas pérdidas, especialmente de P, tienen graves consecuencias en la contaminación de acuíferos superficiales (Sharpley, 1985; Chagas, 1995; Chagas *et al.*, 2005; Dutra *et al.*, 2001) por lo que cualquier alternativa de

manejo que evite o disminuya las pérdida de suelo por erosión tendrá un impacto positivo no solo en la productividad del sitio erodado sino también a nivel del ambiente regional.

Dada la correlación entre el contenido de MO y el índice de estabilidad de agregados (IEA), Dominguez *et al.*, (2008), encontraron que “la inclusión de pasturas en la rotación con cultivos agrícolas permite recomponer los valores de IEA perdidos durante el ciclo agrícola. Luego de una pastura, y durante el período agrícola, el sistema bajo SD produce una menor tasa de caída del IEA respecto a otras labranzas”. Estos resultados no serían coincidentes con los observados en la presente experiencia, ya que la mayor lámina de escurrimiento, menor velocidad de infiltración y menor profundidad de mojado de la lámina infiltrada en el suelo bajo rotación agrícola ganadera respecto a la condición bajo agricultura continua, en ambos casos bajo siembra directa, indicarían que la condición estructural de la rotación mixta, especialmente lo referido a la macroporosidad y su estabilidad, presenta mayor grado deterioro que en la rotación agrícola.

En nuestro país, Chagas *et al.*, (1999) trabajaron sobre dos tratamientos bien contrastantes agricultura continúa por más de diez años y pastura (campo natural) de 30 años. En ambos midieron el contenido de carbono orgánico (CO) antes y después de la aplicación de la lluvia simulada. El autor, al igual que en nuestro estudio, no encontró diferencias significativas entre tratamientos en el enriquecimiento de CO.

La pérdida de MO puede ser revertida incluyendo pasturas en la rotación (Studdert *et al.*, 1997), manejando las operaciones de labranza, la fertilización y aumentando la cantidad de residuos que se devuelven al suelo (Robinson *et al.*, 1994). Por otro lado, la implementación de siembra directa (SD) es una alternativa que podría reducir los efectos provocados por el laboreo a través de la promoción del mantenimiento y la acumulación de MO (Galantini *et al.*, 2004 b). De esta manera, la elección de una combinación adecuada de sistemas de labranza y rotación de cultivos permitiría favorecer la formación de agregados, y el subsiguiente aumento de su estabilidad.

La estabilidad de los agregados ha mostrado ser una función de la MO (Studdert *et al.*, 1997 y Angers, 1998). La descomposición de los residuos de cultivo libera compuestos orgánicos que estimulan la formación de los agregados y su estabilidad estructural. Es por esto que la estabilidad de agregados cumple un papel fundamental en la protección del suelo contra la erosión hídrica.

Como había sido explicado anteriormente, el enriquecimiento de materia orgánica estuvo correlacionado con: la lámina escurrida (mm), coeficiente de escurrimiento y la velocidad de infiltración final ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ). En cada una de estas últimas tres variables, fueron

expuestas las consecuencias y estrategias que trajeron aparejados sus correlaciones, independientemente de ser positivas o negativas, (Tabla 27).

**Tabla 27. Coeficiente de correlación de Pearson.**

<b>Variable 1</b>	<b>Variable 2</b>	<b>N</b>	<b>Pearson</b>	<b>p – valor</b>
Enriquecimiento de MO (g.kg <sup>-1</sup> )	Lámina escurrida (mm)	16	0,61	0,0116
Enriquecimiento de MO (g.kg <sup>-1</sup> )	Velocidad. Infiltración Final (mm.h <sup>-1</sup> )	16	- 0,57	0,0215
Enriquecimiento de MO (g.kg <sup>-1</sup> )	Coefficiente de escurrimiento	16	0,63	0,0086
Enriquecimiento de MO (g.kg <sup>-1</sup> )	Lámina total infiltrada (mm)	16		

Correlación significativa ( $p \leq 0,05$ ).

#### 8. ENRIQUECIMIENTO DE FÓSFORO.

Los contenidos de fósforo en el horizonte superficial presentaron diferencias significativas entre sistemas de manejo (rotación), (Tabla 28). El suelo de la rotación agrícola presentó 22,35 ppm, mientras que el de la rotación agrícola-ganadera tuvo 13,55 ppm.

Es necesario recordar que en la rotación mixta, la fertilización fosforada en la pastura (base alfalfa) solo se realiza el primer año, cuestión que no se repite hasta al comienzo del ciclo agrícola (3 años después). Es decir que, a pesar, de que el presente estudio se realizó en el tercer año del ciclo agrícola de esta rotación (agrícola-ganadera) y que en cada uno de estos años los cultivos fueron fertilizados con fósforo, la acumulación de la “no fertilización” en los dos años siguientes a la implantación de la pastura sumado a la alta tasa de extracción de este nutriente por parte de la pastura a lo largo de su ciclo y años que presenta este ensayo (20 años), no fue suficiente como para equiparar la concentración de fósforo hallada en la rotación agrícola pura en la cual la fertilización fosforada se realiza todos los años con la siembra del cultivo.

**Tabla 28. Concentración de fósforo en el suelo (ppm) y sedimento (ppm), enriquecimiento (mg.kg<sup>-1</sup>) y tasa de enriquecimiento (coeficiente).**

<b>Tratamiento</b>	<b>Fósforo Suelo (ppm)</b>	<b>Fósforo Sedimento (ppm)</b>	<b>Enriquecimiento P (mg.kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Tasa de Enriquecimiento P</b>
Rotación Agrícola	22,35	36,75	14,40	1,64
Rotación Agrícola-Ganadera	13,55	32,09	18,54	2,37
Sin Cobertura	17,9	33,77	15,83	1,89
Con Cobertura	17,9	35,06	17,11	1,96

Esta comprobado la fuerte correlación entre la materia orgánica del suelo y el fósforo, (Becker *et al.*, 2008). Si recordamos la cantidad de materia orgánica en el suelo original, la rotación agrícola tuvo una mayor cantidad con respecto a la rotación mixta, (Tabla 24); de la misma manera y respetando la relación antes descrita la concentración de fósforo también fue mayor. De manera opuesta ocurrió en la rotación mixta; con menor porcentaje de materia orgánica y fosforo en el suelo original.

El sedimento erodado presentó, independientemente del tratamiento, enriquecimiento de fósforo en distintas magnitudes. Estas van desde tasas de enriquecimiento de 1,64 en la situación agrícola a 2,37 en la agrícola-ganadera; presentándose con valores intermedios en el factor cobertura. En la situación de suelo desnudo se obtuvo una tasa de enriquecimiento de 1,89, en tanto que, en la situación con cobertura tuvo una tasa de 1,96, (Tabla 28). Esto coincide con Sharpley, (1985) que expresa: “los sedimentos erosionados usualmente contienen mayor proporción de nutrientes que la capa superficial del suelo original”.

Como se expresó anteriormente, el sedimento erodado presentó concentraciones de fósforo superiores al suelo que le dio origen, por lo tanto se vio enriquecido. La rotación agrícola mostró una concentración de 36,75 mg.kg<sup>-1</sup>, mientras que la agrícola-ganadera tuvo 32,09 mg.kg<sup>-1</sup>, (Tabla 28). Esta diferencia se presume en principio, que fue debida a la diferencia en la concentración del nutriente en cuestión en el suelo que dio origen a los sedimentos.

Si se observa la precedente tabla 28, se aprecia que la rotación agrícola presentaba mayor concentración de fósforo en el suelo (22,35 ppm), que la rotación mixta (13,55 ppm), de ahí la mayor cantidad hallada en el sedimento. Estos resultados coinciden con lo expuesto por Mathan y Kannan, (1993), que indican que la pérdida de nutrientes está directamente relacionada con la concentración inicial en el suelo de origen, las lluvias, el escurrimiento y el contenido de materiales coloidales en el suelo.

De la tabla 29 surge, que no hubo diferencias estadísticamente significativas en el enriquecimiento de fósforo ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) entre ambas rotaciones. Si bien la concentración de fósforo en el suelo de la rotación mixta fue menor, la gran cantidad de sedimentos erodados en esta situación, pudo llevar a tener altos valores de fósforo en el sedimento cercanos a la rotación agrícola.

**Tabla 29. Diferencia de enriquecimiento de fósforo ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) entre rotaciones, en La Aguada, Córdoba.**

ROTACIÓN	MEDIAS	n	E.E	DIFERENCIA
Agrícola-Ganadera	18,54	8	1,91	A
Agrícola	14,40	8	1,91	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Otro aspecto interesante de resaltar del presente estudio es la gran diferencia en la tasa de enriquecimiento entre ambas rotaciones. La rotación agrícola-ganadera presentó una tasa de enriquecimiento de 2,37, mientras que la rotación pura 1,64, (Tabla 28). Esto se pudo deber a la menor cantidad de materia orgánica en el suelo original en la rotación mixta, situación que lleva a tener una menor estabilidad de agregados y por consiguiente una mayor cantidad de sedimentos erodados (Tabla 14). En conclusión, si bien la rotación mixta tuvo una menor concentración de fosforo en el suelo y un menor enriquecimiento del mismo en el sedimento, la mayor tasa de enriquecimiento de esta, fue debida a la mayor cantidad de sedimentos erodados.

Si recordamos la tabla 28, observamos que el suelo cubierto presentó una concentración de fosforo en el sedimento de  $35,06 \text{ mg.kg}^{-1}$ , mientras que el suelo desnudo mostró un valor de  $33,77 \text{ mg.kg}^{-1}$ . La primera situación presentó una tasa de enriquecimiento de 1,96, en tanto que el suelo descubierto presentó una tasa de 1,89. Ambos escenarios de

cobertura tuvieron la misma concentración de fósforo en el suelo de origen, por lo tanto y en consecuencia la concentración del nutriente en el sedimento fue similar. La pequeña diferencia observada en el fosforo del sedimento a favor de la situación de suelo cubierto, se trasladó hacia el enriquecimiento; donde presentó 17,11 mg.kg<sup>-1</sup>; mientras que en la situación de suelo desnudo fue levemente menor, 15,83 mg.kg<sup>-1</sup>. Esta diferencia observada no tuvieron significancia estadística, por lo tanto fueron atribuidas a la heterogeneidad y variabilidad espacial de la concentraciones de fosforo en el suelo estudiado y no a un efecto de los tratamientos, (Tabla 28 y 30).

Chagas *et al.*, (1999) trabajaron sobre agricultura continúa por más de diez años y pastura (campo natural) de 30 años. Mediante el análisis de la concentración de P extractable particulado en el líquido, mostró que el suelo bajo agricultura perdió más cantidad total de dicho nutriente que la pastura durante el intervalo final de lluvia aplicada. Este hecho se debió principalmente a la elevada pérdida de suelo que sufrió el tratamiento agricultura durante dicho lapso, ya que la calidad del material transportado (entendiéndose como tal al contenido y grado de enriquecimiento en P extractable) no varió entre tratamientos. Resulta destacable el hecho de no haberse registrado un enriquecimiento en el contenido de P extractable en ninguno de los dos tratamientos analizados.

**Tabla 30. Diferencia de enriquecimiento de fósforo (mg.kg<sup>-1</sup>) entre coberturas, el La Aguada, Córdoba.**

COBERTURA	MEDIAS	n	E.E	DIFERENCIA
100 % Cobertura	17,11	8	1,69	A
0% Cobertura	15,83	8	1,69	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \geq 0,05$ )

Adema *et al.*, (2001) trabajando sobre un Haplustol éntico, encontraron mayor concentración ( $p < 0.05$ ) de P en el sedimento movilizado del tratamiento de suelo desnudo, con un valor promedio de 44,2 mg.kg<sup>-1</sup>, que en los tratamientos de vegetación cortada (5 cm de altura) y vegetación natural, los que presentaron un comportamiento similar, con valores de 25,4 mg.kg<sup>-1</sup> y 19,8 mg.kg<sup>-1</sup> respectivamente. A su vez el tratamiento de suelo desnudo (1,3), duplicó en la tasa de enriquecimiento al tratamiento natural (0,65) y en menor magnitud a la situación de corte (0,75). El primer tratamiento superó por poco a la

concentración de P en el suelo, mientras que los otros dos, tuvieron valores menores a la unidad, por lo tanto, no hubo enriquecimiento.

Becker *et al.*, (2008), encontró la alta correlación entre el CO y P ( $r=0,97$ ;  $p<0,05$ ) del suelo, que estaría indicando una fuerte asociación de estos componentes en el suelo, lo que corrobora lo expresado precedentemente.

En el presente estudio, coincidimos con lo expuesto anteriormente por Becker *et al.*, (2008), hallando una correlación positiva entre el enriquecimiento de fósforo y el enriquecimiento de materia orgánica, tal como se indica en la Tabla 31. Esto puede deberse a una asociación entre ambos nutrientes, movilizándose en forma conjunta en el sedimento erodado.

**Tabla 31. Coeficiente de correlación de Pearson.**

Variable 1	Variable 2	n	Pearson	p - valor
Enriquecimiento de P ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	Enriquecimiento de MO ( $\text{g.kg}^{-1}$ )	16	0,46	0,0736

Correlación significativa ( $p \leq 0,05$ ).

La asociación positiva entre CO y Pe indicaría que estos componentes se movilizarían en parte en forma conjunta como pequeños agregados (Albert y Moldenhauer, 1981; Martínez y Mena *et al.*, 1999) y por otro lado asociado a la arcilla y limo (Becker *et al.*, 2007). Esto sustenta lo expresado por Mathan y Kannan, (1993) quienes expresan que la pérdida de nutrientes está directamente relacionada entre otras cosas, con el contenido de materiales coloidales en el suelo (materia orgánica). Debido a que la mayoría de los nutrientes están adsorbidos sobre los coloides orgánicos e inorgánicos, la erosión de los sedimentos más finos provoca una movilización importante de nutrientes (Sharpley, 1985).

## V. CONCLUSIONES

Para las condiciones de suelo, rotación, uso y manejo, e intensidad de tormenta estudiada en el presente trabajo, no se encontraron evidencias suficientes para validar la hipótesis de trabajo, debido a múltiples causas:

- No hubo interacción entre las variables de clasificación rotación y cobertura, de forma tal, que no actúan en forma conjunta para la disminución de la pérdida de suelo y agua del sistema. Por lo tanto, se comportan de forma independiente.
- La cobertura superficial y la rotación no tuvieron efecto significativo sobre el tiempo de inicio de encharcamiento y el tiempo de inicio del escurrimiento. Sin embargo, la tendencia en los valores de ambas variables indicaría un mejor comportamiento de la RAG respecto a la RA, ya que ambas resultaron mayores que esta última.
- La lámina escurrida y el coeficiente de escurrimiento no se ven afectados por las variables estudiadas. Sin embargo, en la RAG ambas variables resultaron mayores que en la RA, aunque las diferencias no fueron significativas desde el punto de vista estadístico.
- La pérdida de suelo a campo estuvo influenciada por el efecto de la cobertura superficial y por el de la rotación. La situación de suelo cubierto disminuyó la pérdida de suelo por erosión hídrica. En cuanto a la rotación, la RAG presentó mayor pérdida que la RA; pudiendo este resultado estar asociado a una condición puntual (3<sup>er</sup> año de la RAG) de un sistema de rotación que se extiende por seis (6) años y que se inició veinte (20) años atrás, es decir, que no sería válido aseverar, a partir de la evaluación realizada en el presente trabajo, cual de ambas rotaciones es más sustentable a lo largo del tiempo.
- La pérdida de suelo obtenida a través de la RUSLE, tuvo una tendencia opuesta a la realizada a campo, ya que ésta fue menor en la RAG con respecto a la RA; tanto en la simulación a 6 años como en la de 20 años de rotación. Esto podría indicar lo que pasaría a campo luego de los seis (6) años que dura la rotación o veinte (20) del ensayo, es decir, que la RUSLE

permite obtener el resultado de la pérdida de suelo a largo plazo, mientras que la simulación a campo brinda información sobre un momento puntual a lo largo de la rotación.

- La lámina total infiltrada y la velocidad de infiltración, no se vieron afectadas por las variables estudiadas. Si bien las tendencias mostraron mayor volumen total infiltrado y velocidad de infiltración en la RA y en la situación con 100 % de cobertura, las diferencias encontradas no fueron estadísticamente significativas.
- Independientemente del tratamiento, el sedimento erodado se vio enriquecido de materia orgánica, con respecto a la concentración en el suelo original. Sin embargo, cuando se analiza las variables de clasificación por separado, la condición de cobertura superficial redujo significativamente el enriquecimiento de materia orgánica, y tuvo mayor influencia que el sistema de rotación.
- El sedimento erodado, también se enriqueció de fósforo con respecto a la concentración en el suelo original, independientemente del tratamiento aplicado.

## VI. RECOMENDACIONES

- Repetir el ensayo realizado a lo largo del tiempo, para disminuir el error experimental, de modo tal que los resultados hallados tengan mayor representatividad.
- Evaluar las mismas variables del presente trabajo, en el primer y segundo año posterior a la roturación de la pastura en la rotación agrícola-ganadera. De esa forma, permitiría determinar la dinámica y evolución de las variables en función del tiempo.
- Incorporar tecnología de procesos e insumos, para la producción y mantención de la pastura en base “alfalfa”, con el fin de poder determinar más concreta y precisamente los beneficios que trae aparejado su cultivo.
- Tener en cuenta los resultados obtenidos en el presente trabajo, para futuras intervenciones o manejos en el sistema agropecuario.
- Determinar en futuras investigaciones, las cargas animales óptimas o adecuadas para minimizar los efectos erosivos del agua como consecuencia del deterioro de las condiciones hidrofísicas del suelo por efecto del pisoteo animal.
- Hallar la relación óptima entre el ciclo agrícola y el ciclo ganadero en la RAG, con el fin de hacer sustentable el sistema de rotación.
- Cuantificar económicamente las pérdidas de suelo y agua que trae aparejado estos sistemas de producción.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- ADEMA, E. O., F. J. BABINEC Y N. PEINEMANN. 2001. **Pérdida de nutrientes por erosión hídrica en dos suelos del Cardenal Pampeano**. Ciencia del Suelo, 19(2):144-154.
- ALBALADEJO, J., M.N. MARTINEZ, A. ROLDAN Y V. CASTILLO. 1998. **Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment**. Soil Use and Manage. 14: 1-6.
- 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 – Volumen 5 – N° 1. [http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol\\_5n1/Apezteguia.pdf](http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_5n1/Apezteguia.pdf).
- AVNIMELECH, Y. Y J. R. MCHENRY. 1984. **Enrichment of transported sediments with organic carbon, nutrients, and clay**. Soil Sci. Soc. Am. J., 48:259-266.
- BECKER, A.R., N.G. BOSCHETTI, M.P. CANTÚ, B.J. PARRA Y C.E. QUINTERO. 2008. **Pérdida de carbono orgánico y fosforo por erosión hídrica bajo diferentes sistemas de manejo de suelos**. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- BEDANO, J.C., M.P. CANTÚ Y M. E. DOUCET. 2005. **Abundance of soil mites (Arachnida: Acari) in a natural soil of central Argentina**. Zoological Studies 44 (4): 505-512.
- BEDANO, J.C., M.P. CANTÚ Y M.E. DOUCET. 2006. **Soil springtails (Hexapoda: Collembola), symphylans and pauropods (Arthropoda: Myriapoda) under different management systems in agroecosystems of the subhumid Pampa (Argentina)**. European Journal of Soil Biology 42: 107–119.
- BLACKBURN, W.H., T.L. THUROW Y C.A. TAYLOR. 1986. **Soil erosion on rangeland**. En: Proc. Use of Cover, Soil and Weather Data in Range. Monitor. Symp. Soc. for Range Manage. Denver, CO. USA. p: 31-39.
- BLANCO CANQUI, H. 2012. **Crop residue removal increases soil erosion and degrades soil quality: implications for sustainability**. Kansas State University,

Department of Agronomy, Agricultural Research Center-Hays, 1232 240th Ave., Hays, Kansas 67601.

- BLANCO-CANQUI, H. Y R. LAL. 2009. **Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality**. Critical Reviews in Plant Science. 28:139-163.

- BLANCO, H. Y R. LAL. 2010. **Principles of soil conservation and management**. Springer. USA. 617 pp.

- BONVECCHI, V.E., M.C. COSTA, J. IRIGOIN, A. DETTLER, L. BULOS Y S. RUTTI. 2014. **Cobertura de rastrojos y eficiencia en el uso de agua del suelo**. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas” Producción sustentable en ambientes frágiles Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014. Depto. Tecnología, Universidad Nacional de Luján (UNLu).

- BRADFORD, J. M. Y C. HUANG. 1994. **Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover**. Soil Till. Res. 31: 353-361.

- BRAY, R. H. Y L.T. KURTZ. 1945. **Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils**. *Soil Sci.* 59: 39-45.

- CABRERA, A. L. 1976. **Regiones fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería**. Tomo II, Fasc. 1. Ed. Acme, Buenos Aires.

- CABRERA, F.S., C. CHOLAKY Y A. BECKER. 2011. **Propiedades hidrofísicas de un hapludol típico de Córdoba en relación al pisoteo animal**. Evaluación de propiedades hidrofísicas. *Ciencia del Suelo*, 29 (2):1-29.

- CANTERO GUTIERREZ, A., E.M. BRICCHI, V.H. BECERRA, J.M. CISNEROS Y H.A. GIL. 1986. **Zonificación y descripción de las tierras del departamento de Río Cuarto. (Córdoba)**. FAV-UNRC. 80p.

- CANTERO GUTIERREZ, A., M.P. CANTÚ, J.M. CISNEROS, J.J. CANTERO, M. BLASARÍN, A. DEGIOANI, J. GONALEZ, V. BECERRA, H. GIL, J. DE PRADA, S. DEGIOANNI, C. CHOLAKY, M. VILLEGAS, A. CABRERA Y C. ERIC. 1998. **Las tierras y aguas del sur de Córdoba. Propuestas para un manejo sustentable**. 1ra ed. Ed. Masters SRL, Córdoba, Argentina. 119p.

- CANTÚ, M.P Y S.B. DEGIOVANNI. 1984. Geomorfología de la región centro-sur de la provincia de Córdoba. Actas IX. Congreso Geológico Argentino. San Carlos de Bariloche. 76-92.
- CANTÚ M.P., A.R.BECKER, J.C. BEDANO, T.B. MUSSO Y H.F. SCHIAVO. 2004. **Indicadores e Índices cuantitativos de Calidad Ambiental y de Suelos para evaluar la Sustentabilidad de Agroecosistemas.** XIX Cong. Arg. Ciencia del Suelo. CD. 10 páginas.
- CANTÚ M. P., E. DÍAZ, L. DEL RÍO, P. BOUZA, D. BUSCHIAZZO, M. T. BLARASÍN, A. R. BECKER, O. DUARTE, C. QUINTERO, G. BOSCHETTI, M. OSTERRIETH, J. CIONCI, H. DEL VALLE Y J. COLAZO. 2006. **Indicadores de sustentabilidad en sistemas agropecuarios de diferentes regiones de Argentina.** Red REDESAR. XX Cong. Arg. Ciencia del Suelo. CD 5 páginas.
- CANTÚ, M.P., A. BECKER, J.C. BEDANO Y H.F. SCHIAVO. 2007. **Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices.** Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta 36 km 601, (X5804BYA) Río Cuarto, Córdoba. mcantu@exa.unrc.edu.ar. Ciencia del suelo. 25(2): 173-178.
- CASANOVAS, E.M., H.E. ECHEVERRIA Y G.A. STUDDERT. 1995. **Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. I Contenido total y de distintas fracciones.** Unidad integrada FCA-INTA Balcarce CC 276-7620 Balcarce, Argentina. Ciencia del suelo. 13:16-20.
- CASAS, R. Y C. IRURTIA. 1995. **Lo que la erosión se llevó.** Campo y tecnología. Año IV N° 18. Enero/febrero.
- CHAGAS, C. I., O.J. SANTANOGLIA, R. GUTIÉRREZ. 1993. **Propiedades físicas y biológicas de un Argiudol vértico erosionado bajo pradera.** Investigación agraria: Producción y Protección Vegetales, 8 (1), 79-87.
- CHAGAS, C. I. Y M.C. GRATTOLA. 1994. **Erosión entre surcos y estabilidad estructural en un Argiudol típico.** Ciencia del suelo. 12: 35-37.
- CHAGAS, C. I. 1995. **Efectos de la rugosidad superficial, el tamaño de los agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión entre surcos en un Argiudol.** Ciencia del suelo. 13: 85-90.

- CHAGAS C. I., LAVADO R.S., REVILLA C.A. Y G.J. MACIAS. 1999. **Movimiento superficial de fósforo en suelos de Pampa Ondulada**. Ciencia del Suelo, 17(2):46-53. Departamento de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417) Capital Federal, República Argentina.
  
- CHAGAS, C.I., C. IRURTIA, J. THISTED, O.J. SANTANATOGLIA, M.J. MASSSOBRIO, M.G. CASTIGLIONI Y T.A. BUJÁN. 2004. **Movimiento horizontal y vertical de agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa**. Ciencia del Suelo 22 (2): 114-119.
  
- CHAGAS, C.I., O.J. SANTANATOGLIA, J. MORETTÓN, M. PAZ, M.V. PIAZZA, C. IRURTIA, M. DE SIERVI, H. MUZIO Y M.G. CASTIGLIONI. 2005. **Calidad de la escorrentía de los campos ganaderos de la Pampa Ondulada, Argentina, obtenido por precipitación simulada**. Conferencia Internacional "Cambio Ambiental y Uso Racional del Agua". Comisión de Sustentabilidad Hídrica de la Unión Geográfica Internacional. Buenos Aires, Argentina 29 de agosto al 1 de setiembre de 2005. Pag. 95.
  
- CISNEROS, J.M., J.D. DE PRADA, A. DEGIOANNI, CANTERO A. GUTIÉRREZ, H. GIL, M.A. REYNERO, F. SHAH Y B. BRAVO URETA. 2004. **Erosión hídrica y cambio de uso de los suelos en Córdoba. Evaluación mediante el modelo RUSLE 2**. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (Entre Ríos).
  
- CISNEROS, J.M., G.A. CANTERO, J.G. GONZÁLEZ, J.D. DE PRADA, M.A. REYNERO, H.A. GIL, A. DEGIOANNI, C.G. CHOLAKY, V.H. BECERRA y F. MONGI. 2005. **Programa de Control de Erosión-Sedimentación y Manejo Ambiental de las Tierras y Prevención de Aporte de Excedentes Hídricos a los Caminos de la Red Secundaria y Terciaria de las Subcuencas de Holmberg, La Lagunilla y La Carolina**. Protocolo de Trabajo No. 2. Convenio de Cooperación Universidad Nacional de Río Cuarto- Dirección Provincial de Vialidad-Córdoba Argentina, Río Cuarto. No. 86.
  
- CISNEROS, J.M., J.D. DE PRADA, A. DEGIOANNI, A. CANTERO GUTIÉRREZ, H. GIL, M.A. REYNERO, F. SHAH Y B. BRAVO URETA. 2004. **Erosión hídrica y cambio de uso de los suelos en Córdoba**. Evaluación mediante el modelo RUSLE 2. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (Entre Ríos), En Actas del Congreso, trabajo completo en CD.

- CISNEROS, J., C. CHOLAKY, A. CANTERO GUTIÉRREZ, J. GONZÁLEZ, M. REYNERO, A. DIEZ Y L. BERGESIO. 2012. **Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejos**. Ed. Unirío, Fac. Agronomía y Veterinaria, Univ. Nacional de Río Cuarto, Argentina. Versión digital.
  
- CLÉRICI, C., Y GARCÍA PRÉCHAC, F. 2001. **Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata**. Agrociencia. (2001). Vol. V N° 1. Pag. 92-103.
- COLOMBO, G., J. GONZÁLEZ Y C. CHOLAKY PÉREZ. 2012. **Rendimiento de maíz sembrado en curvas de nivel en función del contenido hídrico edáfico**. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina. Actas.
  
- CORBELLA, R.D., G.A SANZANO, J.R. GARCÍA, A.M. PLASENCIA, G.S. FADDA, M. MORANDINI. 2004. **Descomposición de rastrojos y su influencia sobre la fertilidad química en un Haplustol típico con diferentes manejos**. XIX Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo. Paraná, Argentina.
  
- DENOIA, J., O. SOSA, G. ZERPA Y B. MARTÍN. 2000. **Efecto del pisoteo animal sobre la velocidad de infiltración y sobre otras propiedades físicas del suelo**. Pastos. XXX (1): 129-141.
  
- DE LA VEGA, G., M. G. CASTIGLIONI, M.J. MASSOBRIO, C.I. CHAGAS, O.J. SANTANATOGLIA Y C. IRURTIA. 2004. **Infiltración en un Argiudol Vértico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura humedad inicial**. Ciencia del suelo. 22: 52 – 55.
  
- DÍAZ, E., C.E. QUINTERO, N.G. BOSCHETTI, O.C. DUARTE, C.E. ROMERO, A. PAZ GONZALEZ, L.L. LENZI Y A. MENDEZ. 2008. **Evaluación de la pérdida de suelos y fósforo disuelto a escala de cuenca**. Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNER Ruta Provincial 11 km 10.5, (3101) Oro Verde, Entre Ríos. E-mail: ediaz@fca.uner.edu.ar.
  
- DI RIENZO, J.A., F. CASANOVES, M.G. BALZARINI, L. GONZALEZ, M. TABLADA Y C.W. ROBLEDO. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

- DURÁN, D. 1998. **"Los procesos de degradación y la conservación de suelos en la República Argentina"**. La Argentina ambiental -naturaleza y sociedad. Editorial Buenos Aires.
  
- DU TOIT, G., N. VAN, H.A. SNYMAN Y P.J. MALAN. 2009. **Physical impact of grazing by sheep on soil 380 parameters in the Nama Karoo subshrub/grass rangeland of South Africa.** *Journal of Arid 381 Environments.* 73(9): 804-810
  
- DUTRA, I.S., J. DOBEREINER, I.V. ROSA, L.A.A. SOUZA Y M. NONATO. 2001. **Botulism outbreaks in cattle in Brazil associated with contaminated wáter.** *Pesquisa Veterinaria Brasileira.* 21:43-48.
  
- EIZA, M.J., G.A. STUDDERT Y G.F. DOMINGUEZ. 2006. **Dinámica de la Materia Orgánica del suelo bajo rotaciones mixtas. I Materia Orgánica total.** XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, Argentina.
  
- EUROPEAN CONSERVATION AGRICULTURE FEDERATION. 1999. **Agricultura de conservación en Europa: Aspectos medioambientales, económicos y administrativos de la UE.** Bruselas, Bélgica.
  
- GALANTINI, J.A., J.O. IGLESIAS, L. CUTTINI, H. KRÜGER Y S. VENANZI. 2004 a. **Sistemas de labranza: efecto sobre las rotaciones orgánicas.** En: Actas de XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos, Argentina. En CD.
  
- GALANTINI, J.A., J.O. IGLESIAS, Y R.A. ROSSEL 2004 b. **Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en la región semiárida pampeana.** XIX Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo. Paraná, Argentina.
  
- GARCÍA TOBAR, J. A. 1985. **El futuro de la ganadería en las zonas agrícolas.** *Revista Argentina de Producción Animal,* 4 (2), 3-31.
  
- GOOGLE AERTH. 2014. Versión 7.1.2.2041 de Google Earth. Visitado el 08/05/2014 y el 24/06/2014.
  
- GONZALES, I., A. SANCHEZ, F. DEL MORAL, S. DE HARO, A. IRIARTE, F.J. MARTÍN. 2009. **Comparacion de la erosion en suelo por simuladores de lluvia y USLE.**

Control de la degradación de los suelos y cambio global. IV Simposio Nacional de CDSCG. Valencia, España. Eds. J. Sanchez Díaz y S. Asins Velis.

- GVOZDENOVICH, J., Y O. PAPAROTTI. 2010. **Variación del rendimiento del cultivo de soja debido a la Erosión Hídrica**. [http://www.inta.gov.ar/actual/info/2010/Variacion\\_rendimiento\\_cultivo\\_soja\\_erosion\\_hidrica.pdf](http://www.inta.gov.ar/actual/info/2010/Variacion_rendimiento_cultivo_soja_erosion_hidrica.pdf).

- GVOZDENOVICH, J., Y PAPAROTTI O. 2011. **Variación del rendimiento del cultivo de soja debido a la Erosión Hídrica en Entre Ríos**. Campaña 2010/11. <http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/>.

- GVOZDENOVICH J Y PAPAROTTI O. 2012. **Variación del rendimiento del cultivo de soja debido a la Erosión Hídrica en Entre Ríos**. Campañas 2009/10 - 2010/11. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. Abril de 2012

- GVOZDENOVICH, J. J., P. BARBAGELATA Y A.C. PIOTO. 2014. **Factor K de la ecuación universal de pérdida de suelo**. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”. Producción sustentable en ambientes frágiles Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014. EEA Paraná (INTA); 2 Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNER). [gvozdеноvich.jorge@inta.gob.ar](mailto:gvozdеноvich.jorge@inta.gob.ar) Ruta 11, km 12.5 (3100) Paraná (ER).

-HALL G.F., T.J. LOGAN y K.K. YOUNG. 1985. **Criteria for determining tolerable erosion rates**. In: **Soil Erosion and crop productivity**. Ed. Follet and Stewart. ASA-CSSA-SSSA. Madison, USA. 173-188.

-INTA.2008. Suelos y ambientes de Córdoba. En: <http://inta.gob.ar/imagenes/cordoba.jpg/view>. Consultado: 7/01/2012.

- IRURTIA, C.B. Y J. L. LUQUE. 1994. **Instrucciones para el uso del microsimulador de lluvias**. INTA Castelar, Buenos Aires, Argentina: 14 p.

- IRURTIA, C.B. Y J. L. LUQUE. 2005. **Instrucciones para el uso del microsimulador de lluvias**. INTA Castelar, Buenos Aires, Argentina: 14 p.

- KIESSLING, R.J., J.A. GALANTINI, J.G. IGLESIAS, H. KRÜGER Y S. VENANZI. 2006. **Efecto del pastoreo sobre la distribución del espacio poroso bajo dos sistemas de labranza.** Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, Argentina.
  
- KUGLER, W.F. 1983. **Conservación de suelo y el agua e inundaciones en la cuenca del plata.** Operativo paraguas, IDIA, Corrientes. 70p
  
- LIEBIG, M.A., D.L. TANAKA, Y B.J. WIENHOLD. 2004. **Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains.** Soil Till. Res. 78:131-141.
  
- MARELLI, H., B.M. DE MIR, J. ARCE Y A. LATTANZI. 1984. **Evaluación de la erosión hídrica en el suelo labrado.** Ciencia del suelo. 2: 69 - 70.
  
- MARELLI, H. 2001. **El agua y la siembra directa. Siembra Directa en el Cono Sur.** PROCISUR. 450p.
  
- MARELLI, H. 2004. **La erosión hídrica.** En: <http://agrolluvia.com>. Consultado: 5/12/2012.
  
- MARELLI, H. 2003. **Estimación del potencial erosivo en la provincia de Córdoba a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE).** Publicación INTA Marcos Juárez.
  
- MASSOBRIO, N.J. 2012. **Materia orgánica total y lábil en un Hapludol típico del Sur-Oeste de la Provincia de Córdoba en una rotación agrícola-ganadera con tres sistemas de labranza.** Tesis de grado, Univ. Nacional de Río Cuarto, Argentina.
  
- MATHAN, K.K. Y 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
  
- MEBIUS, L. 1960. **A rapid method for determination of organic carbon in soils.** Anal. Chem. Acta 22: 120-124.
  
- MERRILL, S.D., J.M. KRUPINSKY Y D.L. TANAKA. 2002. **Soil coverage by residue in diverse crop sequences under No-till.** USDA-ARS. Annual Meeting of ASA-CSSA-SSSA, IN, USA. 61:7-13.

- MUSSO, T.B. 2003. **Evaluación de la variabilidad temporal de propiedades químicas y fisicoquímicas de suelos para el seguimiento de la calidad ambiental.** Tesis de Licenciatura, UNRC. 127 Páginas.
  
- MUSSO, T.B., M.P. CANTÚ Y A.R. BECKER. 2006. **Indicadores químicos de calidad de suelos.** Un set mínimo para Hapludoles de la Cuenca del A° La Colacha. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo CD 5 pp.
  
- PAPAROTTI O., E. SCOTTA Y W. BERDINI. 1996. **Siembra directa y terrazas en suelos con pendientes.** INTA EEA Paraná – INTA EEA Pergamino. Avances en siembra directa. IPG N° 33.
  
- PARRA, B. J. 2006. **Efecto del uso y labranzas sobre la distribución de tamaño de poros en un Hapludol típico.** Acta XX Cong. Arg. Ciencia del Suelo. CD. 5 páginas.
- PARRA, B.J., A.R. BECKER Y M. P. CANTÚ. 2007. **Evaluación del efecto del uso y manejo del suelo sobre algunas propiedades de un Hapludol típico en Argentina.** Cuadernos Lab. Xeológico de Laxe. En prensa.
  
- PARTON, W.J., D.S. SCHIMEL, C.V. COLE Y D.S. OJIMA. 1987. **Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands.** Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 1173-1179.
  
- PERALTA, M. 2011. **Estabilidad estructural superficial de un Hapludol típico del suroeste de Córdoba en una rotación agrícola ganadera con tres sistemas de labranza.** Tesis de grado, Univ. Nacional de Río Cuarto, Argentina.
  
- PURICELLI, C. A., 1985. **La agricultura rutinaria y la degradación del suelo en la Región Pampeana.** Revista Argentina de Producción Animal, 4 (2), 33-48.
  
- RIENZI E. A. Y N. GRATTONI. 2002. **Enrichment rate of organic carbon content in sediment produced by interrill erosion with two degrees of surface cover.** In: International Colloquium Landuse management, erosion and carbon sequestration. Montpellier, Francia.
  
- ROBINSON C.A., R.M. CRUSE Y K.A. KOHLER. 1994. Soil management. p. 109-134. In J.L. Hatfield y D.L. Karlen (ed.) Sustainable agriculture systems. Lewis Publ., Boca Raton, FL, USA.

- RONCO, J., A. BECKER, N. BOSCHETTI, H. SCHIAVO, R. BEFANI Y M. COOPER. 2012. **Evaluación de erosión hídrica en agroecosistemas de la cuenca de General Deheza, Córdoba.** XIX Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo, Mar del Plata, Argentina.
  
- RUAN, H., L.R. AHUJA, T.R. GREEN Y J.G. BENJAMIN. 2001. **Residue cover and surface-sealing effects on infiltration: numerical simulations for field applications.** Soil Sci. Soc. Am. J. 65: 853-861.
  
- SANTANATOGLIA, O.J., C.I. CHAGAS, A. IORIO, P. DANIEL, A. RENDINA, M. MASSOBRIO, M. CASTIGLIONI, M. BARGIELLA Y A. BUJÁN. 1997. **Uso antrópico de la cuenca del arroyo del Tala, Provincia de Buenos Aires: incidencia en las propiedades del agua.** Congreso Internacional sobre Aguas y Workshop sobre Química Ambiental y Salud. Buenos Aires, Argentina, 4 al 8 de agosto de 1997. Pag 20.
  
- SASAL, M. C., M. G. WILSON, N. A. GARCIARENA, H. A. TASI, Y O. PAPAROTTI. 2008. **Escurrecimiento y pérdidas de suelo en sistemas de cultivo bajo siembra directa: efecto de algunas propiedades edáficas superficiales.** INTA EEA, Entre Ríos, Argentina. En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de Funes, San Luis (pp. 13-16).
  
- SCHIETTECATTE E., D. GABRIELS Y M. DE ROOCK. 2002. **Enrichment of organic carbon in eroded under natural and artificial rain.** In: International Colloquium Landuse management, erosion and carbón sequestration. Montpellier, Francia.
  
- SCOTT H.D., A. MAUROMOUSTAKOS, L.P. HANDAYANI Y D.M. MILLER. 1994. **Temporal variability of selected properties of loessial soil as affected by cropping.** Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1531-1538.
  
- SHARPLEY, A. N. 1985. **The selective erosion of plant nutrients in runoff.** Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1527-1534.
  
- SAUZANO, G. A., G.S. FADDA, M.R. CÁCERES. 1997. **Influencia de las pasturas en algunas propiedades de suelos del noroeste argentino.** Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, 74, 65-69.

- SAYDS. 2008. **El avance de la frontera agropecuaria y sus consecuencias.** Versión digital. 12 p. En: [http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/File/032808\\_avance\\_soja.pdf](http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/File/032808_avance_soja.pdf). Consultado: 25/11/2012.
  
- SEILER, R.A., R.A. FABRICIUS, V.H. ROTONDO, Y M.G. VINO CUR. 1995. **Agrometeorología de Río Cuarto 1974/1993.** Volumen I. FAV-UNRC. pp. 68.
  
- SILVA, L. A., N. C. GUTIERREZ Y C. VENIALGO. 2000. **Densidad relativa y estabilidad de agregados en cultivos anuales y perennes en la serie Zanatta – Meson de Fierro, Chaco.** Univ. Nacional del Nordeste. Fac. de Ciencias Agrarias. Argentina.
  
- STUDDERT G.A., H.E. ECHEVERRÍA Y E.M. CASANOVAS. 1997. **Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll.** Soil Sci. Soc. Am. J. 61, 1466-1472.
  
- TABOADA, M.A., F.G. MICUCCI Y C.R. ALVAREZ. 2008. **Impedancias mecánicas y compactación en 433 suelos agrícolas. Compactación por pisoteo animal.** En: Taboada, MA & CR Alvarez (Eds) 434 Fertilidad Física de los Suelos. 2da edn. 126-130 pp. Facultad de Agronomía. Universidad de 435 Buenos Aires.
  
- TABOADA, M.A. 2008. **Influencia de la textura y la estructura de los suelos sobre la fertilidad física.** En: **Fertilidad Física de los Suelos.** Taboada, A., C. Alvarez (Eds.) Editorial Facultad de Agronomía UBA, Buenos Aires, Argentina. 237p.
  
- TABOADA, M.A. 2010. **Influencia de la textura y la estructura sobre la fertilidad física** En: Fertilidad de Suelos. Caracterización y Manejo en la región pampeana. Alvarez, R; G Rubio; C Alvarez; R. Lavado (Eds.) Editorial Facultad de Agronomía UBA, Buenos Aires, Argentina. 423 pp.
  
- TAPIA, L.M., V.M. TISCAREÑO, L.J. SALINAS R, M. VELÁZQUEZ, V.A. VEGA P Y H. GUILLÉN. 2000. **Respuesta de la cobertura residual del suelo a la erosión hídrica y la sostenibilidad del suelo, en laderas agrícolas.** Terra 20: 449-457.
  
- TROEH, F.R., J.A. HOBBS Y R.L. DONAHUE. 1991. Soil and Water Conservation. Second Edition. Prentice Hall, Inc. 530 pp.
  
- USDA. 2008. Agricultural Research Service. Revised Universal Soil Loss Equation Version

(RUSLE2).En:[http://www.ars.usda.gov/sp2UserFiles/Place/64080510/RUSLE/RUSLE2\\_Us er Ref Guide.pdf](http://www.ars.usda.gov/sp2UserFiles/Place/64080510/RUSLE/RUSLE2_Us er Ref Guide.pdf). Consultado: 18/07/2013.

- WAN, Y. Y S.A. EL-SWAIFY. 1998. **Sediment enrichment mechanisms of organic carbon and phosphorus in a well-aggregated Oxisol.** J. Environ. Qual. 27: 132-138.
- WILCOX, B. P. 1994. **Runoff and erosion in intercanopy zones of pinyon-puniper woodlands.** J. Range Manage. 47: 285-295.
- WISCHMEIER, W.H. Y D.D. SMITH. 1978. **Predicting rainfall erosion losses.** USDA Agricultural Research Service. Handbook. 537p.
- YIMER, F., I. MESSING, S. LEDIN Y A. ABDELKADIR. 2008. **Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in the highlands of Ethiopia.** Soil Use Manage. 24:344-349.
- ZANZANO A. Y G. FADDA. 2006. **Escurrimiento, pérdidas de suelo y nutrientes por erosión hídrica con la introducción de la rotación soja-maíz.** Acta XX Congr. Arg. Ciencia del Suelo. CD 6 páginas.