

Prácticas de conservación para la reducción de inundaciones

Conservation practices to reduce floods

Cecilia I Vettorello^{a*}, Juan P Clemente^a, Gustavo F Esmoriz^a, Carola C Díaz^a, Daniel A Cotorás^a, Lucas Molina^a, Luciano Cortés^a

Palabras clave:

cuenca hidrográfica, escurrimiento, rotación de cultivos, terrazas de desagüe.

Keywords:

watershed, runoff, crop rotation, drainage terraces

ABSTRACT

Rainfall in semiarid environments is intense and produces runoff. In sloppy areas, conservational systems based on agricultural rotation should be complemented by parallel drainage terraces. The purpose of this study was to evaluate the effects of conservation practices according to hydrological parameters and cultures from two microwatersheds in the semiarid area of the Province of Córdoba. One microwatershed has parallel drainage terraces (SIST) and the other microwatershed is not systematic (NOSIST). Both had direct seeding and crop rotation. The average rainfall is 760 mm per year and the soil is Typical Haplustol. The increased frequency of extreme events caused by climate change affects the volume of runoff. NOSIST had runoff losses of 52 and 27% compared to the rainfall recorded in two events while the SIST was only 2 and 9%. In turn, NOSIST had biomass of soybean, corn and rye 55%, 24 % and 38% lower, respectively. In conclusion, engineering conservation practices combined with crop rotation significantly reduce floods and improve production through a better use of water.

RESUMEN

En ambientes semiáridos las precipitaciones se caracterizan por ser intensas y producen escurrimientos. En áreas con pendientes, los sistemas conservacionistas basados en una rotación agrícola deberían complementarse con terrazas paralelas de desagüe. Es por esto que el propósito del trabajo fue evaluar los efectos de las prácticas de conservación sobre parámetros hidrológicos y de cultivo en dos microcuencas en la zona semiárida de la Provincia de Córdoba. Una microcuenca tiene terrazas paralelas de desagüe (SIST) y otra está sin sistematizar (NOSIST). Ambas se manejan con siembra directa y rotación de cultivos. La precipitación media es de 760 mm anuales y el suelo es Haplustol típico. La mayor frecuencia de eventos extremos producidos por el cambio climático, afectan el volumen de escurrimiento. NOSIST tuvo pérdidas por escorrentía de 52 y 27 % con respecto a la precipitación registrada en dos eventos mientras que la sistematizada fue solo de 2 y 9 % respectivamente. A su vez, NOSIST tuvo rendimientos de la biomasa de soja, maíz y centeno de 55%, 24% y 38 % menor, respectivamente. Es decir, las prácticas ingenieriles de conservación sumadas a rotación de cultivo reducen significativamente las inundaciones y mejoran la producción por un mejor uso del agua.

^aFacultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Ing. Agr. Felix Aldo Marrone 746, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

* Autor para correspondencia: +543514334116 int.308. cvettore@agro.unc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los informes sobre el cambio en el clima durante el último siglo, según Trenberth *et al.* (2007), han incluido un aumento de la temperatura media en la superficie, particularmente en latitudes medias y altas, y cambios en las cantidades e intensidades de la precipitación en varios países de la región (sur de Brasil, Paraguay y Argentina). El cambio climático podría modificar las condiciones actuales, con impactos beneficiosos o adversos, tal como ocurre en la actualidad como consecuencia del fenómeno El Niño/Oscilación Austral (ENOA). Goddard *et al.* (2001) indican que la variabilidad natural del clima constituye un elemento importante para la planificación nacional y regional.

El incremento de la frecuencia de eventos extremos probablemente tendría un impacto más grande que los cambios en los valores medios de la temperatura o la precipitación. Las cadenas y las mesetas montañosas juegan un papel importante en la definición del clima, ciclo hidrológico y biodiversidad en América Latina. Además, los cambios en la circulación atmosférica derivados del fenómeno ENOA y el cambio climático podrían modificar las cantidades de los escurrimientos superficiales y subterráneos en las áreas al pie de las montañas, sobre todo en Chile y Argentina, entre 25° y 37°S (Trenberth *et al.*, 2007).

En ambientes semiáridos de Argentina, las precipitaciones se caracterizan por tener una estación seca bien diferenciada en cantidad, clase y rango de precipitaciones, de otra estación más húmeda. Esta dinámica provoca un desbalance en el agua del suelo que, en la mayoría de los años, provoca déficits importantes de agua para la producción agropecuaria. Sin embargo, en los períodos lluviosos o de precipitaciones intensas y continuas, se generan escurrimientos y erosión. En estas situaciones se afecta la cuenca completa, tanto las zonas de producción agrícola como poblaciones e infraestructura, afectando las condiciones socioeconómicas regionales (Barbeito *et al.*, 2015).

ENFOQUE METODOLÓGICO

En Argentina, el proceso de agriculturización que se inició en la década del '80, manifestando un creciente predominio de soja (*Glicinemax* (L.) Merrill) a partir de 1990 (Aizen *et al.*, 2009) en reemplazo de otros cultivos como maíz (*Zea mays* L.), centeno (*Secalecereale* (L.) M. Bieb), alfalfa (*Medicagosativa* L.) y otros cultivos, fue escasamente acompañado de las técnicas conservacionistas necesarias para evitar el deterioro de los suelos (Jobbágy, 2010; Miranda *et al.*, 2014). Este cambio llevó a la ruptura del complejo equilibrio de este sistema y al reemplazo de una situación original natural por un agro-ecosistema (Abril *et al.*, 2015). Junto a ello, el aumento en la intensidad de los fenómenos climáticos atenta contra la producción sostenible y afectan de manera directa a toda la sociedad. Un ejemplo de ello puede observarse en el deterioro de la infraestructura rural o en las inundaciones en la provincia de Córdoba, Argentina, que se observaron a principios del año 2015 y que afectaron tanto las zonas urbanas y productivas. No hay una valoración detallada de este daño, pero se estimó que fueron afectadas aproximadamente 500000 ha en la provincia (Barbeito *et al.*, 2015).

Ocurridas estas inundaciones, el estudio del recurso hídrico en relación al sector agrícola y el sistema actual de producción se intensificó, ya que dicho sector fue uno de los más perjudicados. Una de las causas de los daños fueron los volúmenes de precipitaciones y su intensidad, por otro lado la difusión de la siembra directa en las áreas de producción agrícola y la intensificación del uso del suelo, con predominio de monocultivo de soja, tal como se mencionó (Vettorello *et al.*, 2012) también tuvieron un impacto en la región. Estudios anteriores indican que en la región con procesos erosivos y generadores de escurrimiento aún no se han generalizado las obras ingenieriles, mientras que destacan la utilización de prácticas agronómicas conservacionistas como la siembra directa (SD) (Agencia Córdoba Ambiente – INTA, 2006; Cisneros *et al.*, 2012).

Dentro de las áreas generadoras de escurrimiento y erosión hídrica en la

provincia de Córdoba, se encuentra la Plataforma Basculada o Pampa Elevada. Los procesos erosivos (principalmente hídricos) son intensos y generalizados en toda la unidad geomorfológica, sobre todo en el oeste, donde se producen no sólo de manera laminar y en surco, sino también en forma de cárcavas profundas y aisladas, provocando inundaciones en las zonas bajas. Esta unidad conforma un bloque elevado y basculado hacia el este, con suelos agrícolas, *Haplustolesénticos* y *H. típicos*, derivados del loess pampeano (Abril *et al.*, 2015). Poseen un porcentaje muy alto de limo (cerca del 70 %), materia orgánica cercana al 2 % (Gorgas & Tassile, 2002; Cabido *et al.*, 2003), razón por la cual tienen fragilidad e inestabilidad estructural que se manifiesta en una tendencia al "encostramiento" y al "planchado". Por lo tanto, presentan alta susceptibilidad a la degradación física, punto inicial de los escurrimientos y de los procesos erosivos antes mencionados (Núñez Vázquez *et al.*, 1996; Vettorello, 2008).

En la Plataforma Basculada se ha generalizado el uso del sistema de siembra directa. Si bien este sistema es considerado conservacionista, ya que permite un mayor aprovechamiento de las precipitaciones y conservación del suelo, ha mostrado ser insuficiente para controlar el escurrimiento bajo condiciones de precipitaciones intensas o continuas, las cuales se presentan en la región con cierta frecuencia, aún en combinación con rotaciones de cultivos. Un ejemplo de ello es la cuenca de Rafael García - Lozada, incluida en dicha unidad geomorfológica, la cual se ve periódicamente afectada por inundaciones a partir de escurrimientos generados aguas arriba de la cuenca.

El Grupo de Gestión Ambiental de Suelo y Agua de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) viene trabajando en un proyecto de investigación que lleva registros de esta problemática hidrológica desde el año 1991. Las áreas estudiadas (microcuencas) están incluidas en una subcuenca de 876 ha, se consideran representativas de unas 20000 ha afectadas por erosión hídrica ubicadas dentro la Pampa Loésica Alta (Zamora &

Jarsun, 1985). A su vez, están incluidas en la parte alta de la cuenca Rafael García - Lozada.

Este estudio se desarrolló bajo la hipótesis que la sistematización del suelo con terrazas paralelas de desagüe combinada con rotación de cultivos disminuye los volúmenes de agua escurridos que generan inundaciones, además de permitir producciones más estables y elevadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dentro de la Pampa Loésica Alta o Plataforma Basculada (Moscatelli, 1990), en una cuenca de 870 ha ubicada a 25 km al sur de la ciudad de Córdoba (31° 29' S, 64° 13' O), se encuentran ubicadas dos microcuencas (una sistematizada -SIST- y otra sin sistematizar -NOSIST) donde se realizó el estudio, tal como se observa en la Figura 1. La Plataforma se extiende desde los 31° a los 33° 20' de Latitud Sur y desde los 63° 30' a los 64° 45' de Longitud Oeste (Agencia Córdoba Ambiente - INTA, 2006) (Figura 1). De oeste a este, las pendientes varían del 3% al 0,5%, la altura sobre el nivel del mar es de 600 a 200 m y el relieve es ondulado a plano.

La cuenca en estudio tiene la problemática regional del ambiente geomorfológico al cual pertenece. Entre ellos se puede mencionar al uso de la tierra donde predomina la actividad agrícola, es casi inexistente la ganadería y solo existe un 3% de bosque nativo. Por otra parte, en la cuenca el principal cultivo es soja, también se realiza maíz, sorgo, trigo y otros cultivos como poroto y maní. En relación a las labranzas casi no existe el uso de labranza convencional mientras que se ve consolidado el uso de la siembra directa (Clemente, 2012). Los síntomas de erosión hídrica son claros y avanzan a pesar de la utilización de sistemas conservacionistas de labranza y cultivos.

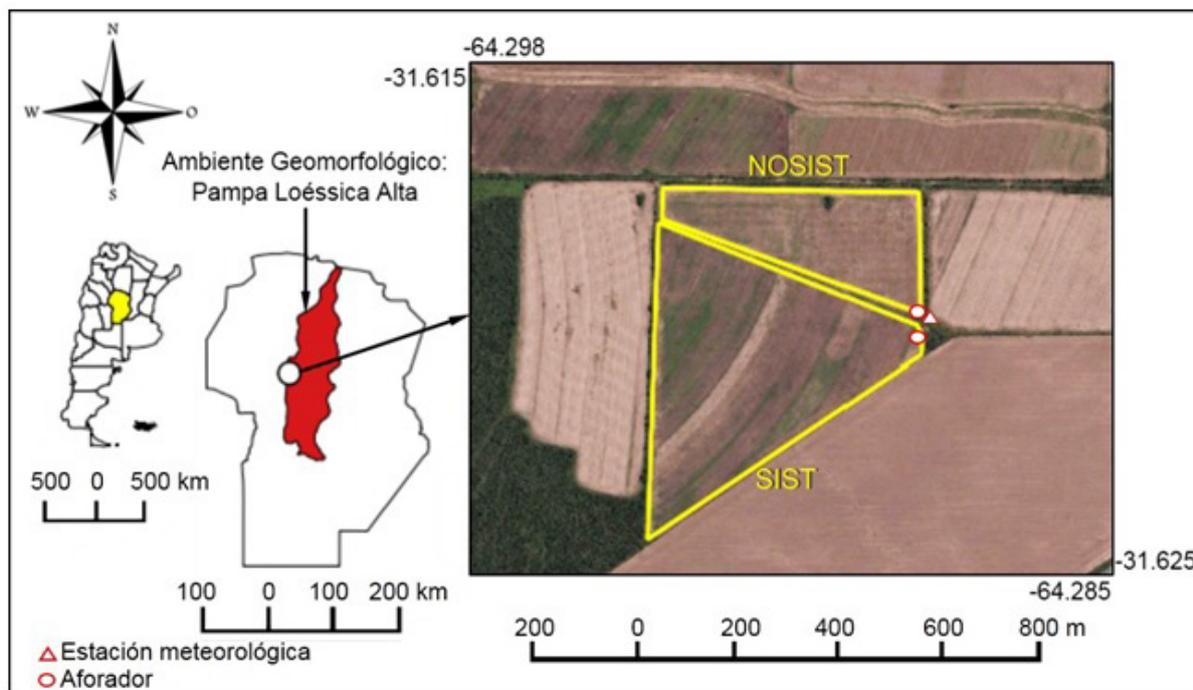


Figura 1. Ubicación de las microcuencas estudiadas, provincia de Córdoba, Argentina.

Figure 1. Location of the studied micro-watersheds in the province of Córdoba, Argentina.

De acuerdo a la caracterización climática regional se trata de un clima templado húmedo con variaciones en cuanto a la distribución de las precipitaciones con un marcado régimen monzónico, caracterizado por la irregularidad de las precipitaciones. El período lluvioso se extiende desde octubre a marzo (580 mm), el cual representa el 75 % de las precipitaciones anuales. Asimismo, la intensidad de las precipitaciones estivales provoca excesos hídricos de diversas magnitudes dependiendo del estado del suelo y la humedad antecedente. La evapotranspiración supera los 850 mm anuales, mientras que las precipitaciones anuales alcanzan los 779 mm, lo que determina la existencia de períodos con deficiencia de agua edáfica. Las heladas ocurren entre los meses de mayo y septiembre. Los vientos presentan las velocidades más elevadas en los meses de primavera, especialmente en octubre y noviembre, siendo las direcciones predominantes noreste y sur.

Descripción de las microcuencas de estudio

Dentro de la cuenca de 870 ha se seleccionaron dos microcuencas contiguas. Ellas se caracterizaron mediante un relevamiento topográfico y se ajustó con un modelo de elevación digital (Figura 2). Ambas microcuencas tienen una pendiente promedio de 1,2% en sentido oeste-este, y están delimitadas mediante bordos. Las microcuencas analizadas son:

- NOSIST: microcuenca de 9,3 ha, no sistematizada. Fue manejada con labranza convencional hasta el año 2005 y, a partir de allí, con siembra directa. Por su topografía y la delimitación con bordos para aislarla del ingreso de agua de otras áreas, se generó un bajo que funciona como embalse.
- SIST: microcuenca de 18,4 ha, sistematizada con terrazas paralelas de desagüe, lo que se define como una práctica ingenieril de conservación de suelo y agua. Esta cuenca se encuentra sistematizada desde el año 1987, con 11 terrazas paralelas de desagüe, que

consiste en bordos de base ancha (10 m) y de una altura de 0,50 m, se copiaron en forma paralela a un intervalo regular (49 m) con una pendiente planificada para desagüe de 0,3% aproximadamente. Se manejó bajo SD desde el año 1995. El problema de inundaciones y sequías

En este trabajo se muestran los datos hidrológicos y de cultivo obtenidos durante

el período agosto de 2013 a julio de 2015. La precipitación se registró en un pluviógrafo con sensibilidad de registro de 0,1 mm, ubicado en la microcuenca NOSIST (Figura2). El monitoreo de escorrentía superficial se llevó a cabo con medidores de altura de escorrentía ubicados en los afloradores de cada una de las microcuencas. Poseen un sensor de ultrasonido que registra la altura

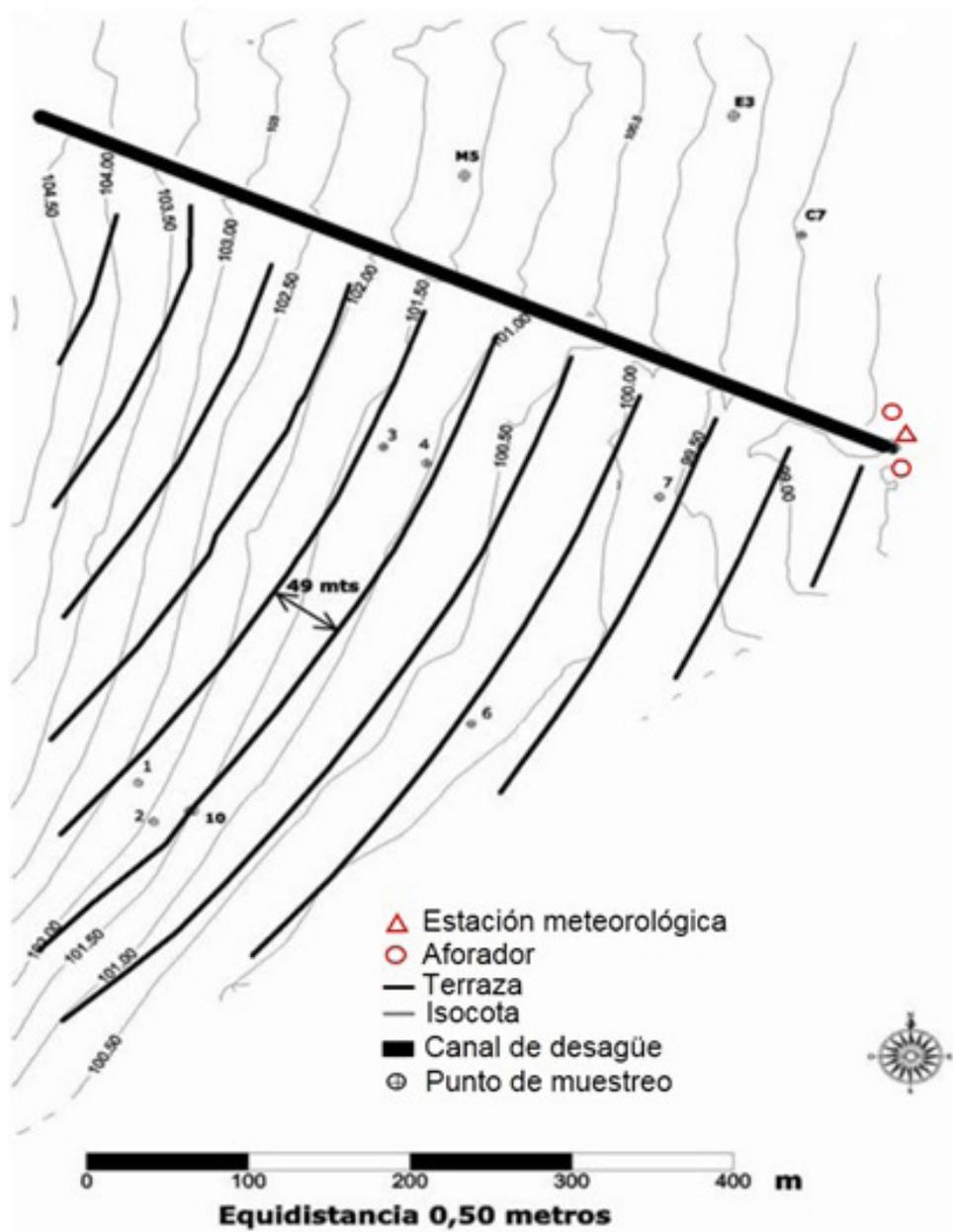


Figura 2. Mapa topográfico de las microcuencas donde se muestran las terrazas paralelas de desagüe en SIST.

Figure 2. Topographic map of the micro-watersheds showing SIST parallel drainage terraces.

del agua que pasa a través de las estructuras aforadoras del tipo aforador sin cuello (*cutthroatflume*) y cuya ecuación teórica (Bertoni, 1994) es empleada para transformar los niveles en caudales. Se caracterizó hidrológicamente ambas cuencas mediante la estimación del tiempo de concentración (Kerby, 1959), que considera longitud y pendiente del escurrimiento en flujo laminar y concentrado. Con fines comparativos ante eventos lluvia-escorrentía, se determinó a través del análisis de los hidrogramas de salida, la lámina de agua escurrida, el caudal máximo, el tiempo al pico, la duración del escurrimiento y el coeficiente de escorrentía. Este último parámetro fue calculado como la relación entre lámina escurrida sobre lámina precipitada, el cual puede ser expresado como porcentaje. La condición de suelo y cultivo previo a cada evento se determinó a través de la humedad antecedente hasta a 1 m de profundidad y la fenología del cultivo.

En el período mencionado, el agua del suelo se determinó en 17 eventos, hasta 2,80 m de profundidad, con un intervalo de 20 cm. La rotación de cultivos evaluada consistió en soja -centeno (como cultivo de cobertura) (2013-2014)-maíz (2014-2015). Se midió la biomasa total a cosecha de cada cultivo y al momento de secado del cultivo de cobertura. Para dichas determinaciones, se tomaron dos repeticiones de 1 m² cada una por sitio de muestreo, las cuales fueron secadas a estufa hasta peso constante.

Análisis estadístico

En primera instancia, se realizó un análisis descriptivo de las variables cuantitativas de agua del suelo y producción de cultivos. Posteriormente, dichas variables se analizaron a través de un análisis de la varianza (ANOVA). Finalmente, para aquellas variables donde la hipótesis nula del análisis de la varianza fue rechazada se realizó "a posteriori" la prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) para comparación de medias (Di Rienzo *et al.*, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitaciones y escurrimiento

En la Tabla 1 se muestran los registros pluviométricos desde agosto de 2013 a julio de 2015 y los datos de precipitaciones medias registradas durante 13 años en las microcuencas (período 1992 - 2005).

Cuando se consideran las precipitaciones durante el cultivo de verano (diciembre a abril inclusive) se puede ver que el primer año (soja) fue de 465 mm mientras que en el segundo año (maíz) alcanzó los 623 mm. Este último valor es superior a los 579 mm registrados como promedio en 13 años durante el período estival. En esta campaña, a su vez, la mayoría de los meses superaron al valor promedio (1992-2005). Mientras tanto, la precipitación anual (agosto-julio)

	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	Total
PP (2013-2014)	1	4	26	88	90	44	184	64	83	4	0	2	590
PP (2014-2015)	1	28	71	89	110	153	189	103	68	0	0	0	812
PP medias (1992-2005)	16	43	67	148	190	137	103	100	49	18	10	5	886

Tabla 1. Precipitaciones mensuales (PP) (mm) para los meses correspondientes al período de registro (agosto de 2013 a julio de 2015) y las precipitaciones medias registradas en las microcuencas (período 1992-2005).

Table 1. Monthly rainfall (PP) (mm) (August 2013 - July 2015) and average rainfall in the watersheds (1992-2005)

fue de 590 mm para 2013-2014 y 812 mm en 2014-2015. Esta última campaña obtuvo valores cercanos al promedio anual, el cual alcanza los 886 mm. Bertoni *et al.* (2004) y Mercau *et al.* (2016) indicaron la alta variación interanual de las precipitaciones en Argentina, lo que se pudo comprobar en la amplia diferencia de precipitaciones entre los ciclos analizados, la cual alcanzó el 28 %. Según dichos autores estas condiciones favorecen procesos de inundaciones y sequías.

En el período analizado se registraron dos eventos lluvia-escorrentía, los cuales se describen en la Tabla 2. El primero ocurrido el 10 de enero del 2015, está compuesto de

dos precipitaciones sucesivas (Figura 3). La primera de menor intensidad, con 21 mm de lámina total, y la segunda más intensa con 30,4 mm de agua precipitada. Fue esta segunda precipitación la que generó escorrentía en ambas cuencas indicado por el hidrograma de salida. Ello se explica debido no solo a su mayor intensidad sino al hecho que encontró el suelo saturado en los primeros centímetros ocasionado por la lluvia previa.

El segundo evento del 15 de febrero del 2015 se originó a partir de una lluvia que duplicó la anterior (Tabla 2). La humedad antecedente era similar entre microcuencas y con menor lámina precipitada en los cinco días previos.

Fecha	Pp 5 mm	PP mm	microcuencas	HAnt mm	Fenol
10/1	33,8	51,4	NOSIST	298	V1
			SIST	266	V1
15/2	24	98	NOSIST	287	V8-V9
			SIST	275	V8-V9

Nota: (V): estadio vegetativo del maíz; primera (V1), octava (V8) y novena hoja (V9)

Tabla 2.Detalle de la precipitación del 10 de enero y 15 de febrero del 2015. Precipitación 5 días antes (Pp5); Precipitación en milímetros (PP);Humedad antecedente en milímetros(HAnt); Fenología del cultivo de maíz(Fenol).

Table 2. Detailed precipitation on January 10thand February 15th, 2015. Precipitation 5 days before(Pp5); Precipitation in millimeters(PP); Humidity antecedents in millimeters(HAnt); Corn crop phenology (Fenol).

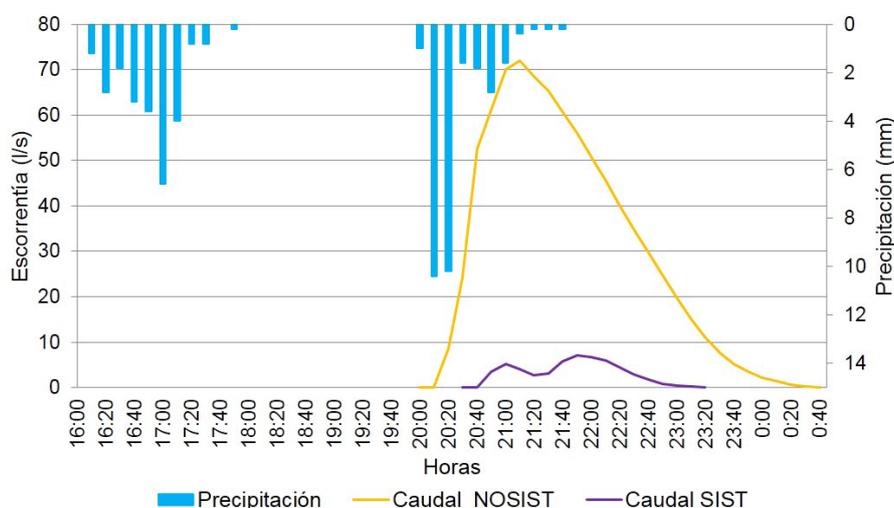


Figura 3. Hietograma e hidrograma de salida en las dos microcuencas, para el evento del 10 de enero de 2015.

Figure 3. Rain graphic and outflow hydrograph in the two micro-watersheds for the event on January 10th, 2015

NOSIST tuvo una escorrentía que se caracterizó por presentar un hidrograma de salida (Figura 3) con un alto valor de caudal máximo y lámina total escurrida (Tabla 3). El 10 de enero el suelo se encontraba con alta humedad antecedente (Tabla 2), cercana a capacidad de campo, cuyo valor es 301 mm hasta 1 m de profundidad. Esmoriz & Sereno (2010) para tormentas intermedias (de hasta 50 mm de precipitación), ocurridas en esta microcuenca, determinaron que la humedad antecedente del suelo y las lluvias previas fueron los parámetros más significativos en la predicción de los niveles de escurrimiento. En concordancia con esto, Cerdanet al. (2001) señalaron que en tormentas de intensidad media a baja, la humedad antecedente es uno de los

factores más importantes en el control de la escorrentía, relacionado con la reducción de la capacidad de infiltración del suelo. Ello se debe tener en especial consideración ya que son este tipo de tormentas las que se dan con mayor frecuencia en climas semiáridos (Castillo et al., 2003), y coincidentemente originaron con mayor frecuencia escorrentía en la microcuenca (Esmoriz & Sereno, 2011).

Con respecto al valor de caudal máximo observado se debe tener en cuenta que la duración de la precipitación superó el tiempo de concentración de la cuenca, permitiendo que toda la superficie aportara agua a la salida (Tabla 3). Por otro lado, el valor de coeficiente de escorrentía indica que el 52% de la lluvia total se perdió por escorrentía.

Fecha		Esc mm	D Esc h	TC h	TP h	Qmax l/s	CE
10/1	NOSIST	26,96	4,17	0,62	0,88	71,88	0,52
	SIST	0,87	2,42	0,78	1,13	7,15	0,02
15/2	NOSIST	25,20	7,50	0,62	0,97	62,00	0,27
	SIST	1,54	3,50	0,78	1,15	8,50	0,09

Tabla 3: Detalle del escurrimiento de cada microcuenca. Escurrimiento en milímetros (Esc); Duración del escurrimiento en horas (D Esc); Tiempo de concentración (TC); Tiempo al pico en horas (TP); Caudal máximo escurrido (Qmax); Coeficiente de escorrentía (CE).

Table 3: Details of each micro-watershed runoff. Runoff in millimeters (Esc); Duration of runoff in hours (D Esc); Concentration time (TC); Time to peak hours (TP); Maximum drained flow (Qmax); Runoff coefficient (EC).

Por último, se observa en la Tabla 3 que la duración del escurrimiento es elevado para el tamaño de NOSIST (9,3 ha), con una muy extensa duración de la curva de descenso del hidrograma (Figura 3), que no se condice con los parámetros físicos de la microcuenca. Ello es causado por la formación de un embalse temporario en las inmediaciones del lugar de aforo, que regula el volumen de salida del agua en el tiempo (Esmoriz et al., 2004).

La cuenca SIST, por el contrario, registró valores significativamente menores, tanto en el caudal máximo como en la lámina total escurrida con diferencias del orden de un dígito con respecto a la cuenca NOSIST, a pesar de duplicarla en superficie (18,4 ha).

Esta tendencia también se observa en el valor de coeficiente de escorrentía, que indica que solo el 2% del agua precipitada se perdió por escurrimiento. La duración de la escorrentía fue también menor en concordancia con el escaso valor de lámina total. La notoria diferencia en el comportamiento hidrológico entre ambas microcuencas podría deberse en parte a menor valor de humedad antecedente que presentaba el suelo de SIST con respecto a la NOSIST. Pero fundamentalmente en el cambio en la dinámica de la escorrentía que genera la presencia de las terrazas. Es decir, el agua de escorrentía transita en máxima pendiente (1,2%) solo en la distancia del espaciamiento que existe entre terrazas (49 m), luego a lo largo de los canales de desagüe

de aquellas con una pendiente promedio de diseño muy inferior (entre 0,20 y 0,30 %). Ello produce un aumento de la distancia a recorrer hasta la salida de la microcuenca una disminución de la velocidad de escurrimiento y por ende, una mayor oportunidad de infiltración del agua en el suelo (Beasley *et al.*, 1984). Este aspecto se refleja también en otros parámetros hidrológicos como son el tiempo de concentración y el tiempo al pico, con valores superiores a la cuenca NOSIST (Tabla 3).

La Tabla 3 muestra que el segundo evento mantuvo la tendencia en cuanto a la diferencia en los valores de los parámetros hidrológicos entre microcuencas: caudal máximo, tiempo al pico, escorrentía y coeficiente de escorrentía. En NOSIST, estos dos últimos parámetros presentaron valores menores que en el evento anterior, pero igualmente fueron importantes. Esto se contrapone con la mayor precipitación registrada en este evento. La menor humedad antecedente del suelo, la presencia de una mayor rugosidad y cobertura debido al estado fenológico del cultivo de maíz (V8-V9) incrementan el tiempo de tránsito y favorecen la infiltración lo cual explica en parte este comportamiento. Estas condiciones pueden ser responsables en alguna medida, del aumento del tiempo de duración de la escorrentía con respecto al primer evento. En SIST se observa también un incremento en la duración de la escorrentía, pero no tan marcada. La humedad antecedente fue un poco mayor que en el evento anterior, lo que pudo haber influenciado en la ocurrencia de un mayor escurrimiento para esta fecha, junto con la precipitación. Aun así, los valores fueron muy inferiores al que registrara NOSIST.

En función de lo observado en el comportamiento hidrológico de las microcuencas en estos dos eventos se puede afirmar que la cuenca NOSIST presentó escurrimientos importantes con pérdidas significativas de agua reflejado en los valores de coeficiente de escorrentía. Además, tuvo condiciones de humedad de suelo superiores a SIST que favorecieron posiblemente este comportamiento. Cabe destacar que ello ocurrió a pesar de estar NOSIST con un sistema de manejo (SD) y rotación

de cultivo (soja/maíz 1-1) que permite mantener una buena cobertura y rugosidad a lo largo del año, características ambas que favorecen la infiltración. La característica de los escurrimientos observados en SIST permite afirmar que las terrazas favorecieron la captación de agua disminuyendo considerablemente los volúmenes de escorrentía. Se pone así en evidencia la eficiencia de esta práctica ingenieril en la regulación del ciclo hidrológico de las cuencas rurales y su efecto en la prevención de las inundaciones.

Precipitaciones y agua del suelo

En la Figura 4 se graficaron las precipitaciones ocurridas entre fechas de medición de agua del suelo y el almacenaje de agua hasta los 2,80 m, en cada microcuenca, durante el período analizado.

Se observa que el almacenaje de agua en SIST fue menor a lo largo de todo el período. Esto es una condición favorable para reducir los escurrimientos debido a la mayor cantidad de poros libres de agua los que pueden retener las precipitaciones. Cuando se evaluaron los sistemas bajo monocultivo de soja, la microcuenca mencionada lograba aumentar los valores de agua del suelo en los períodos de recarga donde las lluvias de otoño y comienzo de primavera eran abundantes, llegando a superar los valores de NOSIST (Vettorello, 2008). De esta manera, SIST comenzaba el ciclo estival con el perfil más húmedo. Es por ello que una de las prácticas sugeridas para utilizar el agua del suelo es la intensificación del uso agrícola. Bajo este planteo, las rotaciones que incluyen cultivo de cobertura, se muestran como una opción viable.

Las condiciones de precipitaciones determinaron los valores promedio de agua del suelo que se muestran en la Tabla 4, por microcuenca durante la rotación de cultivos evaluada.

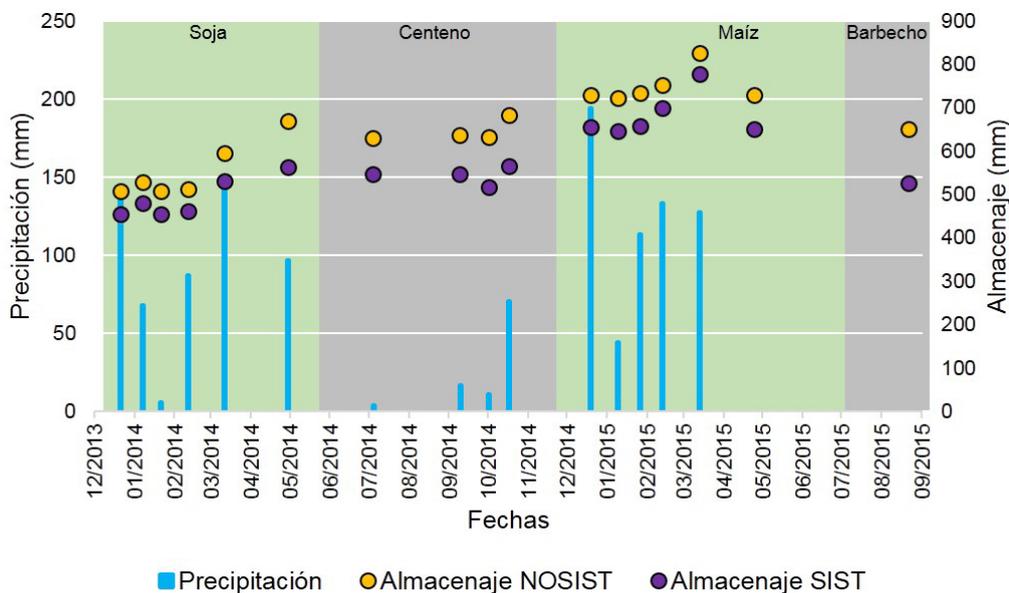


Figura 4. Precipitaciones (mm) y agua del suelo (mm) en NOSIST y SIST en las fechas de medición.

Figure 4. Rainfall (mm) and soil water (mm) in NOSIST and SIST on measurement dates

Cultivo	NOSIST			SIST		
	Promedio mm	DE mm	CV %	Promedio mm	DE mm	CV %
Soja	549,1 a*	74,2	13,5	491,6 b	50,6	10,3
Centeno	671,6 a	41,0	6,1	544,5 b	24,1	4,4
Maiz	748,9 a	53,6	7,2	683,9 b	63,6	9,3

* Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 4: Promedio de agua del suelo hasta los 2,80 m de profundidad, desvío estándar (DE) y coeficiente de variación (CV), por microcuenca y cultivo.

Table 4: Average soil water up to 2,80 m depth, standard deviation (DE) and variation coefficient (CV) for each micro-watershed and crop

Se observa en la Tabla 4 que hubo diferencias significativas entre las microcuencas en relación al agua del suelo, manteniendo valores menores durante todo el período en SIST, aspecto ya mencionado. Una de las causas de dicho comportamiento es el mayor rendimiento de los cultivos, aspecto que se analiza al final del trabajo. La tendencia fue similar en estudios anteriores bajo monocultivo de soja. Es decir, en SIST se manifestó mayor consumo de agua que en NOSIST (Vettorello, 2008). Qiet al. (2011) en ensayos comparando diferentes intensidades

de uso del suelo (pasturas, cultivos de cobertura y cultivos de verano) obtuvieron que los usos más intensivos tienen menor valor de agua almacenada. Por su parte, Zhang et al. (2016) en suelos similares del Plateau en China, encontraron mayores variaciones del agua a nivel superficial (50 cm) en cultivos estivales, mientras que en vegetación natural hubo menor contenido hídrico hasta los 3 m de profundidad.

En la Figura 5 se indican los perfiles de agua de cada cultivo de la rotación (soja

-a- , cultivo de cobertura-b- y maíz -c-) al momento de siembra y cosecha (o secado en el caso del cultivo de cobertura), para cada microcuenca. Se observa que el contenido hídrico es menor en todo el perfil en SIST para el mismo cultivo. Esto confirma la mayor capacidad potencial de almacenar agua en este sistema, graficada como el alejamiento de las curvas de medición (siembra y cosecha) respecto de la curva de capacidad de campo.

Por otra parte, se puede ver que en la campaña de soja los valores iniciales estaban cercanos al punto de marchitez permanente debido a las escasas precipitaciones registradas en período 2012-2013 (292 mm entre diciembre y abril y 534 mm anuales). Estos valores se modificaron significativamente acercándose a capacidad de campo al finalizar el cultivo de maíz en el período 2014-2015. Cabe recordar que los valores de lluvias en dicha campaña fueron elevados, justificando este comportamiento.

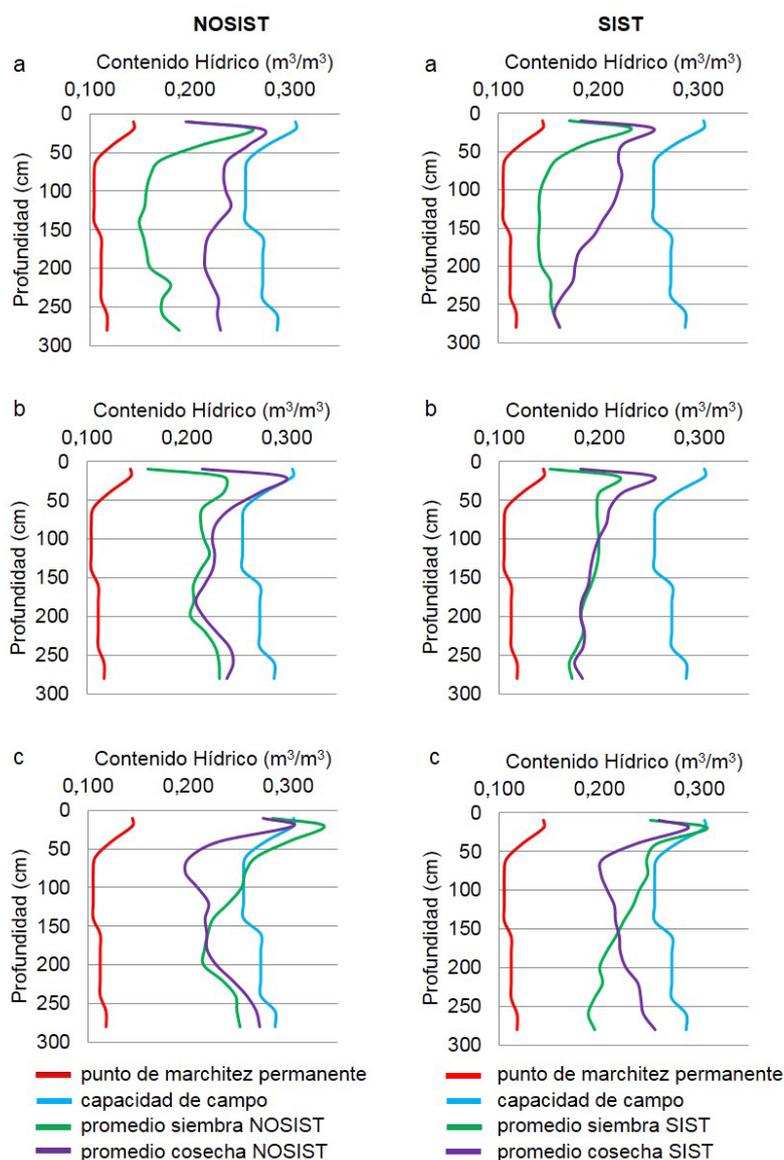


Figura 5. Distribución del contenido hídrico en el perfil de suelo para NOSIST y SIST. a) soja b) centeno c) maíz.

Figure 5. Water content distribution on the soil profile for NOSIST and SIST. a) soybean b) rye c) corn.

Al analizar el movimiento de agua en profundidad entre siembra y cosecha se observa que la primera campaña (Figura 5 a) NOSIST recargó agua en todo el perfil, mientras que SIST mantuvo valores bajos en profundidad (a partir de 2 m). En el cultivo de cobertura (Figura 5 b) los movimientos son mínimos dadas las escasas precipitaciones en otoño-invierno debido al régimen monzónico. Sin embargo, los valores en SIST siguen siendo menores, es decir, más alejados de capacidad de campo. Finalmente, durante el cultivo de maíz (Figura 5 c), SIST logra recargar el contenido hídrico en profundidad (a partir de 1,5 m), dejando el suelo más seco a nivel superficial.

Se comprueba así que SIST logra un menor contenido hídrico del suelo. Esto puede favorecer el almacenaje de agua de lluvia en los períodos siguientes, reduciendo el riesgo de excesos hídricos que generan inundaciones, en caso de estar en un ciclo húmedo en zonas semiáridas.

Parámetros productivos

La menor condición hídrica o almacenaje en SIST se debió a la mayor producción de cultivos de la rotación, tal como se mencionó anteriormente. En la Tabla 5 se muestran los parámetros productivos. Se puede ver que hubo diferencias estadísticamente significativas entre la producción de biomasa en las microcuencas en la rotación evaluada.

Variable	NOSIST		SIST		
	Promedio g/m ²	CV %	Promedio g/m ²	CV %	
Soja	Biomasa total	283,9 a*	37,7	652,3 b	13,1
	Rendimiento	179,3 a	31,2	405,2 b	15,1
Maíz	Biomasa total	2467 a	18,7	3234,4 b	17,2
	Rendimiento	923,7 a	18,9	1203,6 b	16,9
Centeno	Biomasa a secado	203,7 a	79,1	338,2 b	27,7

*Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para el mismo cultivo.

Tabla 5. Promedio y coeficiente de variación del rendimiento en grano y biomasa total de los cultivos de soja y maíz y biomasa a secado del centeno, en NOSIST y SIST, en el ciclo 2013-2015.

Table 5. Variation average and coefficient for grain yield. Total biomass of soybean and corn as well as rye drying biomass in NOSIST and SIST during the 2013-2015 cycle

Si bien el primer año marcó bajos niveles de lluvias durante el cultivo de soja, este fue cercano a los 500 mm de requerimientos de agua. Es decir, con las precipitaciones ocurridas durante el período de cultivo (465 mm) y el contenido de agua inicial (Tabla 4), se lograron rendimientos elevados en SIST (4050 kg.ha⁻¹), en comparación con los 3200 kg.ha⁻¹ tomado como media departamental (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2015). Entretanto, la biomasa del cultivo de maíz superó en un 24% a NOSIST, mientras que el rendimiento fue 21% mayor. Asimismo, el rendimiento obtenido fue superior al promedio departamental el

cual, para la misma campaña, alcanzó los 7800 kg.ha⁻¹. Para el cultivo de cobertura, la diferencia entre microcuencas fue del 40 % aproximadamente. Por otra parte y tal como se ha obtenido en otros estudios, el coeficiente de variación de los parámetros productivos es menor en SIST, lo que indica mayor homogeneidad en la producción (Vettorello, 2008).

La mayor producción de biomasa total en SIST provocó el menor contenido de agua almacenada indicado en este estudio durante el período analizado. A su vez, es de especial importancia cuando se habla de la biomasa, la cantidad que es devuelta al

suelo tanto como fuente de materia orgánica donde en ambientes semiáridos es difícil su acumulación, como así también en la generación de rugosidad a partir del rastrojo, lo que retrasa el escurrimiento. En estudios anteriores de nuestro grupo de investigación se encontró que bajo monocultivo de soja y labranza convencional, la diferencia de producción entre las microcuencas osciló entre 5 y 60% de acuerdo a las precipitaciones ocurridas durante la campaña de cultivo y el agua del suelo. Así, en años húmedos se manifestaron las menores diferencias, mientras que en los años secos donde, a su vez, el perfil se encontraba con escaso contenido de agua, se manifestaron las mayores diferencias (Vettorello, 2008). En dichos estudios también se mostró que hay diferencias significativas en características hidrológicas (Esmoriz *et al.* 2000) y de cultivo (Vettorello *et al.*, 2012), las cuales se mantuvieron aun cuando se unificó el sistema de labranza a siembra directa.

Es decir, el uso agrícola intensivo en el ambiente estudiado, favoreció mayores rendimientos en SIST dado por un mejor uso del agua del suelo provocado por las terrazas. Esto provocó una reducción del agua almacenada, favoreciendo el espacio poroso libre para acumular las precipitaciones de la campaña siguiente. En ciclos húmedos, esto disminuye los excedentes hídricos. En ciclos secos, se recomienda evitar el consumo por parte de cultivo de cobertura ya que dificulta la recarga del perfil.

CONCLUSIONES

La microcuenca no sistematizada tuvo importantes pérdidas de agua por escorrentía con valores de 52 y 27 % con respecto a la precipitación registrada en los dos eventos, a pesar de estar con siembra directa, rotación con gramíneas y cultivo de cobertura

La microcuenca sistematizada tuvo pérdidas de escorrentía significativamente menores, 2 y 9 % respectivamente, para los dos eventos analizados. Ello se debió a la disminución de la velocidad de escorrentía que permitió una mayor infiltración del agua precipitada. Esto

se evidencia por la diferencia en los valores de duración de la escorrentía y caudal máximo registrados en los eventos.

En relación al agua del suelo, la sistematización con terrazas de desagüe combinada con rotación que incluye cultivo de cobertura, logró un menor contenido hídrico del suelo. Esto favorece el almacenaje de agua en los períodos siguientes, lo que reduce el riesgo de exceso hídrico, sobre todo ante eventos de elevada intensidad de lluvia. El uso agrícola intensivo permitió alcanzar rendimientos para soja, maíz y centeno del 55, 24 y 38 % mayores en el lote sistematizado, debido a un mejor uso del agua del suelo.

La mayor frecuencia de eventos extremos producidos por el cambio climático, afectan el volumen de escurrimiento. Por lo tanto, para zonas semiáridas, la sistematización del suelo disminuye los efectos de las tormentas intensas. Asimismo, mejora su eficiencia al ser combinada con una rotación de cultivos adecuada a la disponibilidad hídrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril EG, Sacchi GA & Rocca RJ. 2015. Prácticas Agrícolas y Obras Civiles en Procesos de Desertización y Degradación del Suelo en el Piedemonte de la Sierra de Córdoba (Argentina). <http://www.desertificacion.gob.ar/wp-content/uploads/2015/07/Trabajo-pedemonteAbril-Sacchi-Rocca.pdf>
- Agencia Córdoba Ambiente – INTA. 2006. *Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos*. Córdoba: 541 p
- Aizen MA, Garibaldi LA & Dondo M. 2009. Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología Austral*, 19(1):45- 54
- Barbeito OL, Rydzewski AL, Muracciole F, Raptópulos N & Siskindovich JV. 2015. Análisis de riesgo de erosión e inundación en la cuenca media del río Guanusacate, Córdoba, Argentina. http://www.pirna.com.ar/files/pirna/SICSYRD_POS_BARBEITO_Osvaldo_2.pdf
- Beasley RP, Gregory JM & McCarty TR. 1984. *Erosion and Sediment Pollution Control*. Iowa State University Press (Second Edition), Ames, Iowa: 354 p
- Bertoni JC, Ambrosino S, Barbeito O, Daniele A, Maza JA, Paoli CU & Serra JJ. 2004. *Inundaciones urbanas en Argentina*. Editorial Universitas, 1 ed, Córdoba, Argentina: 254 p
- Bertoni JC. 1994. Modelación matemática de procesos hidrosedimentológicos en cuencas rurales. *Actas XV Congreso Nacional del Agua*. La Plata, Argentina. pgs.491-. 502
- Cabido D, Cabido M, Garré SM, Gorgas JA, Miatello R, Rambaldi S, Ravelo A & Tassile JL. 2003. *Regiones Naturales de la Provincia de Córdoba*. Serie C. Publicaciones Técnicas. Edic. Agencia Córdoba Ambiente, D.A.C.y T. Córdoba. Argentina: 47-50
- Castillo VM, Gomez-Plaza A & Martinez-Mena M. 2003. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. *Journal of Hydrology*, 284(1):114-130
- Cerdan O, Souchere V, Lecomte V, Courtier A & Le Bissonnais Y. 2001. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-bases runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena*, 46: 189-205
- Chow T, Rees H & Daigle J. 1999. Effectiveness of terraces/grassed waterway systems for soil and water conservation: A field evaluation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54(3):577-583
- Cisneros J, Degioanni A, Diez A, Bergesio A, Cantero A, González J, Canale A & Montesano A. 2012. Inundación, anegamiento y erosión de tierras en sureste de Córdoba. Ciclo octubre 2012- junio 2013.

Informe técnico de coyuntura. http://www.produccion-animal.com.ar/inundacion/79-sureste_cordoba.pdf.

- Clemente JP. 2012. Diagnóstico y propuesta de solución para la cuenca hidrográfica Rafael García-Lozada. <http://hdl.handle.net/11086/1748>
- Crusta L & Angeleri H. 2002. Una solución diferente para las inundaciones: que el agua se quede donde cae. http://www.produccion-animal.com.ar/inundacion/08-agua_quede_donde_cae.pdf
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M & Robledo CW. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Esmoriz G, Ruiz Posse E, Croce A, Luque R & Bertoni J. 2000. Comportamiento hidrológico de dos cuencas agrícolas en la Región Central de Córdoba, Argentina. *11th International Soil Conservation Organization Conference (ISCO 2000)*. Buenos Aires, Argentina
- Esmoriz GF & Sereno R. 2010. Caracterización la escorrentía superficial en una microcuenca rural de la región central de Córdoba. *XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario, Argentina: 232.
- Esmoriz GF & Sereno R. 2011. Factores determinantes en generación de la escorrentía en una microcuenca agrícola de la región central de Córdoba. *XXII Congreso Nacional del Agua*. Resistencia, Argentina: 624.
- Esmoriz GF, Ateca MR, Ruiz Posse E & Sereno R. 2004. Determinación de áreas homogéneas en una cuenca agrícola para su utilización en un modelo hidrológico distribuido. *XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina*: 327.
- Goddard L, Mason SJ, Zebiak SE, Ropelewski CF, Basher R & Cane MA. 2001. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. *International Journal of Climatology*, 21: 1111–1152
- Gorgas JA & Tassile JL. 2002. *Regiones naturales de la provincia de Córdoba. Serie C. Publicaciones Técnicas*. Gorgas JA & Tassile JL (ed). Córdoba. Argentina: 97 p
- Jobbágy EG. 2010. Proyectando El Futuro. En: Viglizzo EF & Jobbágy E (ed) *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y Su Impacto Ecológico-Ambiental*. INTA. Buenos Aires. Argentina: 71-78
- Kerby WS. 1959. Time of concentration for overland flow. *Civil Engineering*, 29(3): 60
- Mercau JL, Noretto MD, Bert F, Giménez R & Jobbágy EG. 2016. Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management*, 163: 159-168
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (Argentina). 2015. Datos provistos por la Dirección de Información Agropecuaria y Forestal,

Subsecretaría de Agricultura. http://www.siiia.gov.ar/_apps/siia/estimaciones/estima2.php

- Miranda JM, Molina Ordoñez LI & Rodríguez JB. 2014. Agua del suelo en sistemas con cultivo de cobertura en Córdoba, Argentina. *Libro de actas XXII Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM*. Valparaíso. Chile: 75.
- Moscatelli GM. 1990. *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Tomo 1. Editorial INTA, Buenos Aires. Argentina: 393-511
- Núñez Vázquez F, Salas P, Lovera E, Bachmeier O, Rollán A & Robledo W. 1996. Labranzas en la región central de la Provincia de Córdoba. En: Buschiazzo D, Panigatti JL & Babinec FJ (ed) *Labranzas en la región Semiárida Argentina*. INTA, La Pampa, Argentina: 49-66
- Qi Z, Helmers MJ & Kaleita AL. 2011. Soil water dynamics under various agricultural land covers on a subsurface drained field in north-central Iowa, USA. *Agricultural Water Management*, 98(4): 665-674
- Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P, Bojariu R, Easterling D, Klein Tank A, Parker D, Rahimzadeh F, Renwick JA, Rusticucci M, Soden B & Zhai P. 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. En: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M & Miller H L (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 996 p
- Vettorello CI, Esmoriz GF, Luque RL & Sereno R. 2012. Parámetros edáficos, hidrológicos y de cultivo en cuencas de la región semiárida de Córdoba, Argentina. Parte II: Comparación de sistemas de manejo del suelo. P 295-324 En: Marco da Silva A, Galindo G & Fernández Turiel JL (ed) *Aguas, suelo y vegetación en cuencas Iberoamericanas*. Gráfica Cervantes. España
- Vettorello CI. 2008. *Análisis comparativo de formas contrastantes de manejo del suelo. Su impacto ambiental*. Tesis de maestría de la Facultad de Ciencias Agropecuarias - U. N. de Córdoba. Córdoba, Argentina: 182 p
- Zamora EM & Jarsun B. 1985. *Mapa de erosión de la provincia de Córdoba. Plan mapa de suelos de la provincia de Córdoba*. Editorial INTA/ Secretaría Ministerio de Agricultura, Ganadería y Recursos Renovables, Dirección de Recursos Renovables. Córdoba, Argentina: 45 p
- Zhang YW, Deng L, Yan WM & Shangguan ZP. 2016. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 137: 52-60