

**ANÁLISIS ESTACIONAL DE LA EROSIDAD DE LAS PRECIPITACIONES Y LA POTENCIALIDAD DE PÉRDIDA DE SUELO EN LA LOCALIDAD DE AZUL (PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA)**

María Guadalupe Ares<sup>1,2</sup>; Marcelo Varni<sup>2</sup> e Ilda Entraigas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Becaria CONICET

<sup>2</sup>Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr Eduardo J. Usunoff”  
República de Italia 780, B7300, Azul, Buenos Aires, Argentina  
e\_mail: gares@faa.unicen.edu.ar

**RESUMEN**

La estimación de la erosividad de las precipitaciones a través del índice  $EI_{30}$  requiere contar con registros detallados de lluvia y su intensidad. Con el objetivo de hallar relaciones que faciliten su estimación se analizan las relaciones entre el factor  $EI_{30}$  y la pluviometría a escala diaria y estacional. Asimismo se estudian la variabilidad estacional de la erosividad y los períodos de potencialidad de ocurrencia de eventos erosivos por desprendimiento de suelo debido a la acción de la lluvia. Los modelos de regresión lineal simple ajustados entre  $EI_{30}$  y datos estacionales de pluviometría alcanzaron mejores ajustes que los que incluyeron datos diarios ( $r^2=0,83$  vs  $r^2=0,66$ ). Las regresiones obtenidas para las estaciones (otoño, invierno, primavera y verano) permitieron conocer la dinámica anual de la erosividad. Las precipitaciones más erosivas corresponden al otoño y la primavera, por lo tanto el riesgo potencial de pérdida de suelo por desprendimiento será mayor. Además, la cobertura del suelo es limitada en estos períodos: el manejo y la calidad de los rastrojos o los laboreos pueden favorecer la exposición del suelo a la lluvia. Los modelos ajustados a partir de datos locales permiten simplificar la estimación de la erosividad a partir de una variable sencilla de obtener como la pluviometría.

**Palabras clave:** erosividad, precipitación, estacionalidad.

**ABSTRACT**

Detailed records of rainfall and intensity are necessary for the estimation of rainfall erosivity through the  $EI_{30}$  index. In order to find relationships that facilitate its estimation, the relationships between rainfall and factor  $EI_{30}$  with daily and seasonal data are analyzed. Also, the seasonal variability of erosivity and periods of potential occurrence of soil detachment due to rain erosion are studied. The simple linear regression models with seasonal data showed better adjustments than with daily data ( $r^2=0.83$  vs  $r^2=0.66$ ). The regressions for each season (autumn, winter, spring and summer) allowed us to understand the dynamics of the annual erosivity. The most erosive rainfalls correspond to autumn and spring, hence the potential risk of soil loss by detachment will be greater. In addition, land cover is limited in these periods: the management and quality of the mulch, or tillage may promote the exposure of soil to rain. Adjusted models from local data allows to simplify the estimation of erosivity from an easily obtained variable such as rainfall.

**Keywords:** erosivity, rainfall, seasonality.

## INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación que afecta al área del sistema serrano de Tandilia, en la provincia de Buenos Aires, donde predomina el uso agrícola o agrícola ganadero del suelo (Irurtia et al., 1996). En la zona de la cuenca superior del arroyo del Azul, además de las características del paisaje, que es ondulado y presenta pendientes del 3 al 11 %, son dos los factores que han contribuido a la ocurrencia de dicho proceso de manera preponderante. El primero de ellos es la expansión e intensificación de la agricultura, que se ha visto favorecida por la adopción de tecnología moderna en cuanto a agroquímicos, equipos mecánicos y cultivos mejorados genéticamente (Casas, 2006; Marelli et al., 2006). De acuerdo con Sfeir et al. (2006), la incorporación de dicha tecnología condujo a reemplazar las actividades ganadera y triguera, tradicionales en esta zona, primeramente por el cultivo de híbridos de maíz y posteriormente, de variedades de soja. A su vez, la actividad agrícola se ha implementado de manera poco armónica con las características del paisaje, es decir que frecuentemente los laboreos no son referidos a las curvas de nivel, los residuos de cosecha son eliminados de la superficie a través del pastoreo directo o la reserva forrajera, y la planificación de las rotaciones y los sistemas de labranza suele ser escasa. Estos factores, en su conjunto, producen cambios negativos en las propiedades físicas de los suelos: la pérdida de cobertura disminuye los contenidos de materia orgánica y se alteran la porosidad, la capacidad de retención de agua y la estabilidad de los agregados (Sfeir et al., 2005). Dichos cambios modifican el comportamiento hidrológico de los suelos, lo que conduciría al aumento del escurrimiento con la consecuente erosión (FAO, 2005).

El segundo factor está dado por las precipitaciones que, en términos generales, han registrado un incremento en las últimas décadas en la llanura pampeana. La lluvia representa una de las principales limitantes del ambiente que condiciona el uso y manejo de las tierras agrícolas. Su efecto se manifiesta en la primera y más importante fase del proceso erosivo, la etapa de separación (Hudson, 1982). En ella, el impacto que ejercen las gotas de lluvia y la fuerza de corte del agua, genera la ruptura de agregados y el consecuente desprendimiento de las partículas del suelo (Lal, 2001; Angulo-Martínez y Beguería, 2009), efecto que puede ser atenuado si la superficie del suelo se encuentra protegida. La cobertura del suelo, producida por las plantas en crecimiento o por

sus residuos, ejerce esa acción de protección al interceptar y absorber la energía del impacto de la lluvia, lo que preserva su estructura y evita su degradación (FAO, 2000).

La capacidad que posee la lluvia de provocar el desprendimiento de las partículas de suelo se denomina erosividad. Su estimación puede ser realizada a través del factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978). El mismo es obtenido a través de la suma de los valores individuales del producto de la energía cinética de la lluvia (E) y la intensidad máxima en 30 minutos ( $I_{30}$ ) promediado para un período de tiempo mayor de 20 años (Renard y Freimund, 1994). Otro parámetro que puede ser empleado es el  $KE > 25$ , que considera la energía cinética total de la lluvia que cae a intensidades de más de  $25 \text{ mm.h}^{-1}$  (Hudson, 1982). Si bien ambos parámetros requieren gran cantidad de datos para su cálculo (Arnoldus, 1977), el más ampliamente difundido es el factor R. Para su estimación es necesario contar con información detallada de intensidad de lluvia de un período de tiempo mayor de 20 años (Wischmeier y Smith, 1978), la que en general es limitada en varias partes del mundo (Yu y Rosewell, 1996; Diodato, 2005). Es por esta razón que diversos autores han relacionado el factor R con otros parámetros de cálculo más sencillo. Por ejemplo, Arnoldus (1977) propuso el Índice Modificado de Fournier (IMF) que se obtiene a través de registros pluviométricos y presenta alta correlación con el factor R. Otros autores han planteado diferentes modelos que vinculan R o el índice  $EI_{30}$  con la precipitación diaria, mensual, estacional o anual (Renard y Freidmund, 1994; Yu y Rosewell, 1996; Diodato, 2005; Hoyos et al., 2005). Esto permite facilitar la estimación ya sea de R o del índice  $EI_{30}$ , a través de relaciones que reflejan las características conjuntas de las lluvias y su erosividad, y que son propias de cada sitio. Por lo tanto, esta información resulta fundamental en áreas de disponibilidad limitada de registros para realizar estimaciones de la pérdida de suelo ajustadas a las condiciones locales, como ocurre en gran parte de Argentina.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se plantean como objetivos del presente trabajo analizar la relación entre el factor  $EI_{30}$  y la pluviometría, a nivel diario y estacional, para la localidad de Azul, estudiar la variabilidad estacional de la erosividad y analizar los períodos de potencialidad de ocurrencia de eventos erosivos.

## METODOLOGÍA

### Cálculo del índice EI<sub>30</sub>

Para el cálculo de este índice se trabajó con fajas pluviográficas semanales de la estación Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) ubicada en el predio del Campus Universitario Azul de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (36° 46' 04" S; 59° 52' 46" O). Se utilizó la serie de datos correspondiente al período comprendido entre 1995 y 2007. En este análisis se adoptó la definición de tormenta individual establecida por Wischmeier (1959), que considera como una tormenta a aquella que se encuentra separada de otra por un período de 6 horas o más. Asimismo, de acuerdo con las propuestas de Wischmeier y Smith (1978), lluvias menores que 12,7 mm fueron omitidas de los cálculos del índice de erosión por considerárselas insignificantes (Renard et al., 1997). Según los criterios establecidos anteriormente, las lecturas de la precipitación de las fajas fueron realizadas en intervalos fijos de 30 minutos.

Se determinó la intensidad y la energía cinética correspondiente a cada lectura según la relación matemática establecida por Wischmeier y Smith (1978) (ecuación 1):

$$e = 0,119 + 0,0873 \log_{10}(i) \quad (1)$$

donde  $e$  es la energía cinética [ $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ] e  $i$  es la intensidad de la lluvia [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

La energía total de la tormenta, obtenida a través de la suma de la energía de cada lectura obtenida mediante (1), se multiplicó por la intensidad máxima en 30 minutos registrada en cada tormenta, lo que resultó finalmente en el valor del EI<sub>30</sub>, expresado en unidades de  $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ .

### Datos de pluviometría

Los valores de precipitación empleados se obtuvieron por medio de las lecturas de las fajas pluviográficas que fueron procesadas para el cálculo del EI<sub>30</sub>.

### Relaciones EI<sub>30</sub> vs. precipitación

Las relaciones entre el EI<sub>30</sub> y la precipitación fueron analizadas a través de regresiones lineales simples. Para el estudio de la relación a escala diaria se consideraron las lluvias y los EI<sub>30</sub> correspondientes al período 1995-2007.

Luego se analizó la relación a escala estacional agrupando los datos correspondientes a las estaciones (otoño, invierno, primavera y verano) de cada año estudiado. Se sumaron la precipitación y los EI<sub>30</sub> de las tormentas para cada estación del período estudiado. El conjunto de los datos obtenidos, es decir, todos los datos de todas las estaciones, se utilizó en el análisis de regresión.

Por último, se analizaron las relaciones para el otoño, invierno, primavera y verano separadamente considerando la suma de los EI<sub>30</sub> y de las precipitaciones correspondientes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las relaciones de regresión lineal simple obtenidas entre el índice EI<sub>30</sub> y la precipitación a escala diaria y estacional se presentan en las Figuras 1 y 2, respectivamente.

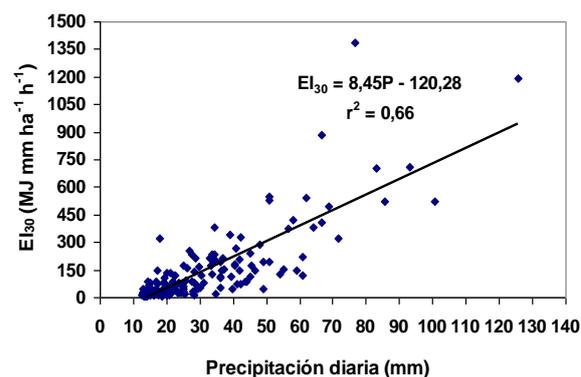


Figura 1. Relación entre el índice EI<sub>30</sub> y la precipitación a escala diaria, recta de regresión y ecuación de ajuste correspondientes. Datos pertenecientes a la localidad de Azul, Bs. As.

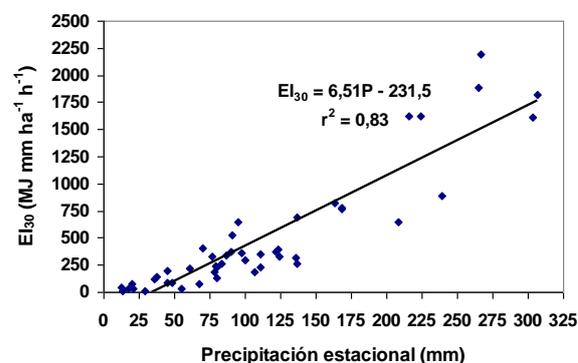


Figura 2. Relación entre el índice EI<sub>30</sub> y la precipitación a escala estacional, recta de regresión y ecuación de ajuste correspondientes. Datos pertenecientes a la localidad de Azul, Bs. As.

El ajuste de la relación diaria de las variables puede ser considerado adecuado ya que se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,66. Sin embargo, al agrupar estacionalmente el  $EI_{30}$  y la precipitación se logró una mejora considerable en el ajuste, y el valor del  $r^2$  fue de 0,83. Esto coincide con lo obtenido por Hoyos et al. (2005) quienes realizaron un estudio similar en la región andina de Colombia. Surge entonces, a partir de estos resultados, que las estimaciones más precisas de la erosividad a partir de la pluviometría se alcanzarían por medio de valores estacionales de precipitación.

En cuanto al análisis de la variabilidad estacional de la erosividad, las relaciones gráficas resultantes se muestran en la Figura 3. Los modelos de regresión ajustados presentaron buenos coeficientes de determinación, entre 0,79 y 0,89. Al analizar los parámetros de los modelos resultantes se observan diferencias en los valores de las ordenadas al origen y las pendientes ajustadas para las estaciones. Los valores de la pendiente demuestran que las precipitaciones estacionales

son más erosivas en el otoño y la primavera (pendientes mayores), mientras que su erosividad es menor durante el verano y el invierno (pendientes menores). Esto resulta válido con precipitaciones de alta magnitud, mientras que, cuando se trata de precipitaciones de magnitud menor, el comportamiento puede cambiar. En este caso, para determinar qué estación es más erosiva deben establecerse comparaciones por pares entre todas las estaciones para hallar el valor de la lluvia que sea límite, es decir, aquél en el cual las erosividades para dos estaciones se igualan. A su vez, ese valor resultará variable, debido a los modelos que describen la relación  $EI_{30}$  vs precipitación para cada estación. Por ejemplo, al analizar la relación entre el otoño y la primavera el valor de precipitación límite es de 20 mm, mientras que es de 120 mm cuando el análisis se realiza entre el invierno y la primavera. Así, de acuerdo con la ecuación de ajuste de cada estación, una precipitación estacional mayor que 120 mm será más erosiva en la primavera que en el invierno, pero una lluvia estacional menor que ese valor será más erosiva en el invierno que en la primavera.

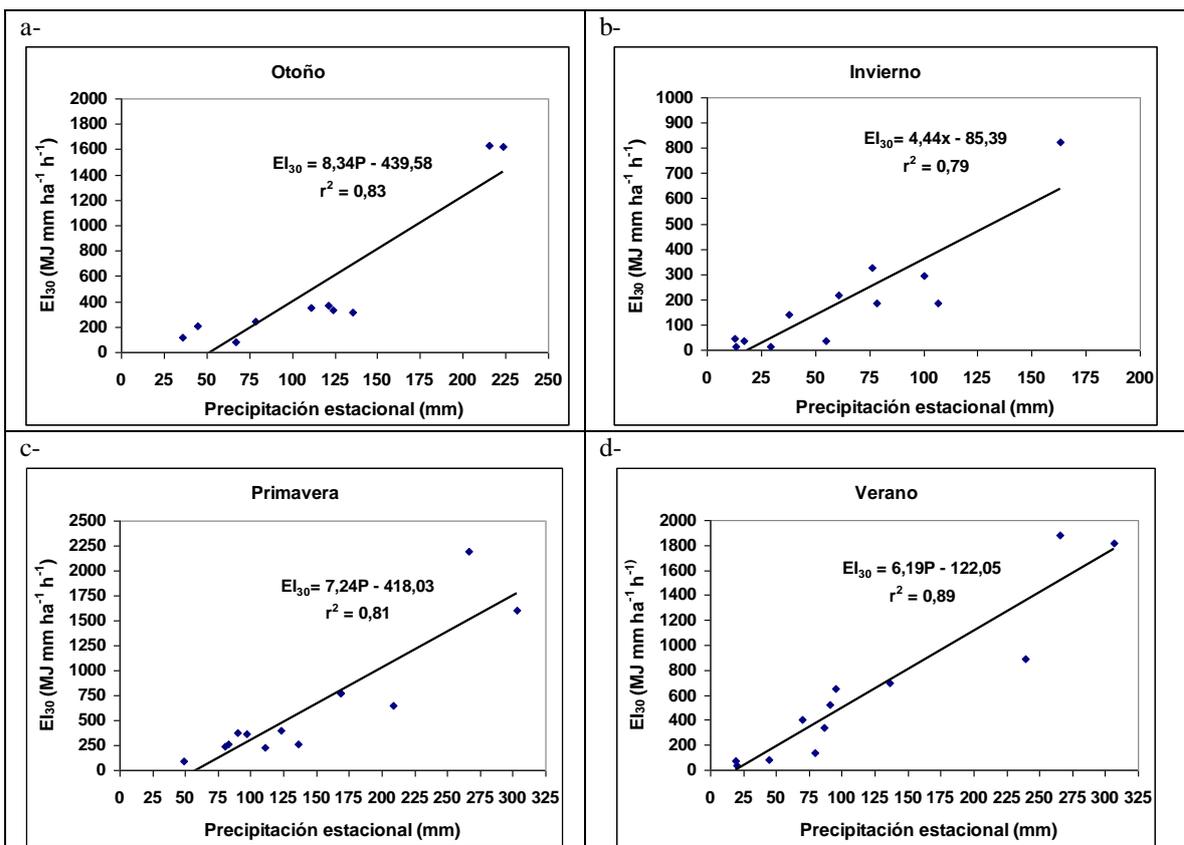


Figura 3. Relación entre el índice  $EI_{30}$  y la precipitación a escala estacional considerando cada estación separadamente, recta de regresión y ecuación de ajuste correspondientes. a- Otoño, b- Invierno, c- Primavera, d- Verano. Datos pertenecientes a la localidad de Azul, provincia de Buenos Aires.

Sin embargo, resulta de especial interés analizar la estacionalidad de la erosividad de precipitaciones de mayor magnitud, ya que éstas son las de mayor poder erosivo, debido a la relación directa entre la erosividad de las lluvias y la cantidad de agua precipitada (Renard y Freimund, 1994). Por lo tanto, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, el otoño y la primavera son los períodos en el que el riesgo potencial de ocurrencia de pérdida de suelo por impacto de la lluvia o salpicadura resulta más alto. Por otra parte, debe considerarse también que la cobertura puede ser limitada en esas estaciones incrementándose el riesgo de pérdida de suelo por salpicadura, al encontrarse el suelo expuesto a la acción de la lluvia. Cabe mencionar que la cobertura ejerce un efecto de protección de la superficie del suelo, ya que disipa la energía de las gotas de lluvia (FAO, 2005), lo que puede reducir por completo las pérdidas de suelo por impacto (Alberts y Neibling, 1994).

En el área de estudio, durante el otoño las pasturas y los verdes aportan cobertura vegetal viva y se inicia el período de barbecho posterior a la cosecha de los cultivos de verano. A su vez, una alta proporción de dichos cultivos corresponde a la soja, que aporta un residuo de bajo volumen y de rápida descomposición, lo que resulta en una menor protección de la superficie ante el impacto de la lluvia con respecto a la que ofrecen los rastrojos de maíz, por ejemplo (FAO, 2000; Alberts y Neibling, 1994). Otra práctica frecuente en el área de estudio, así como en la generalidad de la región pampeana, es la elaboración de rollos a partir de los rastrojos, que son utilizados como reservas forrajeras, o asimismo, el pastoreo directo, lo que contribuye también a reducir la protección de la superficie del suelo (Sfeir et al., 2005; Díaz Zorita et al., 2002).

Por otro lado, en la primavera el grado de cobertura del suelo mejora por la presencia de cultivos de invierno, aunque se mantiene cierta superficie en barbecho que se destinará a cultivos de verano. Además de las condiciones antes descritas, cierta proporción de los cultivos se realiza bajo manejo convencional, en el que la implementación de labranzas para preparar la cama de siembra dejará parte del suelo expuesto a la acción de la lluvia. Por esta razón, tanto las características de las precipitaciones como de la superficie de los suelos que son labrados, o que poseen un manejo inadecuado de la cobertura, continúan resultando favorables para la ocurrencia de pérdida de suelo.

Mientras tanto, la menor erosividad de las lluvias durante el verano es acompañada por una buena condición de la cobertura del suelo: los cultivos de escarda se encuentran en pleno crecimiento y las áreas con rastrojos corresponden principalmente a cultivos de trigo y cebada, que aportan un buen volumen de residuo y cobertura a la superficie.

Por último, si bien en el invierno la erosividad resultó menor, asociada a las lluvias menores y más débiles de la estación, no debe dejar de considerarse la posibilidad de ocurrencia de eventos de bajo período de retorno de importante intensidad que puedan implicar la pérdida de suelo por salpicadura. Este período coincide con la presencia de áreas en barbecho, las que pueden presentar suelo descubierto por la realización de labores previas a la siembra de los cultivos de grano fino.

Las cuestiones antes planteadas deberían ser tenidas en cuenta en la planificación del uso y manejo del suelo. En este sentido, dado que la lluvia es una variable del ambiente que el hombre no puede modificar, es posible actuar sobre la cobertura del suelo a través de la elección de los cultivos, las rotaciones y los sistemas de manejo. La implementación adecuada de la práctica conservacionista de siembra directa contempla estos aspectos, ya que implica realizar un buen manejo de la cobertura a través de rotaciones con cultivos que produzcan un importante volumen de rastrojos como las gramíneas (maíz, trigo, sorgo) (Casas, 2006; Brady y Weil, 2008). Esto conduce también a incrementar los niveles de materia orgánica del suelo, lo que permite una mayor estabilidad de sus agregados ante la acción del agua de lluvia (Zhang et al., 2007; Singh y Malhi, 2006; Arshad et al., 1999). De esta manera, la siembra directa es una alternativa que contribuye a evitar el desprendimiento del suelo por parte de las precipitaciones.

## CONCLUSIONES

A través de este trabajo fue posible obtener modelos de regresión lineal simple para estimar la erosividad de la lluvia con valores diarios y estacionales de precipitación correspondientes a la localidad de Azul, provincia de Buenos Aires. Los modelos que incluyeron datos estacionales de lluvia alcanzaron mejores ajustes que con datos diarios ( $r^2=0,83$  vs  $r^2=0,66$ ), por lo que permitirán realizar estimaciones más precisas de la erosividad.

Por otra parte, se ajustaron regresiones para cada estación del año individualmente (otoño, invierno, primavera y verano), lo que permitió conocer la dinámica anual de la erosividad. En este caso, los modelos alcanzaron coeficientes de determinación entre 0,79 y 0,89. Por su parte, las precipitaciones más erosivas corresponden al otoño y a la primavera, por lo tanto el riesgo potencial de pérdida de suelo por salpicadura o desprendimiento será mayor. A su vez, en estos períodos la cobertura del suelo es limitada: factores como la calidad de los rastrojos, su manejo o los laboreos previos a la siembra de los cultivos pueden reducir la cobertura del suelo y su protección, y consecuentemente favorecer su exposición a la acción de la lluvia.

Estas consideraciones demuestran la importancia de hacer una adecuada elección de cultivos, rotaciones e implementación de prácticas conservacionistas de manejo del suelo que garanticen la protección y la estabilidad del suelo ante la acción de la lluvia.

Finalmente, los modelos ajustados a partir de datos locales permiten realizar estimaciones de la erosividad a través de una variable sencilla de obtener, como la precipitación. Dichas estimaciones forman parte de la información necesaria para cuantificar y evaluar las pérdidas de suelo en la región.

## REFERENCIAS

- Alberts, E. y Neibling, H. 1994. Influence of crop residues on water erosion. In: Unger P. (ed) *Managing agricultural residues*. CRC Press: Inc. USA, 19-39.
- Arnoldus, H. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. In: *Assessing Soil Degradation*. FAO Soils Bulletin 34, Rome, 39-51.
- Arshad, M.A.; Franzluebbers, A.J. y Azooz, R. H. 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil & Tillage Research*, 53: 41-47.
- Angulo-Martínez, M. y Beguería, S. 2009. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379: 111-121.
- Brady, N. y Weil, R. 2008. The nature and properties of soils. 14th Edition. Pearson Prentice Hall. USA.
- Casas, R. 2006. Preservar la calidad y salud de los suelos: una oportunidad para la Argentina. Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria, 60: 37-61.
- Díaz-Zorita, M.; Duarte, G.A. y Grove, J. H. 2002. A review of no-till Systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 65: 1-18.
- Diodato, N. 2005. Predicting RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) monthly erosivity index from readily available rainfall data in Mediterranean Area. *The Environmentalist*, 25: 63-70.
- FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de Tierras y Aguas de la FAO 8, Roma.
- FAO. 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. Boletín de Suelos de la FAO 79, Roma.
- Hoyos, N.; Waylen, P. R. y Jaramillo, A. 2005. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, 31: 177-191.
- Hudson, N. 1982. *Conservación del suelo*. Reverté SA. Barcelona.
- Irurtia, C. B.; Berón, R.; Costamagna, O. y Glave, A. 1996. Erosión, Provincia de Buenos Aires. En: El deterioro del ambiente en la Argentina. Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires, 55-64.
- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12: 519-539.
- Marelli, H. J.; Arce, J. M. y Zabala, M. E. 2006. Conservación sustentable del suelo y el agua. Información para Extensión N° 99. Estación Experimental Marcos Juárez, Córdoba, Argentina.
- Renard, K. G. y Freimund, J. R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157: 287-306.
- Renard, K. G.; Foster, G. R.; Weesies, G. A.; Mc Cool, D. K. y Yoder, D. C. (Coord). 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised soil loss equation (RUSLE)*. USDA Agriculture Handbook N° 703. US Government Printing Office, Washington DC, USA.
- Sfeir, A.; Varni, M.; Piscitelli, M.; Crespo, R. J.; Ares, G. y Studdert, G. 2005. Cuantificación de los procesos de infiltración, escurrimiento y pérdida de suelo por medio de simuladores de lluvia. Actas XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, en CD.
- Sfeir, A.; Varna, M.; Piscitelli, M.; Ares, G.; Crespo, R. J. y Usunoff, E. 2006. Efecto de la siembra directa permanente sobre la reducción del es-

- currimiento superficial. III Congreso Iberoamericano sobre el control de la erosión y los sedimentos, en CD.
- Singh, B. y Malhi, S. S. 2006 Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. *Soil & Tillage Research*, 85: 143-153.
- Wischmeier, W. H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23: 246-249.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Handbook 537, USDA-ARS.
- Yu, B. y Rosewell, C. J. 1996. A robust estimator of the R-factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 39(2): 559-561.
- Zhang, G. S.; Chan, K. Y.; Oates, A.; Heenan, D. P. y Huang, G. B. 2007. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. *Soil & Tillage Research*, 92: 122-128.

*Artículo recibido el 06/2011 y aprobado para su publicación el 10/2011*