

ESTIMACION DEL FACTOR "R" DE LA ECUACION UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELOS PARA EL CENTRO-ESTE DE LA REPUBLICA ARGENTINA

Alicia E. C. de Rojas (1) y Alvaro A. Conde (2)
E.E.R.A. del INTA - C.C. 128 (3100) Paraná - Entre Ríos

RESUMEN

Se presentan estimaciones de "R", factor de la ecuación universal de pérdidas de suelo de Wischmeier y Smith para el centro-este de la República Argentina.

Con los mencionados valores se elaboró un mapa de líneas de igual potencialidad erosiva de las precipitaciones.

Se detallan, asimismo, la metodología empleada para el cálculo de la potencialidad erosiva de cada lluvia siguiendo el procedimiento de Wischmeier y Smith y las diferentes técnicas estadísticas aplicadas para superar los inconvenientes ocasionados por los registros pluviográficos incompletos.

Palabras clave: erosión, potencialidad erosiva de las lluvias, ecuación universal de pérdida de suelo.

ESTIMATIONS OF THE FACTOR "R" VALUES OF THE SOIL LOSS EQUATION FOR THE CENTRAL-EAST REGION OF THE ARGENTINE REPUBLIC

ABSTRACT

Estimations of the factor "R" values of Wischmeier and Smith's universal soil loss equations are presented for the central-east region of the Argentine Republic.

Using those values an isoerodent map is made.

The methodology employed is described including the different statistical techniques applied for overcoming the troubles derived from incomplete pluviographic records.

Key words: erosion, erodability, universal soil loss equation.

1) Técnica del Departamento de Suelo.
2) Estadístico.

INTRODUCCION

Con el propósito de iniciar actividades de investigación que sirvieran como guía para desarrollar planes de uso del suelo y de demostración, para la determinación de alternativas más prácticas y económicas de evaluación de diversos tratamientos de conservación del suelo, en 1969 se puso en marcha el Proyecto INTA-FAO Argentina 26 "Establecimiento de un programa de conservación del suelo". Las operaciones tuvieron por sede la EERA Paraná (Entre Ríos) y la EERA Marcos Juárez (Córdoba).

Una de las principales contribuciones del programa fue el desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo, de Wischmeier y Smith, en la que cada uno de los factores que determinan la pérdida de suelo interviene como un coeficiente en forma multiplicativa.

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

donde:

- A: pérdida anual de suelos, expresada en kg/ha
- R: lluvia y escurrimiento
- K: erosibilidad del suelo
- L: longitud de pendiente
- S: grado de pendiente
- C: cobertura y manejo del cultivo
- P: práctica de control de erosión

Este modelo se está usando ampliamente para planificar el uso de la tierra en términos conservacionistas.

Uno de los factores que toma en cuenta la ecuación es la potencialidad erosiva de las lluvias (R), elemento importante para la estimación de pérdidas de suelos por erosión hídrica y el único que se puede lograr en forma regional, puesto que se basa en el análisis de la información pluviográfica.

El objetivo de este trabajo fue estimar los valores de "R" para diferentes localidades de la región centro-este de la República Argentina y con esa información trazar un mapa de isolíneas de potencialidad erosiva el cual, junto con la evaluación local de los restantes factores, permitirá la selección de las prácticas de manejo más adecuadas en cada caso.

Para lograrlo se emplearon, además de los procedimientos descritos por Wischmeier, estimaciones estadísticas que permitieron superar la carencia de registros pluviográficos completos y estimar los valores del índice para las estaciones pluviométricas.

Los autores de éste han presentado trabajos preliminares sobre el tema (Rojas et al., 1976; Rojas y Conde, 1980).

MATERIAL Y METODOS

Para estimar el factor "R" se empleó el método de Wischmeier y Smith.

Las localidades para las cuales se calculó éste, se seleccionaron sobre la base de la calidad de sus registros pluviográficos. Para ello fue necesario contar también con los datos pluviométricos correspondientes. Tanto las fajas como los datos pluviométricos fueron extraídos de los archivos del Servicio Meteorológico Nacional.

Las localidades elegidas fueron: Córdoba, Bell Ville, Marcos Juárez y Laboulaye (Pcia. de Córdoba); Ceres, Reconquista, Rafaela y Rosario (Pcia. de Santa Fe); Paraná (EERA), Concordia y Gualeguaychú (Pcia. de Entre Ríos); Mercedes (Pcia. de Corrientes); Pergamino, Junín, El Palomar, Pehuajó, 9 de Julio, Las Flores, Dolores, Azul y Cnel. Suárez (Pcia. de Buenos Aires).

Para cada una de ellas se seleccionaron todas las fajas pluviográficas legibles correspondientes a tormentas mayores de 13,5 mm y se fotocopiaron. Luego, para cada tormenta se evaluó la energía cinética total (E), que se multiplica por la intensidad máxima en 30 minutos (I) (Wischmeier and Smith, 1962; 1965). Esta a su vez se multiplicó por dos para llevarla a milímetros por hora, obteniéndose así el valor Ex I, que se expresa en (kgm/ha) (mm/h). 10^{-6} . De acuerdo con la metodología usada las lluvias separadas por menos de 6 horas se consideraron como una misma tormenta. Distintos aspectos de la metodología utilizada han sido considerados por FAO (1967) y Wischmeier and Smith (1958; 1978).

El factor "R" resulta de promediar los totales anuales de Ex I para un período de por lo menos 20 años.

Al comparar los datos pluviográficos con los pluviométricos, se comprobó que en la mayoría de las localidades no existía una cantidad considerable de fajas pluviográficas. Por lo tanto, los valores de "R" obtenidos en general estaban subestimados, razón por la que se debió recurrir a un método estadístico para corregirlos.

Se supuso que los Ex I de tormentas individuales eran proporcionales en alguna medida a la lluvia caída, dato éste disponible con facilidad y exactitud a través de los registros pluviométricos. En consecuencia, de ser ello cierto, para calcular los valores de "R" se podría emplear un estimador por razón o cociente (Sukhatme, 1956) tomando como variable auxiliar la lluvia caída.

Para cada mes, la totalidad de las tormentas registradas pluviométricamente con más de 13,5 mm en

un cierto número de años, se consideró como una población de la cual se "extrajo" una muestra constituida por las tormentas cuyas fajas se analizaron.

Para disminuir el sesgo del estimador se efectuó un cambio de variable, tomándose $x = \text{lluvia} - 10 \text{ mm}$.

Efectuados los cálculos mes por mes, para Gualeguaychú y Rosario se pudo comprobar que el sesgo era muy pequeño y los coeficientes de variación del estimador, bajos (2,4 y 1,5 por ciento respectivamente).

Por lo tanto se eligió como estimador:

$$r_i = \frac{B_i \sum_{j=1}^{j=P} x_j}{n} \quad i = 1, \dots, 12$$

donde:

r_i : es el "R" promedio mensual.

P : el número total de tormentas analizadas y no analizadas.

n : el número de años de la serie de datos pluviométricos.

B_i : coeficiente de ajuste (estimador de razón).

$$B_i = \frac{\sum_{k=1}^{k=p} (EI)_k}{\sum_{k=1}^{k=p} x_k} \quad \text{siendo } p, \text{ el número total de tormentas cuyas fajas fueron analizadas.}$$

A partir de los r_i mensuales se obtuvo

$$R = \sum_{i=1}^{i=12} r_i$$

El estimador por cociente se aplicó también a los cálculos realizados para todas las localidades.

Se aclara que la recta de regresión $\hat{E}I = B_j \cdot x$ no puede emplearse para cada tormenta individual. Esta ecuación no ajusta muy bien cuando las precipitaciones son muy altas. Ellas no son frecuentes y por lo tanto el sesgo del estimador de "R" es despreciable.

Se hizo la regresión de los valores anuales de "R" obtenidos a partir de fajas pluviográficas, sobre los estimados con los coeficientes para Paraná y Rosario,

en años de los cuales se disponía de casi la totalidad de fajas pluviográficas.

En ambos casos, no se rechazó la hipótesis de que la recta de regresión pasa por el origen y tiene pendiente igual a 1, es decir que el "R" estimado es insesgado con respecto al "R" medido.

Las series pluviométricas se uniformaron para un período de 22 años (1950/1971).

Se comprobó que existe una estrecha correlación entre el producto del total de precipitación de una tormenta por la intensidad máxima en 30 minutos y el ExI de esa misma tormenta. En consecuencia a partir de la lectura completa de sólo 60 fajas por localidad pudieron estimarse los coeficientes de sendas rectas de regresión, a partir de las cuales se obtuvieron los ExI para las restantes tormentas, con la condición de leer sólo la intensidad máxima en 30 minutos y la precipitación total.

Las ecuaciones de regresión fueron:

$$E \cdot I = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot PT \cdot I_{30}$$

donde:

$\hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$: son los coeficientes estimados;

PT : es la precipitación total;

I_{30} : es la intensidad máxima en 30 minutos expresada en milímetros por hora.

Para elaborar el mapa de líneas que unieran puntos de igual potencialidad erosiva de las lluvias fue necesario ampliar el número de localidades. Tomando como referencia el predictor empleado por Wischmeier (1962), con la información disponible se empleó el siguiente índice producto de 3 factores:

$$X = I \text{ máx}_{30} \cdot P_p \text{ máx diaria} \cdot P_p \bar{x} \text{ anual}$$

donde:

$I \text{ máx}_{30}$: es la intensidad máxima en 30 minutos con período de retorno 2 para series parciales.

$P_p \text{ máx diaria}$: es la precipitación máxima diaria con período de retorno 2 para series parciales.

$P_p \bar{x} \text{ anual}$: es la precipitación media anual.

Dado el ajuste obtenido, este índice se empleó para estimar valores de "R" de localidades en las que se

carecía de fajas pluviográficas o donde éstas no eran suficientes.

Para ello hubo que calcular las precipitaciones máximas diarias con un período de retorno de 2 años. Se contó para algunas localidades de la Pcia. de Buenos Aires con la información proporcionada por el INCYTH. La Estación Experimental Regional Agropecuaria de Balcarce suministró los datos de Balcarce y Barrow. En las restantes fue necesario calcularlos.

Además se trazó un mapa de isolíneas de intensidades máximas en 30 minutos con los datos de localidades de las que se tenían fajas pluviográficas y esto permitió estimar los correspondientes valores para ser empleados en el índice.

Los datos de precipitación media anual fueron obtenidos de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional en algunos casos y en otros por interpolación a partir del Atlas Climático de la República Argentina.

Para comprobar el valor predictivo de ExI, en la EERA Paraná se relacionaron los valores mensuales totales de ExI con los totales mensuales de pérdidas de suelo en una parcela de escurrimiento con suelo desnudo (período julio/1973 a junio/1977) (Nani et al., 1980 (Fig. 2).

RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores de los coeficientes $\hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$ de las rectas de regresión de ExI sobre precipitación total por intensidad máxima en 30 minutos se presentan en la Tabla 1 y se aprecia que son muy semejantes para todas las localidades.

Mediante su obtención pudieron acelerarse los cálculos de ExI para tormentas individuales. Para ello se tuvo que suponer que las tormentas cuyas fajas fueron analizadas, constituían una muestra "al azar" representativa de los 22 años comunes (1950-1971). Admitiendo esta limitación, también se debe reconocer que no se hallaron evidencias de sesgos en el material disponible.

La regresión de R sobre el índice X, se muestra en la Fig. 1 y las localidades en las cuales se empleó y los valores usados, se adjuntan en la Tabla 2.

La obtención de este índice permitió la estimación de valores de "R" para localidades de las cuales se carecía de fajas pluviográficas y el trazado del mapa de isolíneas de potencialidad erosiva. Sin embargo, debe considerarse que se lograría un resultado más preciso a partir de la lectura completa de las fajas pluviográficas.

Figura 1: Regresión de los valores R sobre el índice X.

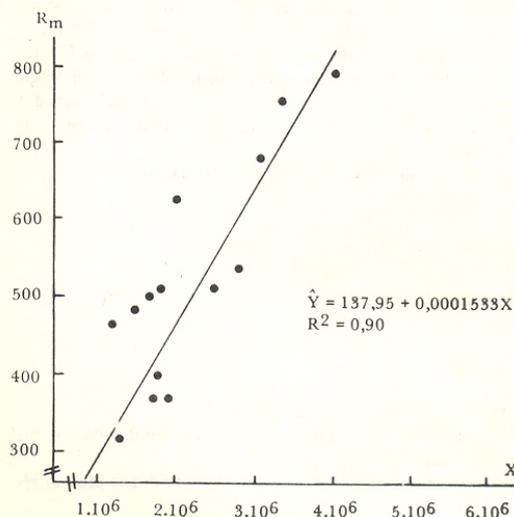


Figura 2: Regresión entre totales mensuales ExI y pérdidas de suelo en parcelas con suelo desnudo. EERA Paraná julio/73 a Junio/77.

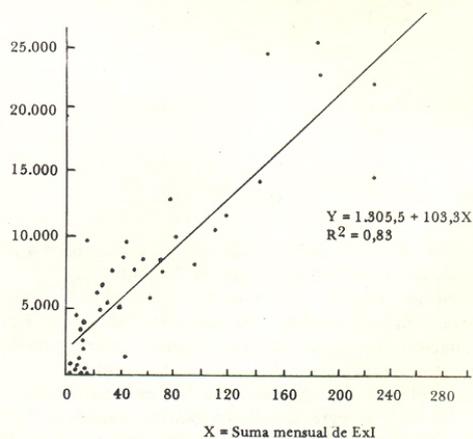


TABLA 1: Coeficientes de las rectas de regresión de E x I sobre PT . I30.

Localidades	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	r
Rosario	-1,646	0,0253	0,994
Galeguaychú	-1,983	0,0252	0,997
Junín	-1,334	0,0255	0,995
Paraná	-0,768	0,0252	0,998
Bell Ville	-1,315	0,0256	0,994
Reconquista	-0,709	0,0239	0,996
Marcos Juárez	-1,432	0,0267	0,994
Pergamino	-1,053	0,0252	0,996
Concordia	-1,117	0,0246	0,993
Córdoba	-0,625	0,0243	0,995
Rafaela	-0,653	0,0251	0,996
Azul	-0,919	0,0250	0,995

En la Tabla 3 se presentan los valores de "R" en unidades del sistema métrico (R_m) y en la Tabla 4, la distribución mensual de "R" y los porcentajes acumulados. La mayor parte de los valores de "R" se concentran en el período que va de octubre a abril. Fuera de ese período en las localidades de la provincia de Córdoba sólo ocurre aproximadamente el 6 por ciento; en las de las provincias de Santa Fe, Paraná y NO de Bs. As. alrededor del 10 por ciento y en el resto de las localidades desde un 20 por ciento hasta el 27 por ciento en Dolores.

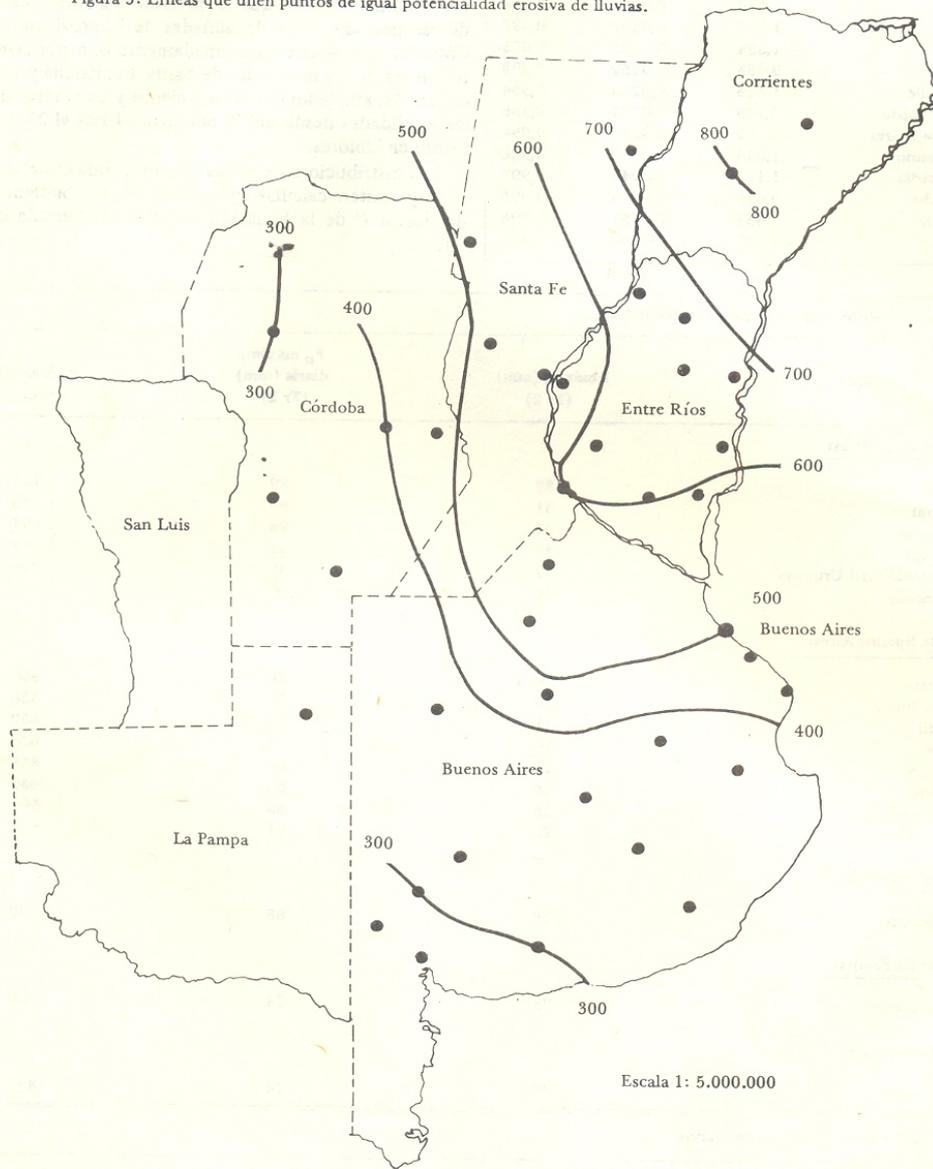
Las distribuciones mensuales de los índices de erosión permiten calcular los valores correspondientes del factor C de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

TABLA 2: Valores utilizados para el cálculo de R.

Localidad	I máx30 (mm) (Tr 2)	P _p máxima diaria (mm) (Tr 2)	P _p \bar{x} anual (mm)
<u>Pcia. de Entre Ríos:</u>			
La Paz	32	89	1.119
Federal	31	95	1.130
Villaguay	31	98	1.094
Victoria	32	92	1.014
Concepción del Uruguay	32	92	1.099
Galeguay	32	92	1.028
<u>Pcia. de Buenos Aires:</u>			
La Plata	30	76	900
Punta Indio	30	70	880
Tandil	31	75	850
Pigüé	24	75	600
Balcarce	24	68	856
Barrow	24	62	680
Bordenave	23	65	600
Bahía Blanca	23	61	500
<u>Pcia. de Córdoba:</u>			
Río Cuarto	28	66	790
<u>Pcia. de La Pampa:</u>			
General Pico	26	74	700
<u>Pcia. de Santa Fe:</u>			
Sauce Viejo	32	74	881

Nota: Tr 2 = tiempo de retorno 2 años.

Figura 3: Líneas que unen puntos de igual potencialidad erosiva de lluvias.



La Fig. 3 muestra que en el área estudiada las isolíneas aumentan de SO a NE de 300 a 800, siguiendo aproximadamente el trazado de las isoyetas.

A excepción de la zona sur (con valores de "R" de alrededor de 300) el resto muestra una gran variación geográfica. Así el cambio en los valores de "R" en el sentido de los meridianos en el norte fue de tal importancia que, en los 600 km que separan a Córdoba del río Uruguay, la potencialidad erosiva de las precipitaciones se incrementa en un 120 por ciento aproximadamente.

Esta variación permite concluir que es necesario tomar en cuenta la estimación del factor "R" correspondiente a cada uno de los puntos en los cuales se desea aplicar ecuaciones de pérdidas de suelo.

Para dichas estimaciones el mapa de isolíneas obtenido sirve como elemento indispensable.

Con respecto a la relación entre los valores de "R" mensuales de la EERA Paraná con los de la pérdida de suelo en una parcela de escurrimiento con suelo desnudo, se concluyó que el índice explica el 83 por ciento de la variación de la pérdida ocurrida.

CONCLUSIONES

Con los valores del factor "R" (potencialidad erosiva de las lluvias) estimados a partir de la lectura de fajas pluviográficas complementadas con la aplicación de técnicas estadísticas, pudo trazarse un mapa de isolíneas para el centro-este de la República Argentina.

La incorporación de nuevas localidades al mapa tentativo presentado por los autores en 1980 permitió confirmar que la potencialidad erosiva aumenta de SO a NE, coincidiendo con la tendencia de las precipitaciones anuales.

A excepción del sur de la región, con valores que oscilan alrededor de 300, el resto muestra una gran variación geográfica.

En las distribuciones anuales los valores se concentran en el período comprendido entre octubre y abril.

TABLA 3: Valores de "R".

Localidad	Rm*
<u>Pcia. de Córdoba:</u>	
Córdoba	305
Bell Ville	400
Marcos Juárez	482
Río Cuarto	362
Laboulaye	333
<u>Pcia. de Santa Fe:</u>	
Reconquista	731
Ceres	510
Rafaela	501
Sauce Viejo	460
Rosario	603
<u>Pcia. de Corrientes:</u>	
Mercedes	786
<u>Pcia. de Entre Ríos:</u>	
La Paz	625
Federal	648
Concordia	671
Paraná	532
Villaguay	648
C. del Uruguay	630
Victoria	598
Gualeguaychú	527
Gualeguay	600
<u>Pcia. de Buenos Aires:</u>	
Pergamino	473
Junín	497
El Palomar	509
9 de Julio	496
La Plata	453
Punta Indio	421
Pehuajó	363
Las Flores	360
Dolores	358
Azul	374
Tandil	441
Balcarce	352
Barrow	293
Cnel. Suárez	296
Pigüé	303
Bordenave	276
Bahía Blanca	246
<u>Pcia. de La Pampa:</u>	
Gral. Pico	344

* Para llevar al sistema estadounidense dividir los valores por 1,735.

TABLA 4: Distribución mensual de "R" y porcentajes acumulados.

Localidad	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Córdoba	59	54	42	5	5	3	0	5	3	36	41	52
	19,3	37,0	50,8	52,4	54,0	55,0	55,0	56,6	57,6	69,4	82,8	100,0
Bell Ville	55	51	65	24	5	1	5	3	7	42	56	79
	14,0	27,0	43,5	49,6	50,9	51,2	52,5	53,3	55,1	65,8	80,0	100,0
Marcos Juárez	87	61	87	44	10	6	6	4	14	50	52	61
	18,0	30,7	48,7	57,8	59,9	61,1	62,3	63,1	66,0	76,4	87,2	100,0
Laboulaye	50	41	59	26	8	2	1	2	7	28	45	64
	15,0	27,3	45,0	52,8	55,2	55,8	56,1	56,7	58,8	67,2	80,7	100,0
Reconquista	74	121	80	69	19	28	6	11	18	103	73	129
	10,1	26,7	37,6	47,0	49,6	53,5	54,3	55,8	58,3	72,4	82,5	100,0
Ceres	99	84	74	36	11	2	9	9	14	39	93	73
	18,2	33,7	47,3	53,9	55,9	56,3	58,0	59,7	62,3	69,5	86,6	100,0
Rafaela	100	60	100	43	29	6	6	4	9	28	53	63
	20,0	32,0	52,0	60,6	66,4	67,6	68,8	69,6	71,4	77,0	87,6	100,0
Rosario	83	78	120	67	20	13	10	10	13	51	67	71
	13,8	26,7	46,6	57,7	61,0	63,1	64,7	66,3	68,4	77,0	88,0	100,0
Mercedes	70	100	98	70	42	45	10	16	45	108	72	115
	9,0	22,0	34,4	43,3	48,6	54,3	55,6	57,6	63,3	76,4	85,6	100,0
Concordia	97	56	92	85	33	37	27	17	44	72	65	46
	14,5	22,8	36,5	49,2	54,1	59,6	63,6	66,1	72,7	83,4	93,1	100,0
Paraná	93	53	96	54	16	11	13	5	12	64	56	59
	18,0	28,0	46,0	56,1	59,1	61,1	63,5	64,4	66,6	78,6	89,1	100,0

(continuación)

Localidad	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Guaiguaychú	77	46	79	47	25	23	12	27	10	42	58	81
	14,6	23,3	38,3	47,2	51,9	56,3	58,6	63,7	65,6	73,6	84,6	100,0
Pergamino	64	62	70	41	25	10	14	9	17	52	50	59
	13,5	26,6	41,4	50,1	55,4	57,4	60,5	62,4	66,0	77,0	87,6	100,0
Junín	82	39	97	37	19	7	14	7	17	55	78	45
	16,5	24,3	43,8	51,2	55,0	56,4	59,2	60,6	64,0	75,1	90,8	100,0
El Palomar	77	56	64	55	39	17	17	26	23	41	42	52
	15,1	26,1	38,7	49,5	57,2	60,5	63,8	68,9	73,4	81,5	89,8	100,0
9 de Julio	81	58	78	37	27	14	22	13	19	38	45	64
	16,3	28,0	43,7	51,1	56,5	59,3	63,7	66,3	70,1	77,8	86,9	100,0
Pehuajó	58	44	54	32	21	6	17	5	17	29	41	39
	16,0	28,1	43,0	52,0	58,0	59,2	63,9	65,3	69,9	77,9	89,2	100,0
Las Flores	57	55	64	15	22	11	11	8	14	29	42	32
	15,8	31,1	48,9	53,1	59,2	62,2	65,2	67,4	71,3	79,3	91,0	100,0
Dolores	46	43	66	29	26	13	19	23	13	22	36	22
	12,8	24,8	43,2	51,3	58,6	62,2	67,5	73,9	77,6	83,7	93,7	100,0
Azul	56	34	84	14	20	7	15	20	15	20	42	47
	15,0	24,1	46,6	50,3	55,6	57,5	61,5	66,9	70,8	76,2	87,3	100,0
Cnel. Suárez	22	45	66	27	14	6	5	13	8	19	35	36
	7,4	22,6	44,9	54,0	58,7	60,7	62,4	66,8	69,5	75,9	87,7	100,0

REFERENCIAS

- Food and Agricultural Organization of the United Nations, 1967. La erosión del suelo por el agua. Roma. Cuadernos de Fomento Agropecuario N° 31. 207 p.
- Nani, L. A.; M. D. Beney y R. F. Moresco, 1980. Pérdidas de suelo y agua en un suelo Molisol. Efecto cultivo y rotación. Actas IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Tomo II. Paraná (Entre Ríos); 817-822.
- Rojas, A. C. de; A. A. Conde y R. F. Moresco, 1976. Determinación del Índice de Erosividad de las lluvias para algunas localidades de Entre Ríos, Santa Fe y Buenos Aires. INTA-IDIA. Suplemento N° 33: 709-713.
- Rojas, A. C. de; y A. A. Conde, 1980. Determinación del Índice de Erosividad de las lluvias (segunda aproximación). Actas IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Tomo II. Paraná (Entre Ríos); 873-880.
- Sukhatme, P. V., 1956. Teorías de encuestas por muestreo con aplicaciones. Trad. de la 1ra. edición inglesa por A. M. Fores y J. Nieto de Pascual. México, Fondo de Cultura Económica. 495 p.
- Wischmeier, W. H., 1962. Rainfall erosion potencial. Agr. Engr. 43: 212-215.
- Wischmeier, W. H. y D. D. Smith, 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. Amer. Geophys. Union 39: 285-291.
- Wischmeier, W. H. y D. D. Smith, 1962. Soil-loss estimation as a tool in soil and water management planning. Contribution from the soil and water conservation. U. S. Department of Agricultura (Agriculture Research Service) y Purdue A. E. S. H. N° 59: 148-159.
- Wischmeier, W. H. y D. D. Smith, 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agric. Handbook 282. U. S. Department of Agriculture.
- Wischmeier, W. H. y D. D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U. S. Department of Agriculture Handbook N° 537.