

EVALUACION DEL MODELO USLE EN LA ESTIMACION DE LA EROSION EN SEIS LOCALIDADES ENTRE LA IV Y IX REGION DE CHILE

R. HONORATO, L. BARRALES, I. PEÑA y F. BARRERA

Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales
Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal
Pontificia Universidad Católica de Chile
Casilla 306-22. Santiago, Chile

Abstract

R. Honorato, L. Barrales, I. Peña y F. Barrera. Usle erosion model evaluation on six locations between IV and IX Region of Chile. The USLE model to predict soil erosion was evaluated in 42 different agroecological soil surface conditions for 6 sites between - 30° 30'; - 71° 20' and - 38° 22'; - 72° 45', in which annual rainfall range from 100 to 1.800 mm. Model results predicted adequately actual values in sites with significant erosion ($> 2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ year}$) and for under tillage practices promoting erosion, such as on bare soil and with conventional tillage. Model estimated erosion did not exceed 50% of the observed erosion values with a probability of 0.05. Erosion values over $2.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ year}$ under soil conservation tillage practices such as minimum tillage were not well estimated by USLE, did not adequately quantify the effect of rainfall erosivity and tillage practices, mainly due to factor R, calculated according to the Arnoldus approximation, and factor C.

Key words: soil erosion, soil degradation, USLE model

Cien. Inv. Agr. 28(1): 7-14. 2001

INTRODUCCION

La carencia de restricciones en el uso de los recursos naturales, junto con una tecnología de alta capacidad de transformación, a menudo inadecuada o el abuso de prácticas agrícolas, como la labranza del suelo, en ambientes inestables, provocan una degradación generalizada en diversos ecosistemas agrícolas, que en forma global podría calificarse como desertificación (Gastó, 1993). Entre los procesos que contribuyen a este fenómeno pueden citarse la erosión, la salinización, la acidificación y el deterioro físico de los suelos. De estos procesos, la erosión del suelo por escurrimiento hídrico, cuyo origen está en la acción del agua sobre una superficie desprovista de cobertura vegetal, es quizás el más importante de todos, dado que es irreversible y generalmente de gran magnitud. Este fenómeno se ve agravado por factores socioeconómicos y tecnológicos.

La consecuencia directa de la erosión del suelo es una disminución de la productividad agrícola, debido a la

pérdida de nutrientes, a su deterioro físico, a la pérdida de profundidad y en casos extremos a la pérdida total del suelo. De esto se desprende la necesidad de medir o estimar la erosión potencial de los suelos para aplicar medidas que eviten la pérdida de este recurso.

Para la estimación de la erosión se han desarrollado modelos cualitativos y cuantitativos; entre los primeros, destaca la cartografía de unidades homogéneas en función de los parámetros principales que controlan el proceso erosivo (erosividad de la lluvia, suelo, vegetación, topografía), con otros atributos de ajuste más subjetivos. Los modelos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión y pueden tener una evaluación directa o indirecta. La evaluación directa se desarrolla en terreno, por medición en parcelas de erosión o por la medición de variables, tales como sedimentos en el agua y los simuladores de lluvia, cuyos datos son extrapolados a zonas homogéneas. Los métodos de evaluación indirecta están asociados a modelos que son representaciones simplificadas de la realidad; entre estos podemos distinguir modelos

¹ Dirigir correspondencia a: R. Honorato - rhonorat@puc.cl

estadísticos, modelos físicos y modelos paramétricos (Almorox *et al.*, 1994).

Los modelos empíricos destacan por su amplia utilización, de ellos el más usado ha sido el de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), especialmente adaptado para evaluar las pérdidas de suelo por erosión laminar y surcos. Su bondad depende del rigor con que los cinco multiplicandos que componen la ecuación, reproduzcan las condiciones del medio al interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos (Almorox *et al.*, 1994).

La elección del USLE en este trabajo se debe a su alta fidelidad y a su relativa aplicabilidad universal, producto de la gran cantidad de trabajos realizados en todo el mundo con fines científicos y de planificación. El fundamento del modelo está suficientemente documentado en los estudios originales de Wischmeier y Smith (1978) y en los estudios posteriores, que dan cuenta de este modelo (Moreira, 1991; Peña, 1980, 1982).

Wischmeier y Smith (1978) comprobaron, al contrastar una base de datos de 2300 parcelas, que USLE daba predicciones de pérdidas medias anuales con un error de $\pm 5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, en el 84% de los casos en que se aplicó. En otros trabajos, utilizando el modelo EUROSEM se determinó que el 50% de las predicciones de pérdida de suelo en tormentas aisladas tenían una desviación de $\pm 0,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ y el 80% una desviación de $\pm 2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ para valores medidos en el rango de $0,1$ a $11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Morgan, 1997).

En Chile, diversos investigadores han aplicado el modelo USLE. Millas (1977), estimó la erosión en $8,8$ y $9,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ año en dos series de suelos graníticos en Cauquenes (rotación de papas, trigo y avena asociada a pradera) y Riquelme (1994), en esta misma serie de suelo, la estimó en $8,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ año, con un cultivo de trigo y Labranza Tradicional. Endlicher (1988) en Florida, en parcelas de trigo de secano para el período 1982-1983, registró valores de erosión de $3,2$ a $3,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ año. Por otra parte, Peña (1980, 1982) y Carrasco (1990), en Santa Bárbara y posteriormente Gaete (1999), en Galvarino, obtuvieron una buena correspondencia entre las estimaciones del modelo y los resultados de las parcelas de erosión.

Un aspecto discutible es, lo que se considerará como aceptable en relación con la pérdida de erosión. Para Wischmeier y Smith (1978), una pérdida tolerable de suelo es la tasa máxima de erosión que aún permite la sustentabilidad económica a largo plazo del nivel de

productividad del suelo, por su parte Miller (citado por Oyarzún, 1993), sostiene que las pérdidas por erosión a largo plazo no deberían exceder la tasa de formación del suelo. Los rangos de tolerancia para pérdida de suelo varían desde $11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ año para suelos profundos, permeables y bien drenados con alto nivel productivo a $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ año para suelos delgados (Guevara, 1997). El rango de tolerancia sugerido por estos autores, donde se supone que hay una compensación de la pérdida de suelo mediante la formación de nuevo suelo, no parece válida, dado que la velocidad de formación de suelo es extremadamente lenta a la escala humana.

Cuando el objetivo es predecir la cantidad de suelo perdido, resulta necesario comparar las predicciones del modelo con los valores medidos. Esto se puede llevar a cabo, dividiendo el valor de la predicción por el valor medido, para obtener una relación la que idealmente debería ser 1,0. En términos generales, se considera una buena aproximación cuando la relación está entre 0,75 y 1,5 y en casos menos exigentes, entre los valores 0,5 y 2,0, también se ha utilizado como medida de la calidad del modelo el porcentaje de predicciones aceptables (Morgan, 1997).

En el presente trabajo el objetivo fue estudiar la exactitud de la predicción de la erosión hídrica del modelo USLE, en diferentes situaciones agroecológicas, comprendidas entre la IV y IX Región de Chile, comparando las estimaciones de erosión proporcionadas por el modelo, con las respectivas mediciones de erosión obtenidas en parcelas experimentales por diferentes investigadores.

MATERIALES Y METODOS

El modelo USLE fue aplicado a datos de erosión medidos experimentalmente por diversos investigadores a partir de parcelas de erosión: Peña (1982) en la localidad de Santa Bárbara, Riquelme (1994) en Cauquenes, Perret (comunicación personal, 1999) en Tunga Norte, Carrasco (comunicación personal, 1999) en Litueche, Raggi (comunicación personal, 1999) en Florida y Gaete (comunicación personal, 1999) en Galvarino.

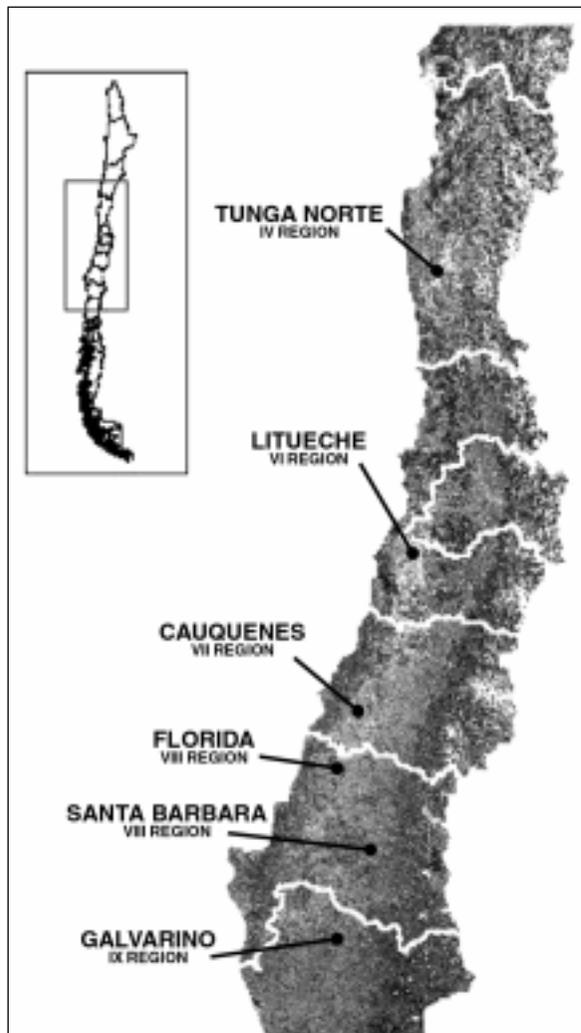
La ubicación geográfica de las localidades (Figura 1) abarcó un rango de pluviometría de 100 mm anuales en Tunga Norte a 1800 mm en Santa Bárbara y las prácticas de manejo consideradas en cada una de ellas se presentan en el Tabla 1.

Tabla 1. Identificación de las localidades y prácticas de manejo del suelo.*Summary table, indicating locations and tillage practices.*

Cobertura Vegetal	Localidad					
	Tunga Norte	Litueche	Cauquenes	Florida	Santa Bárbara	Galvarino
Cero Labranza(1)		*	*	*		*
Preadera Natural(2)	*	*		*		*
Labranza Tradicional (1)	*	*	*			*
Mínima Labranza (1)		*	*			*
Suelo Desnudo		*		*	*	

(1) Trigo, (2) Pradera mediterránea en Tunga Norte, de Falaris y especies nativas en Litueche y nativas en Florida y Galvarino.

* = cobertura vegetal existente.

**Figura 1.** Distribución geográfica de las parcelas de erosión entre la IV y IX Región de Chile.*Geographic distribution of erosion plots between IV and IX Region of Chile.*

Como resultado de la combinación de prácticas de manejo, localidades y años, se originaron 42 situaciones agroecológicas.

Para la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica, se utilizó el modelo USLE, descrito por Wischmeier y Smith (1978), el cual basa sus pronósticos de pérdida de suelo en función de seis parámetros (ecuación 1). Donde A: pérdida de suelo ($t \cdot ha^{-1} \cdot año$); R: erosividad de las precipitaciones ($h_j \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$); K: erodabilidad del suelo ($t \cdot ha^{-1} \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot h_j^{-1} \cdot cm^{-1}$); L: longitud de la ladera (m); S: pendiente de la ladera (%); C: cultivo y manejo del suelo y P: prácticas de conservación.

$$A = R K L S C P \quad [1]$$

Los parámetros de este modelo fueron estimados a partir de información registrada en el país y en su ausencia fueron utilizados los antecedentes que aparecen en la literatura.

El factor R fue estimado sobre la base de la aproximación de Arnoldus (1980), para lo cual se usaron los datos de precipitaciones diarias, medias mensuales y anuales disponibles en la Dirección General de Aguas; datos de los años 1994 y 1995 de la Estación Meteorológica de INIA-Hidango y datos obtenidos del trabajo de Raggi (comunicación personal, 1999), registrados en el pluviómetro del fundo Chequén para el período 1994-1997. Gatica (1998) utilizando la aproximación de Arnoldus, en Tunga Norte, obtuvo buenos resultados en la estimación de la erosión.

El valor K fue obtenido a partir de la propuesta de Wischmeier y Smith (1978) y los datos analíticos requeridos para la estimación de este parámetro provinieron de los informes regionales de suelos de CIREN y de INIA (1985). Para aquellas localidades donde no se contó con la granulometría detallada (limo+arena fina), se usó el porcentaje de arena y en aquellos suelos con niveles de materia orgánica (MO) superiores al 4%, como fue el caso de Santa Bárbara (Andisol), se usó este valor para no sobreestimar el valor de K.

En el caso de los factores topográficos L y S, se utilizó el largo y porcentaje de pendiente de las parcelas de erosión,

que en su mayoría se ajustaron al diseño propuesto por Stocking (1989). Las parcelas en Galvarino tuvieron un tamaño de 3,5 • 11 m en una ladera de 12% de pendiente y en Florida de 18%. Peña (1982) utilizó 10 parcelas de 2 • 20 m y una pendiente de 11%. Perret (comunicación personal 1999) en Tunga Norte, utilizó parcelas rectangulares de 18 • 7 m, con una pendiente cercana al 40%. Riquelme (1994) en Cauquenes, utilizó parcelas de 11 • 3,6 m y una pendiente de 11%.

El valor de estimación para el parámetro C fue obtenido utilizando la ecuación de Moreira (1991). Al factor P se le asignaron los valores proporcionados por Wischmeier y Smith (1978) para las diferentes prácticas de conservación. Se excluyeron de este estudio las prácticas de manejo muy particulares donde la cuantificación de los factores C y P resultaría difícil por falta de información en la literatura.

Para probar la exactitud del modelo USLE en la predicción de la erosión hídrica, se comparó sus estimaciones con la erosión real, determinada experimentalmente en parcelas de erosión. Se utilizó como método de comparación la prueba de χ^2 de varianza hipotética, en que el requerimiento de exactitud se expresó en términos relativos (50%) al valor real de erosión y con una probabilidad de 0,05 que esto no ocurra. Esta prueba de χ^2 rechaza las técnicas inexactas, independiente de la fuente de discrepancia o error (sesgo, falta de precisión o ambos). Para mejorar la forma en que se evaluó la exactitud del modelo USLE, la prueba de χ^2 se ajustó para hacer frente a dos situaciones. La primera correspondió con un ajuste en que se eliminó la presencia de un sesgo único o común a todos los valores de las estimaciones. La segunda, consideró que en alguna situación particular, la magnitud del sesgo podría no ser constante sino aumentar o disminuir directamente en función del valor real, en cuyo caso la prueba de exactitud de una técnica libre de sesgo requirió un ajuste de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSION

Una de las condiciones básicas para que un modelo de pronóstico de la erosión sea capaz de estimarla adecuadamente, es que las condiciones hidroecológicas sean favorables a un desarrollo significativo de la erosión por escurrimiento hídrico. A este respecto, Morgan (1997) señala que una baja erosión hídrica limita la efectividad de los modelos y establece como umbral una erosión superior a 1,5 t • ha⁻¹ año. En este estudio, 20 de las 42 situaciones agroecológicas consideradas (Tabla 2), presentaron valores de erosión

inferiores a 1,5 t • ha⁻¹ año. Estas situaciones agroecológicas están asociadas mayoritariamente con parcelas de erosión ubicadas en localidades de pluviometría inferior a 300 mm al año como en Tunga Norte y con prácticas de manejo que tienden a proteger el suelo de la erosión como cero labranza y pradera natural. Por otra parte, el límite de tolerancia establecido por Guevara (1997 para suelos profundos y bien drenados), de 11 t • ha⁻¹ año, fue superado en todas aquellas situaciones con prácticas de manejo de Suelo Desnudo, con la excepción de Litueche en el año 1993, que tuvo un valor de R bajo. Para las demás prácticas de manejo, aún en localidades con alta pluviometría, como Florida y Galvarino, la erosión se mantuvo por debajo de 7 t • ha⁻¹ año.

En una primera etapa, la capacidad predictiva del modelo USLE se evaluó considerando simultáneamente las 42 situaciones agroecológicas. De esta evaluación se infirió que el modelo no proporcionó la exactitud requerida, (valor $p < 0.01$). Este resultado concordó con lo señalado por Morgan (1997), dado el alto número de situaciones agroecológicas con erosión inferior al umbral de 1,5 t • ha⁻¹ año. Posteriormente se evaluó la capacidad predictiva de USLE, considerando sólo aquellas situaciones agroecológicas en las cuales la erosión observada fue superior a 2,5 t • ha⁻¹ año, así de las 42 situaciones agroecológicas originales, sólo 19 cumplieron con la condición señalada (Tabla 3). Producto de esta evaluación se determinó que los pronósticos de erosión obtenidos por USLE también excedieron la exactitud requerida, al ser comparados con los respectivos valores de erosión medidos experimentalmente, ($P(\chi^2 < 0,01)$). Esta falta de correspondencia pudo deberse a dos motivos no excluyentes: uno, a que alguno o todos los valores asignados a cada uno de los parámetros del modelo no fueron los adecuados, aún cuando los valores asignados fueron las mejores estimaciones obtenidas de acuerdo a la información disponible; el otro, a que en el análisis conjunto de información proveniente de situaciones agroecológicas heterogéneas (distintas prácticas de manejo, localidades y años), las diferencias entre los valores observados y pronosticados se acumulan, haciendo difícil que el procedimiento estadístico de prueba, permita calificar al USLE como buen modelo de pronóstico.

Como una forma de disminuir la heterogeneidad, la información se estratificó por práctica de manejo y en cada una de ellas se comparó las estimaciones logradas por el modelo USLE con las respectivas erosiones de las parcelas experimentales (Tabla 3).

Tabla 2. Erosión observada y estimada, parámetros del modelo USLE y precipitación para diferentes prácticas de manejo en seis localidades, entre la IV y IX Región de Chile.*Observed and predicted erosion levels, USLE model parameters and rainfall for different tillage practices in six locations between IV and IX Region of Chile.*

Práctica de Manejo	Región	Año	Precipitación*	Parámetros del modelo USLE					Erosión (t . ha ⁻¹ año)	
				R	K	LS	C	P	Estimada	Observada
Labranza Tradicional	IV	1993	158	40,0	0,42	0,27	0,50	1	2,22	0,77
Pradera Natural	IV	1993	158	40,0	0,42	0,27	0,35	1	1,55	0,23
Labranza Tradicional	IV	1994	70	28,2	0,42	0,27	0,50	1	1,56	0,81
Pradera Natural	IV	1994	70	28,2	0,42	0,27	0,35	1	1,09	0,28
Labranza Tradicional	IV	1995	106	27,6	0,42	0,27	0,05	1	1,53	0,87
Pradera Natural	IV	1995	106	27,6	0,42	0,27	0,35	1	1,07	0,40
Cero Labranza	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	0,07	1	0,41	1,17
Labranza Tradicional	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	0,50	1	2,91	3,21
Minima Labranza	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	0,10	1	0,58	2,04
Pradera Natural	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	0,25	1	1,45	1,55
Suelo Desnudo	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	1,00	1	5,81	4,41
Cero Labranza	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	0,07	1	0,76	1,94
Labranza Tradicional	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	0,50	1	5,42	4,63
Minima Labranza	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	0,10	1	1,08	2,52
Pradera Natural	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	0,50	1	5,42	7,26
Suelo Desnudo	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	1,00	1	10,85	24,69
Cero Labranza	VII	1993	753	147,8	0,23	0,21	0,07	1	0,49	1,30
Labranza Tradicional	VII	1993	753	147,8	0,23	0,21	0,50	1	3,52	8,80
Minima Labranza	VII	1993	753	147,8	0,23	0,21	0,10	1	0,70	4,90
Cero Labranza	VIII	1994	844	157,6	0,22	1,00	0,07	1	2,45	0,29
Pradera Natural	VIII	1994	844	157,6	0,22	1,00	0,01	1	0,35	0,23
Suelo Desnudo	VIII	1994	844	157,6	0,22	1,00	1,00	1	35,04	31,38
Cero Labranza	VIII	1995	952	181,7	0,22	1,00	0,07	1	2,83	0,10
Pradera Natural	VIII	1995	952	181,7	0,22	1,00	0,01	1	0,40	0,15
Suelo Desnudo	VIII	1995	952	181,7	0,22	1,00	1,00	1	40,40	28,07
Cero Labranza	VIII	1996	906	85,6	0,22	1,00	0,07	1	1,33	0,06
Pradera Natural	VIII	1996	906	85,6	0,22	1,00	0,01	1	0,19	0,06
Cero Labranza	VIII	1997	1565	212,8	0,22	1,00	0,07	1	3,31	0,06
Pradera Natural	VIII	1997	1565	212,8	0,22	1,00	0,01	1	0,47	0,06
Suelo Desnudo	VIII	1997	1565	212,8	0,22	1,00	1,00	1	47,32	34,35
Suelo Desnudo	VIII	1978	1857	334,5	0,39	0,20	1,00	1	25,59	32,26
Suelo Desnudo	VIII	1979	1658	219,7	0,39	0,20	1,00	1	16,80	22,44
Suelo Desnudo	VIII	1980	1943	270,9	0,39	0,20	1,00	1	20,72	34,91
Suelo Desnudo	VIII	1981	1707	280,3	0,39	0,20	1,00	1	21,44	34,28
Cero Labranza	IX	1996	664	85,8	0,32	0,24	0,07	1	0,46	0,72
Labranza Tradicional	IX	1996	664	85,8	0,32	0,24	0,50	1	3,32	4,98
Minima Labranza	IX	1996	664	85,8	0,32	0,24	0,10	1	0,66	2,74
Pradera Natural	IX	1996	664	85,8	0,32	0,24	0,06	1	0,40	0,48
Cero Labranza	IX	1997	1188	170,7	0,32	0,24	0,07	1	0,92	1,14
Labranza Tradicional	IX	1997	1188	170,7	0,32	0,24	0,50	1	6,60	6,64
Minima Labranza	IX	1997	1188	170,7	0,32	0,24	0,10	1	1,32	3,97
Pradera Natural	IX	1997	1188	170,7	0,32	0,24	0,06	1	0,79	0,63

* Fuente: Dirección General de Aguas y Dirección Meteorológica de Chile.

La evaluación del modelo USLE en Labranza Tradicional consideró la información proveniente de tres localidades y cuatro años diferentes, originando

cinco situaciones agroecológicas. Sólo en la localidad de Cauquenes, la diferencia pronosticada por el modelo y la observada experimentalmente, superó el margen

preestablecido de tolerancia del 50%. En cuatro de las cinco situaciones el modelo proporcionó estimaciones inferiores al valor de erosión observado experimentalmente y sólo en la localidad de Litueche en el año 1994, el modelo proporcionó una estimación levemente superior. En promedio la subestimación de la erosión fue de sólo $1,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$. Este comportamiento del USLE con respecto a la erosión real no fue estadísticamente significativo ($P(\chi^2 > 0,05)$), indicando esto que para labranza tradicional los pronósticos de erosión presentaron un muy buen grado de correspondencia con los observados experimentalmente. Se deduce entonces, que los valores asignados a los factores del modelo, en conjunto describieron las características agroecológicas que ellos representan, con la excepción de los factores erosividad de las precipitaciones (R) y erodabilidad del suelo (K) para Cauquenes.

Tabla 3. Erosión observados ($> 2.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$) y estimada por el modelo USLE, para cuatro diferentes prácticas de manejo en cinco localidades entre la IV y IX Región de Chile.

Observed erosion levels ($> 2.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$) and predicted by USLE model, for four different tillage practices in five locations between IV and IX Region of Chile.

Localidad	Año	Erosión ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$)	
		Observada	Estimada
Litueche	1993	3,21	2,91
Litueche	1994	4,63	5,42
Cauquenes	1993	8,80	3,52
Galvarino	1996	4,98	3,32
Galvarino	1997	6,64	6,60
Litueche	1994	2,52	1,08
Cauquenes	1993	4,90	0,70
Galvarino	1996	2,74	0,66
Galvarino	1997	3,97	1,32
Litueche	1994	7,26	5,42
Litueche	1993	4,41	5,81
Litueche	1994	24,69	10,85
Florida	1995	28,07	40,40
Florida	1994	31,38	35,04
Florida	1997	34,35	47,32
Sta. Bárbara	1979	22,44	16,80
Sta. Bárbara	1978	32,26	25,59
Sta. Bárbara	1981	34,28	21,44
Sta. Bárbara	1980	34,91	20,72

En mínima labranza, la erosión estimada por el modelo, consistentemente subestimó la erosión medida experimentalmente y excedió el margen de error tolerado. La información analizada, provino de cuatro

de las cinco situaciones agroecológicas, en las cuales el modelo fue exitosamente evaluado para labranza tradicional, por lo tanto en la evaluación del modelo en mínima labranza, el único factor que varió en el valor asignado fue el relacionado con cultivo y manejo del suelo (C), el cual sería el responsable de la subestimación en los pronósticos de la erosión. Del examen de la magnitud de las diferencias entre la erosión medida experimentalmente y la estimada por el modelo, se observó que mientras mayor fue el valor de la erosión medida experimentalmente, mayor fue la diferencia entre esta y la respectiva estimada, lo que indicaría que las estimaciones del modelo presentarían un sesgo asociado a la magnitud de la erosión real. Eliminado el sesgo de la fuente de error, las estimaciones a partir del modelo, no difirieron significativamente de la erosión medida en las parcelas experimentales ($P(\chi^2 > 0,05)$).

En pradera natural, se dispuso solamente de una zona agroecológica ubicada en la localidad de Litueche en 1994, lo que fue insuficiente para juzgar la utilidad del modelo para estimar la erosión. Sin embargo, el valor de erosión estimado no fue estadísticamente diferente del valor observado ($P(\chi^2 > 0,05)$) y la diferencia entre ambos valores no superó el margen de error de 50% del valor real.

En suelo desnudo, la información disponible para evaluar la capacidad predictiva del modelo USLE, provino de tres localidades y ocho años diferentes, esta diversidad de situaciones agroecológicas afectó negativamente al modelo en la capacidad predictiva de la erosión ($P(\chi^2 < 0,01)$). En cinco de las nueve situaciones el modelo subestimó la erosión real, coincidiendo cuatro de ellas con la localidad de mayor erosividad climática (Santa Bárbara), y la restante con Litueche en el año 1994. La erosión medida en estos casos, fue de gran magnitud superando las $22 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$ con diferencias entre la erosión estimada y real que no sobrepasó el margen de error predeterminado de 50%, con la excepción de Litueche en el mencionado año. En las cuatro restantes situaciones, tres en Florida y la otra en Litueche en año 1993, el comportamiento del modelo fue todo lo contrario, sobreestimó la erosión, aunque igualmente en ninguna de ellas las diferencias entre la estimación y el valor real de erosión fue superior al margen de error tolerado. Estos resultados indicaron un comportamiento diferencial del modelo USLE (sobre y sub- estimación), lo que sugirió que la evaluación del modelo en esta práctica de manejo fuese efectuada por localidad, que indirectamente estaría reflejando el régimen de lluvias.

En Florida, la información para evaluar la capacidad de pronóstico del modelo, provino de tres años diferentes, por lo tanto, es el factor asociado a la erosividad de la lluvia (R) el único que varió, siendo responsable de las diferencias anuales entre los valores estimados de la erosión, los cuales se mantuvieron en el margen de error tolerable. Con la información disponible no fue posible atribuir a alguno de los factores del modelo la constante sobrestimación en los pronósticos de la erosión. Esta constante sobrestimación, sugirió la presencia de un sesgo en la estimación de la erosión, el cual al ser descontado desde la fuente de error, la discrepancia entre la erosión observada y pronosticada no fue significativa ($P(\chi^2 > 0,05)$).

En Litueche, la evaluación de la erosión fue efectuada en dos años diferentes, en estos el modelo de pronóstico presentó un comportamiento opuesto, en 1993 sobrestimó la erosión mientras que en 1994 la subestimó, siendo las diferencias entre la erosión pronosticada por el modelo y la observada significativas al 5%. Este comportamiento del modelo sería consecuencia de una mala estimación del factor asociado a la erosividad de la precipitación.

En Santa Bárbara, el único factor variable en el modelo de pronóstico fue el de erosividad de las precipitaciones. Todas las estimaciones se enmarcaron dentro del margen de error tolerado y en todas se observó una subestimación del valor real de la erosión, lo que sugirió la presencia de un sesgo constante en todas las estimaciones. Descontado el efecto del sesgo, la validación del modelo USLE demostró que las estimaciones de erosión en suelo desnudo no superaron aquellas medidas experimentalmente ($P(\chi^2 > 0,05)$).

Al analizar globalmente los resultados en suelo desnudo, se puede apreciar que en todas las situaciones agroecológicas, con excepción de la localidad de Litueche en el año 1994, las estimaciones de erosión se mantuvieron dentro de los márgenes de exactitud propuesto y en todos estos casos (exceptuando Litueche 1993), la erosión fue considerable superando las $22 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$. Estos resultados demostraron que el método de USLE se comportó mejor en condiciones de mayor agresividad climática como fueron Florida y Santa Bárbara y en suelos desprovistos de cobertura vegetal, en los cuales los factores R y C pueden ser más fácilmente definidos.

CONCLUSIONES

La evaluación del modelo USLE en su bondad para pronosticar la erosión hídrica, fue efectuada estratificando la información por diferentes factores: nivel de erosión ($> 2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$), práctica de manejo y localidad, ya que evaluar el modelo considerando simultáneamente datos provenientes de una diversidad de zonas agroecológicas, incrementó la discrepancia acumulada entre la erosión observada y pronosticada por el modelo, superando esta el requerimiento de exactitud de 50% del valor real de la erosión ($\alpha = 0,05$).

En zonas agroecológicas de mayor precipitación (sobre 400 mm anuales) o con prácticas de manejo que favorecen la erosión ($> 2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$), tales como labranza tradicional y suelo desnudo, la erosión hídrica fue pronosticada adecuadamente por USLE.

En zonas agroecológicas de baja precipitación (menos de 300 mm anuales), o con manejos protectores de la erosión ($< 2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$), como cero labranza y pradera natural, el modelo USLE no presentó un buen comportamiento predictivo, como consecuencia de la baja erosión observada en esas situaciones.

En mínima labranza y con erosión mayor a $2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$ el modelo no proporcionó buenas estimaciones de erosión, debido posiblemente a que el factor R estimado a través de la aproximación de Arnoldus y el factor C, influyeron negativamente en su capacidad predictiva, como consecuencia de la inexactitud con que el primero representó la erosividad de la lluvia y el segundo, la capacidad protectora de la cubierta vegetal.

RESUMEN

EL modelo USLE para la estimación de la erosión fue evaluado en 42 situaciones agroecológicas en 6 localidades entre la IV y IX Región de Chile, con un rango de precipitación de 100 a 1800 mm. El modelo tuvo un buen comportamiento predictivo en localidades con una erosión significativa ($> 2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$) y con prácticas de manejo que favorecieron la erosión, como suelo desnudo y labranza tradicional, ya que los valores estimados por el modelo no superaron el 50 % del valor de erosión observado, con una probabilidad de 0,05. Con erosión sobre $2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}$ y práctica de manejo protectora del suelo como mínima labranza, el modelo no proporcionó buenas estimaciones de la erosión, debido principalmente al factor R estimado mediante la aproxi-

mación de Arnoldus, cuyos valores no proporcionaron la exactitud suficiente para estimar la erosividad de la lluvia, seguido del factor C en donde los valores asignados no cuantificaron adecuadamente las prácticas de manejo.

LITERATURA CITADA.

- Almorox, J., R. De Antonio, A. Saa, M. Cruz y J.M. Gasco. 1994. Métodos de estimación de la erosión hídrica. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid. España. 150 pp.
- Arnoldus, H. M. J. 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. En *Assesment of Erosion*. De Boot and Gabriels ed. John Wiley Sons. England. pp 125-132.
- Carrasco, C. 1990. Evaluación de las pérdidas de suelos por erosión hídrica bajo uso agrícola y forestal. Informe Técnico INIA pp. 29-36.
- ENDLICHER, W. 1988. El problema de la erosión del suelo en la Cordillera de la Costa de la VIII Región. *Revista de Geografía Norte Grande*. N° 15, pp 11-27.
- Gaete, N. 1999. Comparación de las pérdidas de suelo en una sucesión avena-trigo con tres sistemas de labranza en el secano interior de la IX región. Chile. Doc. Mimeo. pp 4.
- Gasto, J. 1993. En la Agricultura del Siglo XX. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. pp 47-77.
- Gatica, V. 1998. Validación de un modelo de simulación para procesos erosivos en la IV Región. Tesis Universidad de Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. 86 pp.
- Guevara, E. 1997. Manejo integrado de cuencas. Documento de referencia para los países de América Latina. FAO. RCL/97/04-FOR-54. Santiago. Chile. 14 pp.
- INIA. 1985. Suelos volcánicos de Chile. Editor Juan Tosso. Primera Edición. Santiago. Chile. 723 pp.
- Millas, G. 1977. Determinación de pérdidas de suelo utilizando la ecuación universal de la erosión en 10 localidades del sur de Chile. Tesis Universidad de Chile. Facultad de Agronomía. 110 pp.
- Moreira, J. M. 1991. Capacidad de uso y erosión de suelos. Una aproximación a la evaluación de tierras de Andalucía. Junta de Andalucía, Agencia de Medio Ambiente. España. 446 pp.
- Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación de suelo. Editorial Mundi-Prensa. Madrid España. 343 pp.
- Oyarzún, C. 1993. Estimación de los procesos de erosión hídrica en un ambiente montañoso de la cuenca del Río Bío-Bío, IX Región, Chile. Tesis U. de Concepción. Concepción, Chile. 150 pp.
- Peña, L. 1980. Determinación del factor R de la ecuación universal de predicción de la erosión hídrica en la provincia de Ñuble. *Agricultura Técnica* 40. pp 152-156.
- Peña, L. 1982. Determinación de los factores R, K y C de la ecuación de predicción de erosión, válidas para la precordillera de la VII región. Informe Final. Proyecto 2.01.27. Dirección de Investigación, Universidad de Concepción. 18 pp.
- Riquelme, J. 1994. Calibration of de Erosion-Productivity Model EPIC for three soil tillage systems in the secano interior of Chile. 8th ISCO Conference. New Delhi, India. 15 pp.
- Stocking, M. 1989. The economics of soil quality improvement: How to integrate technical information into decision-making. En *degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas*. CSIC. pp 171-189.
- Wischmeier, W. H. y D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA. Agricultural Research Service Handbook 537. 58 pp.