

GIS application of USLE and MUSLE to estimate erosion and suspended sediment load in experimental catchments, Valdivia, Chile

**Andrés Iroumé^{1*}, Patricio Carey¹, Axel Bronstert², Anton Huber³,
Hardin Palacios¹**

¹*Instituto de Manejo Forestal, Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile,
* airoume@uach.cl*

²*Institute of Earth and Environmental Sciences Hydrology & Climatology,
University of Potsdam, PO Box 601553, 14415 Potsdam, Germany.*

³*Instituto de Geociencias, Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile.*

Abstract

This paper presents the results of a research aimed to quantify suspended sediment transport in three experimental catchments in southern Chile, to compare measured suspended sediment load with estimated erosion using the Universal Soil Loss Equation (USLE) applied in a GIS environment and to validate the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) used to estimate suspended sediment loads from forest catchments. The catchments are Los Pinos (94.2 ha), Los Ulmos 1 (12.6 ha) and Los Ulmos 2 (17.7 ha). Soil losses estimated with USLE for the three catchments are higher than those measured in runoff experimental lots under bare soil conditions, which could indicate an overestimation of the LS calculated in GIS and the fact that the USLE model does not compute sediment deposit and storage within the catchment. A statistical significant relation was found between measured and estimated (MUSLE) suspended sediment load, which would indicate that this model could be applied to estimate suspended sediment load from small catchments in southern Chile.

Key words: suspended sediments, USLE, MUSLE, experimental catchments.

Aplicación SIG de USLE y MUSLE para estimar la erosión y el transporte de sedimentos en suspensión en cuencas experimentales, Valdivia, Chile

Resumen

Se presentan los resultados de una investigación tendiente a cuantificar el transporte de sedimentos en suspensión en tres cuencas experimentales del sur de Chile, comparar el transporte de sedimentos en suspensión medido con la erosión potencial de las cuencas aportantes estimada a través de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) aplicada en ambiente SIG y validar la Ecuación Universal Modificada de Pérdidas de Suelo (MUSLE) como instrumento para estimar el transporte de material en suspensión desde cuencas en ambientes forestales. Las cuencas son Los Pinos (94,2 ha), Los Ulmos 1 (12,6 ha) y Los Ulmos 2 (17,7 ha). Las pérdidas de suelo estimadas con USLE para las cuencas estudiadas son mayores que las medidas en parcelas de erosión en condiciones de suelo descubierto, cuestión que podría deberse a una sobrevaloración del factor LS calculado en base SIG y al hecho que este modelo no computa el depósito de los materiales al interior de la cuenca. Se encontró una relación estadísticamente significativa en-

tre carga de sedimentos en suspensión medida y estimada con la MUSLE, lo que indicaría que este modelo podría servir para estimar la carga de sedimentos en suspensión en pequeñas cuencas del sur de Chile.

Palabras clave: sedimentos en suspensión, USLE, MUSLE, cuencas experimentales.

Introducción

Las condiciones de disponibilidad de materiales y la capacidad de transporte del flujo definen los factores limitantes para el transporte sólido [1]. Para materiales más finos, el transporte está limitado por el suministro ya que la capacidad de la corriente para movilizar este tipo de sedimento excede en general la disponibilidad. Para los más gruesos, en cambio, el transporte sólido está restringido por la capacidad de transporte del agua.

El transporte sólido en suspensión es alimentado fundamentalmente por la erosión hídrica en la cuenca, pero no es fácil estimar qué parte del volumen de los sedimentos provenientes de la erosión son exportados de la cuenca en forma de sedimentos en suspensión, y qué ocurre con los sedimentos que la corriente de agua no transporta [1]. La proporción de sedimento que llega a la corriente y se moviliza con ella puede ser muy diferente en comparación con el movimiento bruto de sedimentos. Por una parte, mientras el sedimento procedente de erosiones de las riberas de la red de drenaje puede pasar inmediatamente al caudal y ser transportado, aquellos generados en las laderas de las cuencas pueden no llegar a los cauces al quedar atrapados en depresiones o por la vegetación ripariana a orilla de cauces [2, 3]. Además, en una cuenca el sedimento puede erosionarse y depositarse, y sucesivamente volverse a erosionar y depositar un cierto número de veces antes de llegar a la corriente, generándose un desfase entre la erosión en las laderas y el transporte de sedimento en los cauces.

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) descrita por Wischmeier y Smith [4] ha sido aplicada para estimar la erosión de suelos. La USLE original se ha modificado [5], pero siempre basándose en el mismo concepto que los factores de erosividad de las lluvias, erodabilidad del suelo, longitud de la pendiente, inclinación de la pendiente, cubierta del suelo y prácticas de manejo son directamente proporcionales a la tasa anual de erosión. La utilización de la USLE en ambiente SIG permite estimar las tasas de

erosión en cuencas, aún cuando los factores longitud e inclinación de la pendiente deben ser cuidadosamente calculados [6]. Entre las modificaciones de la USLE, Williams y Berndt [7] reemplazan el factor de energía de la lluvia por un factor de escurrimiento y proponen un modelo para predecir la carga de sedimentos desde cuencas por eventos de crecida usando la Ecuación Modificada de Pérdidas de Suelo o MUSLE.

Este trabajo reporta los resultados de un estudio tendiente a cuantificar el transporte de sedimentos en suspensión en tres cuencas experimentales del sur de Chile, a comparar la relación entre el transporte de sedimentos y la erosión potencial de las cuencas aportantes determinada a través de la USLE aplicada en ambiente SIG y a evaluar el potencial de la MUSLE como instrumento para estimar el transporte de material en suspensión.

Metodología

Área de estudio

Son tres cuencas ubicadas en la Región de Los Ríos, Chile. En el sector Los Pinos está la cuenca LP (94,2 ha), cubierta por plantaciones de *Pinus radiata* (17,9% del total de la cuenca), de *Eucaliptus spp.* (15,3%), de *Nothofagus alpina* (6,3%) y de *Acacia melanoxylon* (0,3%), con un 36,5% de renovales creciendo sobre antiguas praderas y el 23,6% restante es vegetación ripariana a orilla de cauces. Los renovales y la vegetación ripariana están compuestos principalmente por especies nativas entre las que destacan *Nothofagus spp.* En el sector de Los Ulmos están las cuencas Los Ulmos 1 (LU1, 12,6 ha) y Los Ulmos 2 (LU2, 17,7 ha). El 81% de la superficie de LU1 está cubierta con una plantación de *Eucalyptus nitens* y el resto corresponde a vegetación ripariana y caminos. En LU2, el 68% de la superficie está bajo plantaciones (7,3 ha de *Eucalyptus nitens* y 3,7 ha de *Pinus radiata*) y el 32% restante son caminos, vegetación ripariana y varios rodales de diferentes especies. La composición de la vegetación ripariana en LU es similar a LP.

Mayores antecedentes de estas cuencas están en Iroumé y col. [8].

Registros de precipitación, caudal y sedimentos en suspensión

La precipitación se registró con pluviógrafos digitales y los caudales en estaciones fluviométricas con vertederos de pared delgada de sección y curva de aforo conocidos, y dotadas de limnógrafos con almacenamiento digital de datos.

La concentración de sedimentos en suspensión se determinó en cada cuenca a partir de muestras de agua recolectadas en las estaciones fluviométricas. Se generó una muestra integrada compuesta de submuestras recolectadas a intervalos regulares, de volumen proporcional al caudal del instante. Al final de cada periodo se sacó del estanque acumulador una sub-muestra que fue filtrada y pesada para determinar la concentración de sedimentos en suspensión (g/L), considerada la concentración promedio de sedimentos en suspensión del periodo.

El estudio se realizó entre diciembre de 2005 y enero de 2007, con periodos de muestreo de aproximadamente un mes.

Métodos de estudio

Con Q_m (caudal medio por periodo, m^3/s) y C_m (concentración promedio de sedimentos en suspensión del periodo, g/L) y usando la fórmula del balance parcial definida por Probst [9] se obtuvo la carga de sedimentos en suspensión por periodo de muestreo y cuenca.

La erosión media en cada cuenca por periodo de análisis se estimó usando la USLE:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

siendo A la pérdida de suelo estimada en la superficie definida en K y por el periodo de tiempo considerado en R, R la erosividad de las precipitaciones por periodo de estudio, K la erosionabilidad del suelo, L y S los parámetros de longitud y pendiente de la ladera y C el parámetro cultivo. El factor P tomó un valor 1 por tratarse de cuencas forestales [4-10].

El factor R por periodo se obtuvo con los aguaceros mayores a 13 mm en 6 horas, descartándose los que no superaron este umbral a ex-

cepción de aquellos con intensidad superior a 24 mm/h en 15 minutos [5]. La erosividad por evento, R_j ($hJ \cdot cm/m^2 \cdot h$), se calculó de Almorox y col. [10] para luego agregarlos y obtener el valor de R del periodo en $MJ \cdot mm/ha \cdot h$.

En LP se obtuvo el factor K ($t \cdot h \cdot ha/MJ \cdot mm \cdot ha$) por tipo de cobertura de Stolzenbach [11]. En LU 1 y 2 se tomaron muestras de suelo bajo cada tipo de cobertura para determinar la distribución granulométrica y el diámetro medio geométrico (Dg), y calcular K por tipo de cobertura según Renard y col. [5]. El factor C por cobertura se obtuvo como el producto de tres subfactores generados de forma gráfica según Wischmeier y Smith [4], a partir de las estimaciones en terreno del porcentaje de cobertura vegetal aérea y altura media de caída de la gota de agua, del porcentaje de la superficie del suelo cubierto por hojarasca y otros restos y del porcentaje de raíces en la capa superficial del suelo.

Para calcular K y C por cuenca, las coberturas se clasificaron en Renoval (renovales de especies nativas con presencia de *Nothofagus spp.*), Protección (vegetación ripariana), Pino (plantaciones de coníferas principalmente *Pinus radiata*), Eucalipto (plantaciones de *Eucalyptus spp.*), Raulí (plantaciones de *Nothofagus alpina*) y Aromo (plantaciones de *Acacia melanoxylon*). Los factores K y C por cuenca se calcularon ponderando los factores K y C por cobertura por su participación en la superficie total de cada cuenca.

El factor LS a nivel de cuenca se determinó de Mitsova y col. [6] quienes proponen la siguiente ecuación para calcular LS en un punto $p=(x,y)$ de una ladera:

$$LS(p) = (m + 1) \left(\frac{A(p)}{a_0} \right)^m \left(\frac{\text{sen } b(p)}{b_0} \right)^n \quad (2)$$

con A(p) el área aportante aguas arriba del punto p, dividida por la resolución de la celda (m); b(p) la pendiente en grados de la ladera en el punto p; m y n parámetros que asumen los valores $m=0,6$ y $n=1,3$; a_0 y b_0 la longitud y pendiente de la parcela estándar USLE (22,1 m; 9%). Se implementó esta ecuación en base SIG y generó el mapa digital del factor LS para cada cuenca según el protocolo de aplicación en ArcGIS 8.1[®] de Mitsova y col. [6].

Con los valores de los factores R, K, LS y C se generó en ArcView 3.x[®] un mapa digital con la

distribución espacial por factor para cada cuenca, se estimó la pérdida de suelo con el calculador de mapas y se obtuvo el mapa de estimación de la erosión, en el que cada celda contenía el valor estimado de erosión para dicha superficie en el periodo estudiado. El valor de pérdida de suelo en la cuenca se calculó de la suma de todas las celdas de cada cuenca.

Para estimar el transporte de sedimentos en las tres cuencas estudiadas se usó la MUSLE [7], cuya expresión es:

$$Y = \alpha \cdot (V \cdot Q_{\max})^{0,56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (3)$$

con Y (t/evento) la carga de sedimentos, α un coeficiente empírico, V (m^3) el volumen de la escorrentía del evento, Q_{\max} (m^3/s) el caudal máximo del evento, y K , L , S , C y P los factores de la USLE descritos anteriormente. En este estudio, se utilizó esta ecuación para estimar la carga de sedimentos para cada periodo y cuenca (es decir, Y en t/periodo), usando los valores calculados de los factores K , L , S , C y P para la aplicación SIG de la USLE para las distintas cuencas, con V (m^3) y Q_{\max} (m^3/s) el volumen de la escorrentía total y el caudal máximo de cada periodo, respectivamente, obtenidos de los registros limnigráficos de cada cuenca, y el coeficiente α calculado empíricamente mediante un proceso de optimización que minimiza la suma de las diferencias al cuadrado entre la carga de sedimentos en suspensión medida (TSS) y estimada (Y).

Las relaciones entre el transporte de sedimentos medido y las estimaciones de erosión potencial con USLE y transporte de sedimentos con MUSLE fueron comparadas mediante la prueba F y los coeficientes de determinación y desempeño [12].

Resultados y discusión

Precipitación, escorrentía y carga de sedimentos en suspensión por cuenca y periodo

La precipitación y la escorrentía por cuenca y periodo se presentan en la Tabla 1. En esta misma tabla se incluye la carga de sedimentos en suspensión, también por cuenca y periodo.

Aun cuando el periodo de estudio en el caso de LP es algo inferior a un año y en el de las cuencas LU algo mayor a un año, los coeficientes de escorrentía (razón entre escorrentía y precipitación durante el periodo de estudio) en estas cuencas pueden aproximarse a valores anuales. Así, los coeficientes de escorrentía anuales para LP, LU1 y LU2 para el año 2006 son 0,67, 0,66 y 0,70, respectivamente. Los coeficientes resultan muy similares entre sí, y pueden compararse con el registrado para la cuenca LP en el periodo agosto 1988-julio 1989 que alcanzó un valor de 0,53 [13]. Los mayores coeficientes de escorrentías registrados el año 2006 se explican por las mayores precipitaciones del año (3156 mm), en comparación con los 1645 mm registrados en 1988-89 [13].

La carga de sedimentos fue 4,35 t/ha en LP, 1,63 t/ha en LU1 y 2,72 t/ha en LU2 (Tabla 1). A pesar que las tres cuencas se ubican en ambientes forestales y que durante el periodo de estudio no se llevaron a cabo operaciones que pudieran haber expuesto a los suelos a procesos erosivos, la carga de sedimentos en suspensión (t/ha) es estadísticamente diferente entre las cuencas (ANOVA, $P \leq 0,01$). En la cuenca LP, para el periodo agosto 1988-julio 1989 (precipitación y escorrentía total para los 12 meses de 1645 y 672 mm, respectivamente) [13], reporta una carga de sedimentos de sólo 0,03 t/ha, aun cuando este estudio se desarrolló en un periodo de muy bajas precipitaciones.

Erosión estimada mediante USLE por cuenca y periodo

La erosividad total calculada en la cuenca LP entre el 23 de diciembre de 2005 y el 20 de enero de 2007 (descontando el periodo del 8 de abril al 7 de mayo de 2006 que no fue considerado en el estudio) fue de 3526 MJ·mm/ha·h. En la ubicación de las cuencas LU la erosividad durante el estudio (20 de diciembre 2005 a 23 de enero de 2007) alcanzó 5583 MJ·mm/ha·h. Las tormentas erosivas en LP se caracterizan por intensidades moderadas en eventos prolongados, mientras que en LU las lluvias fueron más intensas y cortas.

Para LP, K resultó 0,03459 t·ha·h/MJ·mm·ha, mientras que en Los Ulmos, K fue

Tabla 1
Precipitación (P) y escorrentía (Q) por periodo y total anual por cuenca, caudal y concentración de sedimentos en suspensión medios y carga de sedimentos en suspensión, y erosión estimada con USLE, por periodo y cuenca

Cuenca	Precipitación y escorrentía por periodo		Caudal y concentración de sedimentos en suspensión			Erosión estimada con USLE			
	P mm	Q mm	\bar{Q} L/s	CSS g/L	TSS T	TSS _u t/ha	R MJ·mm/ha·h	A t/ha	
LP	23/12/05 a 28/01/06	247,0	125,1	37,4	0,140	16,31	0,17	293,9	1,1
	29/01/06 a 07/03/06	67,2	65,6	18,5	0,015	0,91	0,01	21,1	0,1
	08/03/06 a 07/04/06	92,4	76,0	32,2	0,134	11,55	0,13	172,8	0,7
	08/05/06 a 09/06/06	434,8	182,8	52,8	0,276	40,23	0,43	438,5	1,6
	10/06/06 a 30/06/06	451,6	164,7	79,9	0,346	50,09	0,53	767,6	2,9
	01/07/06 a 19/07/06	453,6	205,0	126,6	0,375	77,89	0,83	1038,2	3,9
	20/07/06 a 17/08/06	444,4	327,8	136,5	0,350	119,78	1,27	441,7	1,7
	18/08/06 a 21/09/06	212,8	265,2	81,7	0,261	64,42	0,68	228,5	0,9
	22/09/06 a 20/10/06	155,6	161,1	61,7	0,127	19,62	0,21	35,5	0,1
	21/10/06 a 20/11/06	114,4	132,4	46,9	0,032	3,81	0,04	38,0	0,1
	21/11/06 a 19/12/06	61,6	97,7	36,8	0,016	1,46	0,02	23,0	0,1
	20/12/06 a 20/01/07	73,0	87,3	30,0	0,047	3,65	0,04	26,9	0,1
	Total	2808,4	1890,8			409,7	4,35	3525,6	13,2

Tabla 1 (Continuación)

Cuenca	Período	Precipitación y escorrentía por período		Caudal y concentración de sedimentos en suspensión		Erosión estimada con USLE			
		P mm	Q mm	\bar{Q} L/s	\overline{CSS} g/L	TSS T	TSS _u t/ha	R MJ·mm/ha·h	A t/ha
	20/12/05 a 27/01/06	254,5	94,2	3,6	0,020	0,24	0,02	319,9	1,64
	28/01/06 a 09/03/06	49,4	46,6	1,7	0,004	0,03	0,01	16,2	0,1
	10/03/06 a 02/05/06	406,6	142,2	3,8	0,055	0,98	0,08	1095,3	5,6
	03/05/06 a 02/06/06	308,9	107,5	5,0	0,103	1,38	0,11	1234,9	6,3
	03/06/06 a 03/07/06	690,8	649,9	29,9	0,025	2,02	0,16	1267,7	6,4
	04/07/06 a 21/07/06	331,2	296,3	25,2	0,092	5,58	0,44	334,9	1,7
LU1	22/07/06 a 22/08/06	544,2	520,8	23,5	0,092	6,01	0,48	426,3	2,2
	23/08/06 a 22/09/06	251,2	172,5	8,3	0,144	3,19	0,25	387,6	2,0
	23/09/06 a 17/10/06	156,0	84,6	4,9	0,067	0,71	0,06	30,3	0,2
	18/10/06 a 16/11/06	219,7	107,6	5,2	0,008	0,11	0,01	161,7	0,8
	17/11/06 a 21/12/06	154,4	61,6	2,6	0,010	0,08	0,01	149,1	0,8
	22/12/06 a 23/01/07	160,7	46,9	2,1	0,030	0,17	0,01	158,7	0,8
	Total	3527,7	2330,6			20,5	1,63	5582,5	28,4

Tabla 1 (Continuación)

Cuenca	Precipitación y escorrentía por periodo		Caudal y concentración de sedimentos en suspensión		Erosión estimada con USLE				
	P mm	Q mm	\bar{Q} L/s	\overline{CSS} g/L	TSS _u t/ha	R MJ·mm/ha·h	A t/ha		
LU2	20/12/05 a 27/01/06	254,5	92,5	4,9	0,103	1,66	0,09	319,9	1,3
	28/01/06 a 09/03/06	49,4	65,6	3,3	0,016	0,18	0,01	16,2	0,1
	10/03/06 a 02/05/06	406,6	157,7	5,9	0,346	9,59	0,54	1095,3	4,3
	03/05/06 a 02/06/06	308,9	110,5	7,2	0,113	2,18	0,12	1234,9	4,8
	03/06/06 a 03/07/06	690,8	665,5	42,9	0,079	9,12	0,52	1267,7	5,0
	04/07/06 a 21/07/06	331,2	321,5	36,9	0,065	5,79	0,33	334,9	1,3
	22/07/06 a 22/08/06	544,2	499,4	31,8	0,109	9,33	0,53	426,3	1,7
	23/08/06 a 22/09/06	251,2	196,1	13,0	0,235	8,20	0,46	387,6	1,5
	23/09/06 a 17/10/06	156,0	88,8	7,3	0,036	0,56	0,03	30,3	0,1
	18/10/06 a 16/11/06	219,7	120,6	8,2	0,004	0,09	0,01	161,7	0,6
	17/11/06 a 21/12/06	154,4	81,0	4,7	0,031	0,43	0,02	149,1	0,6
	22/12/06 a 23/01/07	160,7	83,3	5,2	0,068	0,97	0,05	158,7	0,6
	Total	3527,7	2482,5			48,1	2,72	5582,5	21,9

0,03439 y 0,03443 t·ha·h/MJ·mm·ha para LU1 y LU2, respectivamente. Respecto a los valores C, este factor alcanzó un valor de 0,0106 en LP, y 0,0327 y 0,0212 para LU1 y LU2, respectivamente. El valor medio calculado del factor LS fue de 8,88 en la cuenca LP, 4,03 en LU1 y 4,19 en LU2. En el caso de LP, el 10% de las celdas presentó valores de LS superiores a 20, mientras que en las cuencas LU, el 10% presentó valores mayores a 15.

Las tasas de erosión estimadas con la USLE para las cuencas LP, LU1 y LU2 se presentan en Tabla 1. Para LP, la erosión estimada en el periodo el 23 de diciembre de 2005 y el 20 de enero de 2007 (no se consideró el periodo del 8 de abril al 7 de mayo de 2006) fue de 13,2 t/ha. En el periodo 20 de diciembre 2005 a 23 de enero de 2007, se estimó tasas de erosión de 28,4 y 21,9 t/ha para las cuencas LU1 y LU2, respectivamente. Puesto que el periodo de estudio excede por poco el año 2006, estas tasas de erosión pueden aproximarse a 13,2 t/ha/año para LP y a 28,4 y 21,9 t/ha/año para las cuencas LU1 y LU2, respectivamente. Los valores estimados con la USLE son mayores que las pérdidas tolerables de 12,5 t/ha/año que se podrían admitir para suelos profundos como los de las áreas de estudio [2], y además son muy altas si se consideran las coberturas de bosques en las cuencas. En laderas bajo praderas o bosques ubicadas muy cerca de la cuenca LP, se han medido tasas de erosión inferiores a 0,1 t/ha en parcelas de 22 a 30% pendiente y en periodos de entre 120 y 168 días con precipitaciones de 715 y 1532 mm [11-14].

En las cercanías de la cuenca LP, en parcelas de suelo desnudo sin cubierta luego de la cosecha a tala rasa del bosque preexistente, Stolzenbach [11] registró 0,3 t/ha en parcelas de 28% de pendiente (153 días, 1085 mm de precipitación), Iroumé y col. [14] reportan tasas de erosión de 1,6, 1,9 y 3,9 t/ha en laderas de 30, 50 y 60% de pendiente (120 días de registro y 715 mm de precipitación total) y finalmente Díaz [15] en parcelas de 22% de pendiente (159 días, 1711 mm de precipitación) midió 1 t/ha en un sitio donde los residuos habían sido quemados y 0,9 t/ha donde los residuos de la cosecha fueron retirados manualmente.

Una posible explicación a la sobrevaloración de las tasas de erosión al aplicar la USLE a

nivel de cuencas puede ser la sobreestimación del factor LS, cuestión que se aprecia en este estudio cuando se analiza los valores de LS en las cuencas estudiadas, notándose valores muy elevados en las zonas con fuertes pendientes (elevado factor S) y en los cursos de agua (elevado factor L). Otra explicación de la sobreestimación de las tasas de erosión obtenidas con la USLE utilizada en cuencas es el hecho que esta aplicación no computa el depósito de los materiales al interior de la cuenca [6].

Respecto a la sobrevaloración del factor LS, Iroumé y col. [16] proponen controlar su valor asignando a las celdas con pendiente superior a 50% (23°) el valor máximo obtenido para el resto de celdas y limitando la longitud del flujo acumulado (factor L) a 100 metros en los cursos de agua. La primera de estas restricciones se sustenta en las apreciaciones de Almorox y col. [10], quienes observan que numerosos estudios muestran que para pendientes superiores al 50% los valores de erosión se mantienen relativamente constantes, mientras que el valor de erosión que entrega la USLE sigue aumentando para valores crecientes de S (y consecuentemente de LS). Sin embargo, esta restricción es sin duda cuestionable, ya que por ejemplo Iroumé y col. [14] midieron en parcelas de 60% de pendiente tasas de erosión dos veces superiores a las registradas en parcelas con pendiente de 50%. La segunda restricción parece tener más sentido, ya que la USLE es un modelo de estimación de pérdidas de suelo en laderas y no en la red de drenaje. Limitando el valor máximo de S a 50% (23°) y el de L a 100 m en los cursos de agua, en el caso de LP el factor LS se reduce de 8,88 a 6,24. Manteniendo el resto de los factores de la USLE constantes, la erosión estimada con esta ecuación para LP se reduce a unas 9,2 t/ha/año, cifra que sigue siendo superior a las tasas de erosión medidas por Stolzenbach [11], Iroumé y col. [14] y Díaz [15] en parcelas cercanas a esta cuenca. La valoración del factor LS incide en los valores estimados y surge como una necesidad de investigación futura la exploración de la modificación del algoritmo considerando este aspecto.

En la Tabla 1 se ve que en los eventos donde USLE estima valores superiores a los observados, el valor de R es alto. Esto podría deberse a que la USLE no computa el depósito de los mate-

riales al interior de la cuenca, y es posible que ésta sea la mayor limitante para utilizar este modelo en la estimación de tasas de erosión a nivel de cuencas. Esta cuestión ha sido resuelta en la Revised Universal Soil Loss Equation [5].

Dadas estas limitaciones, la USLE no permitiría generar con suficientes niveles de confianza valores absolutos de pérdidas de suelo en cuencas, pero si podría usarse conceptualmente para obtener un ranking relativo de las áreas productoras de sedimentos al interior de una cuenca determinada.

Según los datos de Tabla 1, se ve que las cargas de sedimentos medidos en los cauces son menores a la erosión estimada en las respectivas cuencas. La relación entre tasas de erosión y carga de sedimentos en suspensión por periodo es muy variable y no es posible ajustar un modelo estadísticamente significativo. Sin embargo, calculando el coeficiente empírico α de la MUSLE la ecuación (3) se transforma en:

$$Y = 28,98 \cdot (V \cdot Q_{\max})^{0,56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (4)$$

generando entre TSS e Y una relación estadísticamente significativa ($P \leq 0,01$ según la prueba F; $R^2 = 0,73$; coeficiente de desempeño 0,35 que refleja un buen ajuste) (Figura 1).

El modelo MUSLE fue calibrado por Williams y Berndt [7] usando 778 tormentas en 18 cuencas con superficies de 15 a 1500 hectáreas obteniendo un coeficiente α de 11,5. La diferencia con el valor del coeficiente α en este estudio puede deberse a que Williams y Berndt [7] trabajaron con eventos individuales y en este caso se trabajó por periodos de aproximadamente un mes. La relación estadísticamente significativa entre TSS e Y que muestra la Figura 3 indica que el modelo MUSLE puede servir para estimar la carga de sedimentos en suspensión en pequeñas cuencas del sur de Chile.

Se aplica el modelo MUSLE en la cuenca LU1 para simular el efecto de la cosecha a tala rasa de la plantación de *Eucalyptus nitens* que cubre el 81% de la superficie de esta cuenca. Para esta condición hipotética de post-cosecha MUSLE simula un aumento considerable en la producción de sedimentos. Por ejemplo, para el periodo 3 de junio a 3 de julio de 2006, la produc-

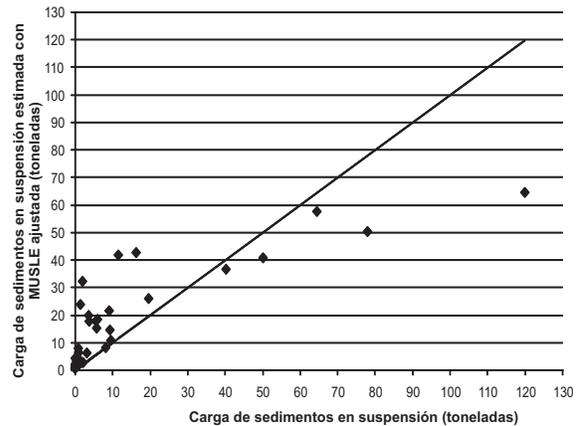


Figura 1. Relación entre carga de sedimentos en suspensión medida y estimada con MUSLE por periodo, todas las cuencas.

ción de sedimentos aumentaría a 18,1 t/ha en comparación con los valores correspondientes a la condición de cobertura actual que entregan 0,16 t/ha. Aumentos desde 0,2 t/ha/mes a 6,5 t/ha/mes luego de la cosecha a tala rasa del 50% de la plantación existente en una cuenca de 17,8 ha en las cercanías de Valdivia han sido reportados por Iroumé y col. [16]. Para la cuenca LU1, la producción total de sedimentos para el periodo estudiado aumentaría de 1,6 a 51,5 t/ha luego de la cosecha.

Conclusiones

Las pérdidas de suelo estimadas con USLE para las tres cuencas estudiadas son mayores que las medidas en parcelas de erosión incluso en condiciones de suelo descubierto, cuestión que podría deberse a una sobrevaloración del factor LS calculado en base SIG y al hecho que esta aplicación no computa el depósito de los materiales al interior de la cuenca. Esto ya ha sido destacado en otras investigaciones, y aun cuando se han propuesto algunos procedimientos para fijar los límites superiores del valor del factor LS, el hecho que la USLE no cuantifica la sedimentos al interior de la cuenca es sin duda la mayor limitante para utilizar este modelo en la generación de valores absolutos de pérdidas de suelo en cuencas, pero si podría usarse conceptualmente para obtener un ranking relativo de las áreas productoras de sedimentos al interior de una cuenca determinada.

Se encontró una relación estadísticamente significativa entre carga de sedimentos en suspensión medida y estimada con la MUSLE, por lo que este modelo podría servir para estimar la carga de sedimentos en suspensión en pequeñas cuencas del sur de Chile.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto CONICYT/BMBF 074-4-2006.

Referencias bibliográficas

1. Julien P.Y., "Erosion and sedimentation", Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, (1994).
2. FAO, "Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía", Boletín FAO de Suelos N° 68, Roma, Italia, (1987).
3. Pearce R., Frasier G., Trlica M., Leininger W., Stednick J. y Smith J., "Sediment filtration in a montane riparian zone under simulated rainfall", *Journal of Range Management*, 51(3), (1998), 301-308.
4. Wischmeier W.H. y Smith D.D., "Predicting rainfall erosion losses", *A Guide for Conservation Planning*, USDA Agriculture Handbook 537, Washington, USA, (1978).
5. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K. y Yoder D.C., "Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", *Agric.Handb.703*, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC, (1997).
6. Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M. y Iverson L.R., "Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS", *Int. Journal of Geographical Information Science*, 10 (5), (1996), 629-641.
7. Williams J.R. y Berndt H.D., "Sediment yield prediction based on watershed hydrology", *Transactions of the ASAE*, 20(6), (1977), 1100-1104.
8. Iroumé A., Mayen O. y Huber A., "Runoff and peak flow responses to timber harvest and forest age in Southern Chile", *Hydrological Processes*, 20 (1), (2006), 37-50.
9. Probst J.L., "Dissolved and suspended matter transported by the Girou River (France): mechanical and chemical erosion rates in a calcareous molasse basin", *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), (1986), 61-79.
10. Almorox J., De Antonio R., Saa A., Díaz M.C. y Gascó J.M., "Métodos de estimación de la erosión hídrica", Editorial Agrícola Española, Madrid, España, (1994).
11. Stolzenbach C., "Generación de caudales y cuantificación de pérdidas de suelo en suelo rojo arcillosos en la Provincia de Valdivia, X Región", Tesis Ingeniero Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, (1998).
12. Freese F., "Statistics for land managers", Paeony Press, Scotland, (1984).
13. Rodríguez D., "Escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca de la Décima Región", Tesis Ingeniero Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, (1991).
14. Iroumé A., Gayoso J. y Infante L., "Erosión hídrica y alteración del sitio en cosecha a tala rasa", *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol*, 26 (2), (1989), 171-180.
15. Díaz O., "Estudio de fragilidad de suelos y aplicación de la USLE en base SIG para la microcuenca El Maqui, Sexta Región, Chile", Tesis Ingeniero Forestal, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, (2005).
16. Iroumé A., Huber A. y Palacios H., "Report on basin response for Chile", Deliverable 17 Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt, INCO-CT2004-510739, Universidad Austral de Chile, Chile, (2007).

Recibido el 25 de Marzo de 2010

En forma revisada el 30 de Mayo de 2011