

Operaciones forestales y concentración de sedimentos en cauces naturales II: Análisis de sensibilidad y comparación con otros modelos

Forest operations and sediment concentration in natural streams II:
Analysis of sensibility and comparison with other models

EMILIO D. FUENTES¹, CARLOS A. BONILLA², JUAN J. TRONCOSO³

¹ Granaderos 991, Santiago, Chile. fuentesemilio@hotmail.com

² Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile. cbonilla@puc.cl

³ Departamento de Ciencias Forestales, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile. jtruncot@puc.cl

SUMMARY

In this study, a model to estimate the sediment concentration in natural streams of forest river basins proposed by Fuentes *et al.* (2001) is analyzed and validated. The estimations are also compared with those obtained using two models proposed by other authors. The results, when using the model, allow estimations with R^2 coefficients over 0.90. The model is statistically significant to 99% and does not present auto-correlation. After comparing the models developed by Dendy and Bolton (1976) and Fleming (1969), it was observed that the best estimation of sediment concentration was obtained using the proposed model by Fuentes *et al.* (2001). This was because the other models gave an over-estimation of values. On the other hand, and based on the analysis of sensibility, it was possible to conclude in this case that precipitation and discharge explained the main part of sediments. These are increased when the forest harvest leaves the soil bare and susceptible to erosion by rain. These results demonstrate the convenience of using this type of model to estimate the sediment production in a micro-basin of the Eighth Region of Chile, which have similar hydrological and forest characteristics.

Key words: erosion, regression models, water profity, forest production.

RESUMEN

En este trabajo se analiza y valida el modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001) para estimar la concentración de sedimentos en cauces naturales de cuencas forestales y se comparan sus estimaciones con las obtenidas al emplear dos modelos propuestos por otros autores. Los resultados obtenidos al emplear el modelo permiten obtener estimaciones con coeficientes R^2 superiores a 0,90. El modelo es estadísticamente significativo al 99% y no presenta autocorrelación.

De la comparación con los modelos desarrollados por Dendy y Bolton (1976) y Fleming (1969), se observó que la mejor estimación de la producción de sedimentos se obtuvo con el modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001), dado que los otros modelos sobreestiman los valores. Por otra parte, y producto del análisis de distintos escenarios, se puede concluir que en este caso la variable precipitación y caudal provocan la mayor respuesta sobre la magnitud de los sedimentos, la que se incrementa con la cosecha forestal al dejar el suelo descubierto y propenso al efecto de las lluvias. Los resultados obtenidos demuestran la conveniencia de utilizar este tipo de modelo para estimar la concentración de sedimentos en una subcuenca de la VIII Región de Chile, con características hidrológicas y forestales similares.

Palabras claves: erosión, modelo de regresión, calidad del agua, producción forestal.

1. INTRODUCCION

La modelación de los procesos erosivos y de la concentración de sedimentos en cauces naturales puede proveer la información necesaria para formular políticas que permitan controlar la degradación de los suelos y las cuencas hidrográficas (Ashraf y Borah, 1992). Sin embargo, muchos de los modelos existentes no incluyen variables de manejo forestal. De esta manera, se hace imprescindible desarrollar herramientas que permitan predecir y cuantificar las alteraciones que producen las diversas actividades forestales sobre el ambiente, a fin de implementar mecanismos que ayuden a mitigar y controlar la degradación de los suelos, así como los efectos provocados por los sedimentos en los ríos, como el relleno de los cauces y de los canales de riego, disminuyendo la calidad del agua y vida útil de éstos (Guevara, 1997). Los modelos así desarrollados pueden revertir la imagen negativa de un sector productivo de vital importancia a nivel nacional, ya que diversos estudios han demostrado que la agricultura intensiva es la principal actividad que influye sobre la erosión y sedimentación (Vaithiyathan y Correll, 1992; Guevara, 1997; Nelson *et al.*, 1996).

Para que los modelos puedan ser utilizados con estos fines es necesario realizar una validación de los mismos, así como un análisis y verificación de éstos frente a distintas situaciones edafoclimáticas y de manejo (Hirschi y Barfield, 1988), como asimismo comparar distintos modelos y observar cuál se adapta mejor a una determinada situación.

De acuerdo a esto, el objetivo de este estudio fue validar y analizar la respuesta del modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001) ante distintas situaciones climáticas y de manejo en una subcuenca del Río Biobío, en la VIII Región de Chile. Además, se comparan sus resultados con los obtenidos al emplear otros modelos de estimación de concentración de sedimentos.

2. MATERIAL Y METODOS

El modelo propuesto se construyó para la subcuenca del Río Vergara que se desarrolla con orientación del sureste-noroeste, entre los paralelos 37°33'S y 38°13'S y los meridianos 71°35'O y 72°52'O, cuyas características se detallan en el trabajo de Fuentes *et al.* (2001).

De este modo, el modelo analizado es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10} \text{SS}_i = & 0,9421 - 0,3600 * \text{Log}_{10} \text{Q}_i + 0,4049 * \\ & \text{Log}_{10} \text{P}_i + 0,1899 * \text{Log}_{10} \text{FC}_{i-5} + 0,1377 * \\ & \text{Log}_{10} \text{LC}_{i-6} \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Donde SS: sólidos suspendidos (mg/l)
Q: caudal (l/s)
P: precipitación (mm)
FC: flujo de camiones (número/día)
LC: longitud de caminos (km)
i: mes (enero a diciembre)

La información hidrológica y de los sólidos suspendidos se obtuvo de la base de datos de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile y, además, se empleó información sobre el manejo de los predios forestales de la zona entre 1987 y 1991, proporcionada por una empresa forestal.

Para validar el modelo se seleccionó una serie de datos independientes de los valores usados para calibrarlo y se emplearon para estimar el valor de la variable dependiente utilizando los coeficientes del modelo obtenido en la calibración. Con este fin se utilizó el programa Statgraphics plus v.4 en el cálculo de las regresiones lineales y el posterior análisis estadístico.

En este sentido, uno de los métodos más convenientes en situaciones como la aquí analizada consiste en hacer una doble validación cruzada, de acuerdo a la cual se divide la muestra en dos, y cada una de las partes se utiliza para estimar la otra (Peña, 1991). Es decir, con la primera mitad de los datos se calibra un modelo y se estiman los valores de la segunda mitad; posteriormente, con la segunda mitad se calibra otro modelo y se estiman los valores de la primera serie de datos. De esta forma, si el modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001) estima adecuadamente los valores de la variable dependiente, se esperarían valores de R² altos para las dos estimaciones de sólidos suspendidos con los modelos calibrados en la primera parte de la validación, que deberían ser alrededor de 0,8 según investigaciones similares (Williams y Berndt, 1977; Nearing *et al.*, 1989). De acuerdo a esto, la validación del modelo se realizó según el método anterior.

El análisis de escenarios, cuyas variables son el caudal, la precipitación, el flujo de camiones y la

longitud de caminos utilizados al interior de los predios cosechados, consistió en evaluar la respuesta del modelo frente a un aumento y disminución en los valores de cada variable en un 25%, manteniendo las demás variables constantes. Con esto se determinó la sensibilidad de cada una y se observó cuál fue la variable con más efecto sobre la producción de sedimentos. Posteriormente, se comparan sus resultados con otros dos modelos que no incluyen variables forestales y con el nivel real de sólidos suspendidos producidos en la cuenca. Los dos modelos a comparar son propuestos por Dendy y Bolton (1976) y Fleming (1969), citados en Almorox *et al.* (1992). El primero define dos ecuaciones según el nivel de escorrentía en la cuenca, que en este caso es superior a 50 mm/año. De este modo, la formulación de cada uno es la siguiente:

Dendy y Bolton:

$$S = 685,79 \times e^{-0,11 \times (Q/50,8)} \times [1,43 - 0,26 \times \log (A/2,59)] \quad (2)$$

donde:

S: volumen de sedimentos producidos (ton/km²/año)

Q: escorrentía media anual (mm)

A: área de la cuenca (km²)

Fleming:

$$Y = 66,091 \times Z^{0,8227} \quad (3)$$

donde:

Y: producción anual de sedimento (ton/año)

Z: caudal (m³/s)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del modelo. En el cuadro 1 se presentan los resultados obtenidos al calibrar con la primera y segunda mitad de los datos. En éstos se aprecia que los modelos obtenidos son estadísticamente significativos al 99% de confianza, poseen un alto valor de R² (0,94 y 0,90) y no presentan autocorrelación (Durbin-Watson>1,4). Esto indica que con los modelos desarrollados se puede continuar la validación del modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001).

CUADRO 1

Regresión con la primera y segunda mitad de los datos.
First and second half of data set regression

Variable	Coeficiente		Desviación estándar		Probabilidad	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Constante	0,143	0,607	0,260	0,421	0,606	0,209
Log ₁₀ Q	-0,223	-0,121	0,151	0,277	0,146	0,689
Log ₁₀ P	0,539	0,312	0,100	0,122	0,003	0,051
Log ₁₀ Flujo. C	0,225	0,165	0,074	0,111	0,028	0,196
Log ₁₀ Dens. C	0,212	0,189	0,061	0,074	0,017	0,143
Valor crítico de F	R ²		Desviación estándar modelo		Durbin-Watson	
(1)	0,0025	0,94	0,0816		2,82	
(2)	0,0096	0,9	0,1157		2,81	

(1). regresión con la primera mitad de los datos, (2): regresión con la segunda mitad de los datos

De esta forma, con el modelo calibrado con la primera mitad de los datos se estimó la segunda mitad, para luego analizar la relación de éstos con los valores que se midieron. Los resultados se presentan en el cuadro 2, donde se observa que los valores de los sólidos suspendidos estimados tuvieron una alta bondad de ajuste (0,79) respecto a los medidos. Esta relación se aprecia gráficamente en la figura 1.

Posteriormente, con el modelo calibrado con la segunda mitad de los datos se estimó la primera mitad y se analizó el ajuste entre los valores así estimados con los ya medidos. Estos resultados se presentan en el cuadro 2, donde los valores estimados y medidos presentan una alta bondad de ajuste (0,95). Esta relación se puede observar en la figura 2.

Como se puede ver, los valores de los R^2 (0,79 y 0,95) de ambas validaciones son altos, los modelos son significativos al 99% de confianza y no hay autocorrelación. Estos resultados indican que el modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001) es válido para estimar la concentración de sólidos suspendidos en una subcuenca del Río Biobío con las características edafoclimáticas y productivas ya señaladas.

Comparación de modelos. Esta comparación se realiza con modelos que estiman la producción de

sedimentos, lo que es posible gracias a la transformación de los resultados del modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001) a producción de sedimentos.

Los resultados de la comparación entre el modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001) y los antes desarrollados por Dendy y Bolton (1976) y Fleming (1969) se pueden apreciar en el cuadro 3. En éste se observan las diferencias entre ellos y la medición real de sólidos suspendidos en los cursos de agua en la cuenca en estudio.

El modelo propuesto por Fuentes *et al.* (2001), al ser calibrado para la cuenca en estudio, es el que mejor representa la presencia de sólidos en los cursos de agua. En tanto, los otros modelos sobreestiman la producción de sólidos suspendidos, siendo el más cercano el propuesto por Dendy y Bolton.

Un aspecto digno de destacar en esta comparación son las implicancias y repercusiones que puede acarrear el empleo de este tipo de modelos cuando no son adecuadamente calibrados y validados. Por ejemplo, se pueden sobreestimar los efectos negativos sobre la calidad del agua y con ello indicar malamente que se está desarrollando un manejo no adecuado del recurso forestal. Al emplear otro tipo de modelo de estimación de la erosión como es el caso de USLE (Córdoba, 1982.), no se han obtenido resultados mejores.

CUADRO 2

Regresión entre los sólidos suspendidos medidos y estimados por la primera y segunda parte de los datos de la validación.

Regression between measured suspended solids and those estimated when using the first and second half of data of validation.

Variable	Coeficiente		Desviación estándar		Estadígrafo T		Probabilidad	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Constante	0,6172	7,2840	2,6127	1,0120	0,8362	7,1976	0,8192	0,0001
SS medidos	0,7045	0,7435	0,1273	0,0607	5,5300	12,230	0,0006	0,0
Valor crítico de F	R^2		Desviación estándar modelo		Durbin-Watson		Grados de libertad	
(1)	0,0006	0,79	4,7356		2,82		9	
(2)	0,0	0,95	1,6600		2,12		9	

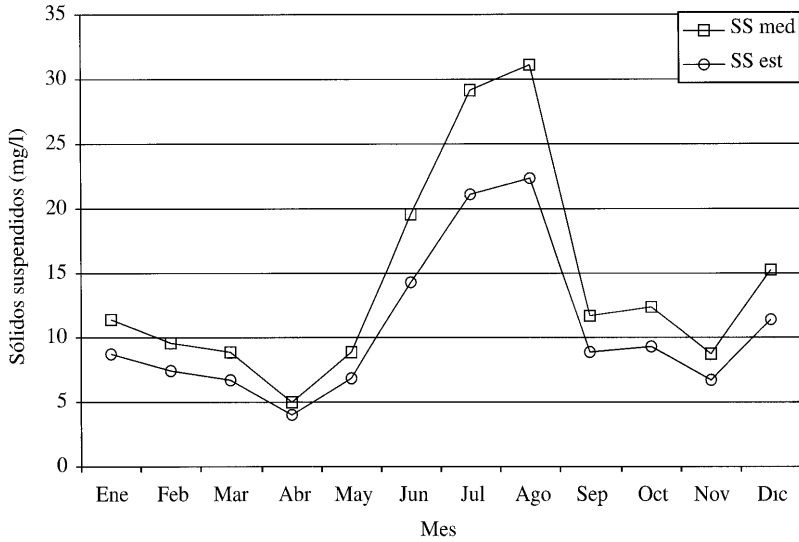


Figura 1. Sólidos suspendidos medidos y estimados por la primera mitad de los datos de la validación.

Suspended solids measured and estimated by the first half of the data of validation.

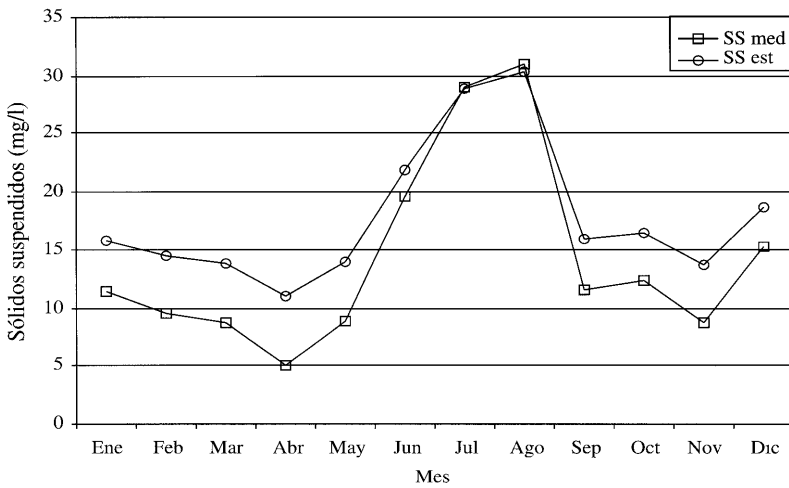


Figura 2. Sólidos suspendidos medidos y estimados por la segunda mitad de los datos de la validación.

Suspended solids measured and estimated by the second half of the data of validation.

Esto se demuestra en el estudio de Oyarzún (1994) en la cuenca del Río Biobío, donde se demuestra que el modelo USLE sobreestima en un 22% la erosión anual medida, lo que implica, en último término, sobreestimar la concentración de sedimentos. De ahí la importancia de contar con modelos locales para lograr una adecuada estimación y, además, que sean de fácil aplicación y rápida obtención de datos para no inducir a to-

mar decisiones erróneas en el proceso productivo de una cuenca forestal.

Análisis de escenarios. Con el objetivo de analizar la respuesta y sensibilidad de cada una de las variables incorporadas en el modelo propuesto, se realizó un análisis de sensibilidad. A continuación se presentan los resultados al modificar cada una de las variables $\pm 25\%$.

CUADRO 3

Producción de sedimentos medidos y estimados.
Measured and estimated sediment production.

Método	Cantidad de sedimentos (ton/km ² /año)	Error de estimación (ton/km ² /año)
Real de cuenca	0,0621	
Modelo propuesto	0,0576	0,003
Dendy y Bolton	0,2976	0,166
Fleming	0,9413	0,621

Caudal. Los resultados obtenidos con el modelo al variar el caudal se presentan en el cuadro 4. De acuerdo a éste es posible apreciar cómo la concentración de sólidos suspendidos disminuye al aumentar el caudal en un 25%. Si bien diversos estudios concluyen que esta variable principalmente provoca deslizamientos y erosión de los cauces, resultando en una mayor presencia de sólidos suspendidos (Harr, 1986), la principal

causa del comportamiento de las concentraciones observadas sería el denominado efecto de dilución. Si bien con caudales mayores el volumen neto de material arrastrado puede ser mayor, el volumen de agua crece a una tasa mayor que la cantidad de material incorporado al cauce. Esta situación se corrobora al disminuir el caudal, lo que provoca un aumento de los sólidos suspendidos en el curso de agua.

CUADRO 4

Concentración de sólidos suspendidos en función del caudal.
Suspended solids concentration as a function of discharge.

Mes	Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)				
	Estimados	Q +25%	%	Q -25%	%
Enero	11,2	10,3	-8,0	12,4	10,7
Febrero	8,4	7,8	-7,1	9,4	11,9
Marzo	11,0	10,2	-7,3	12,3	11,8
Abril	4,0	3,7	-7,5	4,5	12,5
Mayo	9,3	8,6	-7,5	10,3	10,8
Junio	20,6	19,0	-7,8	22,8	10,7
Julio	25,8	23,8	-7,8	28,6	10,9
Agosto	22,6	20,8	-8,0	25,0	10,6
Septiembre	13,3	12,3	-7,5	14,8	11,3
Octubre	14,7	13,6	-7,5	16,3	10,9
Noviembre	10,3	9,5	-7,8	11,4	10,7
Diciembre	15,1	14,0	-7,3	16,8	11,3

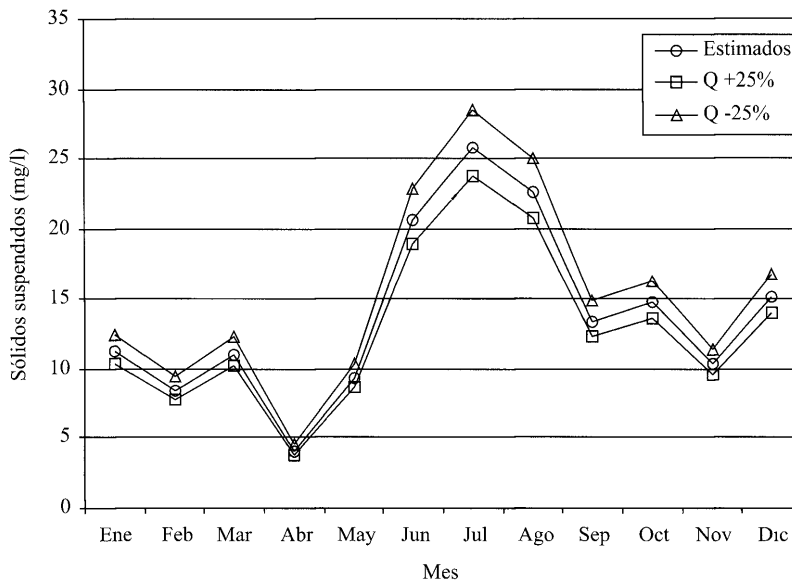


Figura 3. Nivel de sólidos suspendidos en función del caudal.
Level of suspended solids as a function of discharge.

Estos resultados se ilustran en el figura 3, donde se puede observar con más claridad el efecto de dilución con caudales mayores.

Precipitación. En el caso de la variable precipitación, la producción de sólidos suspendidos se incrementa en promedio un 9,6% cuando las precipitaciones se incrementan en un 25%. Al contrario, al disminuir esta variable, se provoca una

disminución de los sólidos en los cursos de agua, como se observa en el cuadro 5.

Estos resultados ratifican el hecho de que a mayor precipitación hay un mayor grado de erosión y concentración de sedimentos, lo que se intensifica al existir faenas de producción forestal (Wright *et al.*, 1990). Esta relación se observa más claramente en la figura 4, donde la mayor concentración de sedimentos se produce en los meses de invierno y específicamente en julio de 1989 (26 mg/l).

CUADRO 5

Concentración de sólidos suspendidos en función de la precipitación promedio.
Solid suspended concentration as a function of mean precipitation.

Mes	Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)				
	Estimados	P +25%	%	P -25%	%
Enero	11,2	12,3	9,8	10,0	-10,7
Febrero	8,4	9,2	9,5	7,5	-10,7
Marzo	11,0	12,1	10,0	9,8	-10,9
Abril	4,0	4,4	10,0	3,6	-10,0
Mayo	9,3	10,2	9,7	8,3	-10,8
Junio	20,6	22,5	9,2	18,3	-11,2
Julio	25,8	28,2	9,3	23,0	-10,9
Agosto	22,6	24,7	9,3	20,1	-11,1
Septiembre	13,3	14,6	9,8	11,9	-10,5
Octubre	14,7	16,1	9,5	13,1	-10,9
Noviembre	10,3	11,2	8,7	9,1	-11,7
Diciembre	15,1	16,6	9,9	13,5	-10,6

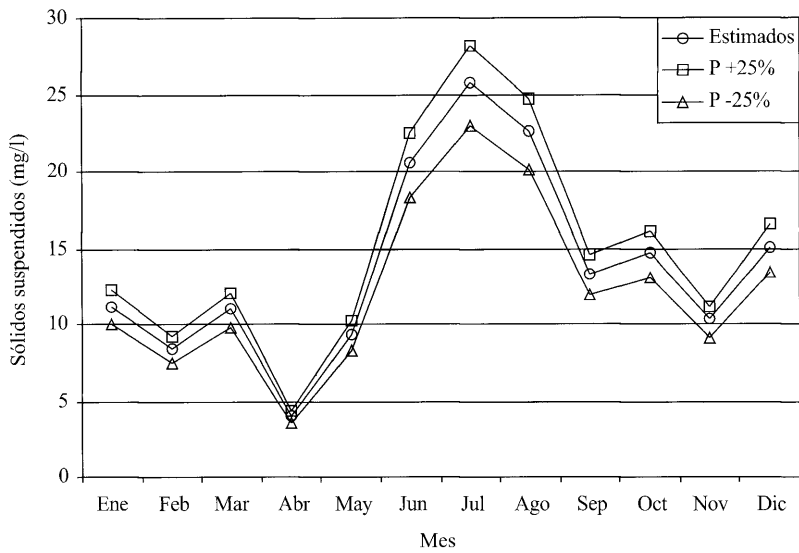


Figura 4. Nivel de sólidos suspendidos en función de la precipitación promedio. Level of suspended solids as a function of the mean precipitation.

Flujo de camiones. Los resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad aplicado sobre la variable Flujo de camiones se presentan en el cuadro 6. En promedio, los sólidos suspendidos se incrementan en un 4,4% al aumentar el flujo de camiones en un 25%. A la inversa, se provoca una disminución de los sólidos presentes en los cursos de agua al disminuir la variable.

Estos resultados son acordes con los obtenidos en otras investigaciones, que concluyen que ésta es una de las principales variables que influyen sobre la concentración de sedimentos y que a mayor número de camiones que transitan, mayor es la cantidad de sedimentos producidos (Reid y Dune, 1984; Swift, 1984; Megahan, 1978). Se debe tener presente también que la influencia de esta varia-

CUADRO 6

Concentración de sólidos suspendidos en función del flujo de camiones. Solid suspended concentration as a function of tracks flow.

Mes	Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)				
	Estimados	FC +25%	%	FC -25%	%
Enero	11,2	11,7	4,5	10,6	-5,4
Febrero	8,4	8,8	4,8	8,0	-4,8
Marzo	11,0	11,5	4,5	10,5	-4,5
Abril	4,0	4,2	5,0	3,8	-5,0
Mayo	9,3	9,7	4,3	8,8	-5,4
Junio	20,6	21,5	4,4	19,5	-5,3
Julio	25,8	26,9	4,3	24,4	-5,4
Agosto	22,6	23,5	4,0	21,4	-5,3
Septiembre	13,3	13,9	4,5	12,6	-5,3
Octubre	14,7	15,3	4,1	13,9	-5,4
Noviembre	10,3	10,7	3,9	9,7	-5,8
Diciembre	15,1	15,8	4,6	14,3	-5,3

ble, sobre la concentración de sedimentos, se produce con un desfase de cinco meses después de ocurrido el tránsito de los camiones. De acuerdo a esto, el mes que tuvo el mayor aumento porcentual (5%) en la concentración de sedimentos fue abril, lo que implica que el flujo de camiones en diciembre del año anterior produjo el mayor efec-

to sobre la concentración de sedimentos en el período de estudio. A su vez, los meses con mayor flujo de camiones son los de verano, lo que provocó una mayor concentración de sedimentos en los meses de invierno, como se observa en la figura 5, donde se aprecia el cambio en el nivel de los sólidos al variar el flujo de camiones.

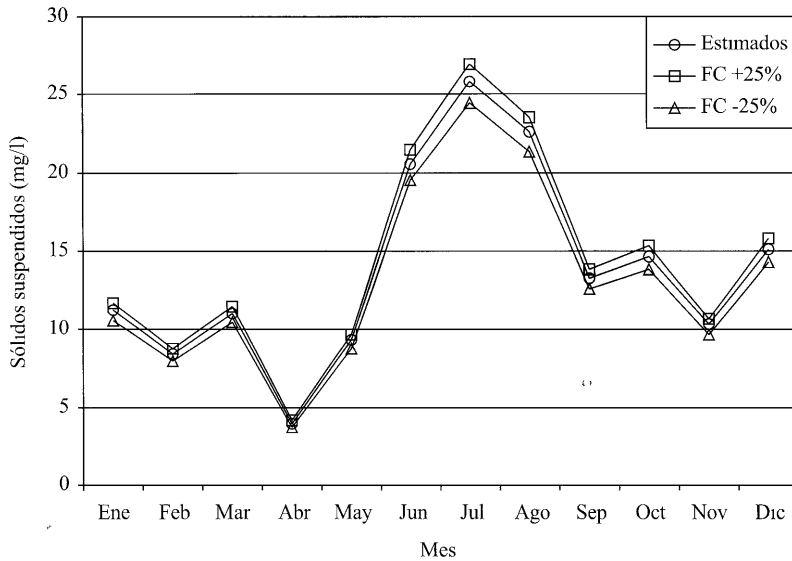


Figura 5. Nivel de sólidos suspendidos en función del flujo de camiones.
Level of suspended solids as a function of trucks flow.

Longitud de caminos. El efecto de la variación en la longitud de los caminos se presenta en el cuadro 7. Al analizar los resultados se aprecia que los sólidos suspendidos aumentan en un 3,4% al ser un 25% mayor la longitud de caminos. Estos aumentos en los sólidos suspendidos se deberían principalmente a que se estaría usando una mayor superficie de caminos, con lo cual potencialmente es mayor la superficie expuesta a erosión y por ende producción de sedimentos (Bilby *et al.*, 1989). De esta manera, el efecto de la longitud de caminos sobre los sólidos suspendidos se observa en la figura 6, donde la mayor cantidad de sedimentos suspendidos corresponden a los meses de invierno, producto del uso de los caminos en los meses de verano.

Nivel de cosecha. Este análisis se refiere al aumento del flujo de camiones y de los caminos utilizados (longitud de caminos), producto de un aumento de la cosecha forestal, que está incluida

implícitamente en el modelo a través de estas dos variables mencionadas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, un mayor nivel de cosecha va asociado a un incremento en el flujo de camiones y de caminos utilizados, producto de lo cual hay un aumento en los sólidos liberados a los cursos de agua, los cuales se incrementan en promedio en un 8% al aumentar el nivel de cosecha en un 25%. Por otra parte, al bajar el nivel de cosecha, se aprecia que la concentración de sólidos suspendidos disminuye en forma importante. De esta manera, se puede concluir que la cosecha forestal produce una alteración significativa sobre el ambiente, ya que al bajar en un 25% la variable se disminuye alrededor de un 9% los sólidos liberados a los cursos de agua, con los consecuentes beneficios sobre la calidad del recurso hídrico de la zona.

Al respecto es importante notar que la cuenca estudiada presenta un bajo nivel de sólidos en suspensión, lo cual se refleja en una reducida produc-

ción de sedimentos anualmente (0,06 ton/km²/año), aun existiendo cosecha. Esto implica que aunque la cosecha provoca un importante aumento de la producción de sólidos suspendidos ésta no alcanza a provocar un daño severo a la red hídrica de la cuenca, debido probablemente a que el 30% de la superficie de la cuenca consta de praderas ar-

tificiales y naturales con pastoreo moderado, que brindan una adecuada protección al suelo contra la erosión (FAO, 1997; Guevara, 1997). Lo anterior se puede apreciar mejor al analizar la figura 7, donde se ve claramente la disminución de los sólidos suspendidos al bajar la cosecha en un 25%.

CUADRO 7

Concentración de sólidos suspendidos en función de la longitud de caminos
Solid suspended concentration as a function of of ways length

Mes	Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)				
	Estimados	LC +25%	%	LC -25%	%
Enero	11,2	11,6	3,6	10,8	-3,6
Febrero	8,4	8,7	3,6	8,1	-3,6
Marzo	11,0	11,4	3,6	10,6	-3,6
Abril	4,0	4,2	5,0	3,9	-2,5
Mayo	9,3	9,6	3,2	8,9	-4,3
Junio	20,6	21,2	2,9	19,8	-3,9
Julio	25,8	26,6	3,1	24,8	-3,9
Agosto	22,6	23,3	3,1	21,7	-4,0
Septiembre	13,3	13,7	3,0	12,8	-3,8
Octubre	14,7	15,2	3,4	14,1	-4,1
Noviembre	10,3	10,6	2,9	9,9	-3,9
Diciembre	15,1	15,6	3,3	14,6	-3,3

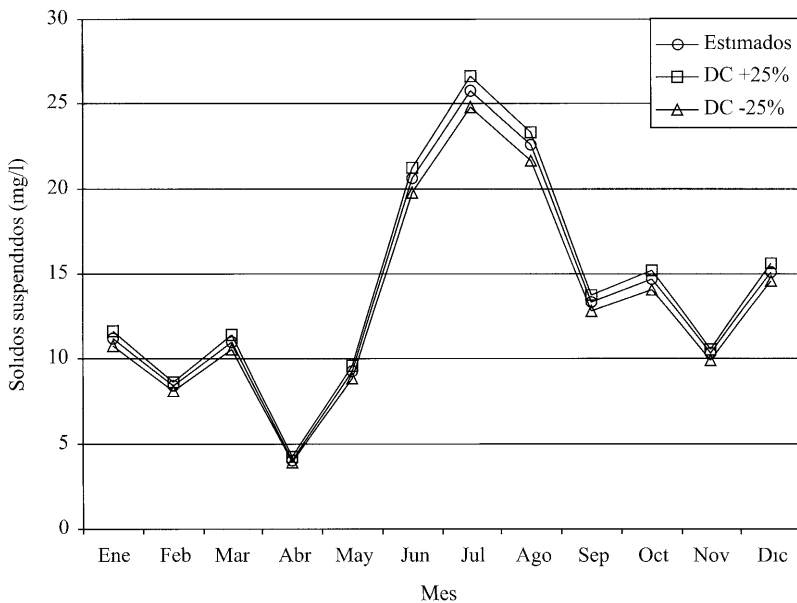


Figura 6. Nivel de sólidos suspendidos en función de la longitud de caminos.
Level of suspended solids as a function of ways length

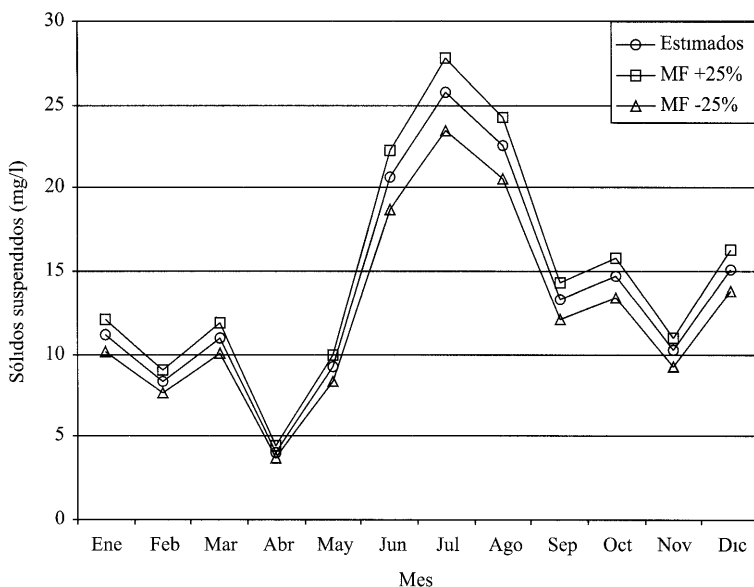


Figura 7. Nivel de sólidos suspendidos en función del flujo de camiones y longitud de caminos.

Level of suspended solids as a function of tracks flow and ways length

En síntesis, los resultados obtenidos y el análisis de escenarios presentado en el cuadro 9 ponen de manifiesto que la variable más influyente sobre el proceso modelado es la precipitación, que además es el principal agente de la erosión hídrica (Córdoba, 1982; Infante, 1985; Guevara, 1997). En los resultados se puede observar que la precipitación promedio resulta ser la variable con mayor impacto, al provocar cambios en los valores estimados por el modelo, en un $\pm 10,2\%$ en promedio. La segunda variable con mayor efecto es el caudal, se-

guido por el flujo de camiones y la longitud de caminos, en conjunto. De esto se deduce que la variación en la producción de sedimentos es causada principalmente por las características hidrológicas de la zona, especialmente la precipitación. Sin embargo, la cosecha forestal también muestra un efecto significativo, al dejar el suelo descubierto y más propenso al proceso erosivo, además de alterar el ciclo hidrológico, provocando una mayor concentración de sedimentos y, por ende, un mayor deterioro del recurso hídrico en la cuenca.

CUADRO 8

Concentración de sólidos suspendidos en función del flujo de camiones y longitud de caminos (MF).

Solid suspended concentration as a function of trucks flow and ways length (MF).

Mes	Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)				
	Estimados	MF +25%	%	MF -25%	%
Enero	11,2	12,1	8,0	10,2	-8,9
Febrero	8,4	9,1	8,3	7,7	-8,3
Marzo	11,0	11,9	8,2	10,1	-8,2
Abril	4,0	4,4	10,0	3,7	-7,5
Mayo	9,3	10,0	7,5	8,4	-9,7
Junio	20,6	22,2	7,8	18,7	-9,2
Julio	25,8	27,8	7,8	23,5	-8,9
Agosto	22,6	24,3	7,5	20,5	-9,3
Septiembre	13,3	14,3	7,5	12,1	-9,0
Octubre	14,7	15,8	7,5	13,4	-8,8
Noviembre	10,3	11,0	6,8	9,3	-9,7
Diciembre	15,3	16,3	7,9	13,8	-8,6

CUADRO 9

Variación porcentual al cambiar el nivel de cada variable empleada.

Percentage variation when changing the level of each selected variable.

Variable	Variación porcentual de sólidos suspendidos Totales (%)		
	+ 25%	-25%	Absoluta
Caudal	-7,6	11,2	9,4
Precipitación promedio	9,6	-10,8	10,2
Flujo de camiones	4,4	-5,2	4,8
Densidad de caminos	3,4	-3,7	3,6
Manejo forestal	7,9	-8,9	8,4

4. CONCLUSIONES

El modelo propuesto demuestra ser válido para estimar y cuantificar la concentración de sedimentos en una subcuenca del Río Biobío, producto de la precipitación, el caudal, el flujo de camiones y la longitud de caminos. Esto queda de manifiesto en la doble validación cruzada realizada, donde se obtienen altos valores de R^2 (0,94 y 0,90), un alto nivel de significancia y no presentar autocorrelación en los residuos.

De igual forma, a través de la comparación del modelo propuesto en este estudio con otros ya existentes, se confirma que es el mejor estimador de la concentración de sedimentos en una cuenca con las características ya señaladas. Su gran ventaja es la de emplear variables forestales para su estimación y de ser un modelo simple y de fácil aplicación al no incluir engorrosos cálculos para cada variable. A su vez, las variables son de fácil medición y de registro común en los informes de manejo de los predios y en el Banco Nacional de Aguas de la Dirección General de Aguas.

Por último, el mayor efecto sobre el nivel de sólidos suspendidos se debe a las precipitaciones y el caudal registrado, efecto que se potencia en presencia de faenas de producción en la zona,

puediendo provocar cambios de alrededor de un 9% en la concentración de sedimentos. Sin embargo, queda de manifiesto el hecho de que la variable más influyente sobre el proceso modelado es la precipitación, que además es el principal agente de la erosión hídrica y que influye en forma importante sobre los demás elementos del ciclo hidrológico (Córdoba, 1982; Infante, 1985; Guevara, 1997).

5. BIBLIOGRAFIA

- ALMOROX, J., R. DE ANTONIO, A. SAA, M. CRUZ, J. GASCO. 1994. *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, España.
- ASHRAF, M., D. BORAH. 1992. "Modeling pollutant transport in runoff and sediment", *Transactions of ASAE* 35 (6): 1789-1796.
- BILBY, R., K. SULLIVAN, S. DUNCAN. 1989. "The generation and fate of road-surface sediment in forested watersheds in Southwestern Washington", *Forest Science*, 35 (2): 453-468.
- CORDOBA, M. 1982. Modelación matemática de la erosión hídrica pluvial. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- FAO. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 55. Roma.
- FUENTES, E., J. TRONCOSO, C. BONILLA. 2001. Producción de sedimentos en cuencas forestales I: Formulación de un modelo matemático. Enviado a revista *Bosque*.
- GUEVARA, E. 1997. Manejo integrado de cuencas. Documento de referencia para América Latina. FAO, Chile.
- HARR, R. 1986. "Effects of clearcutting on rain-on-snow runoff in Western Oregon: a new look at old studies", *Water Resources Research* 22 (7): 1095-1100.
- INFANTE, L. 1985. Evaluación de las pérdidas de suelo por el efecto de la erosión hídrica en un suelo de la provincia de Valdivia, Xª Región. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile.
- HIRSCHI, M., B. BARFIELD. 1988. "KYERMO, a physically based research erosion model. Part II. Model sensitivity analysis and testing", *Transactions of ASAE*, 31 (3): 814-820.
- MEGAHAN, W. 1978. Reducing erosional impacts of roads. En: FAO Conservation guide N° 1. Roma.
- NEARING, N., D. PAGE, J. SIMANTON, L. LANE. 1989. "Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model", *Transactions of ASAE*, 32 (3): 919-924.
- NELSON, P., E. COTSARIS, J. OADES. 1996. "Nitrogen, phosphorus, and organic carbon in streams draining two grazed catchments". *Journal of Environmental Quality* 25: 1221-1229.
- OYARZUN, C. 1994. "Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Biobío". *Bosque*, 14 (1): 45-54.
- PEÑA, D. 1991. *Estadística, modelos y métodos*. 2. Modelos lineales y series temporales. Alianza Universidad Textos. Madrid, España.
- REID, L., T. DUNNE. 1984. "Sediment production from forest road surfaces". *Water Resources Research* 20 (11): 1753-1761.

EROSION, MODELO DE REGRESION, CALIDAD DEL AGUA, PRODUCCION FORESTAL

- SWIFT, L. 1984. "Gravel and grass surfacing reduces soil loss from mountain roads". *Forest Science* 30 (3): 657-670.
- VAITHIYANATHAN, P., D. CORRELL. 1992. "The Rhode river watershed: phosphorus distribution and export in forest and agricultural soils". *Journal of Environmental Quality* 21: 280-288.
- WILLIAMS, J., H. BERNDT. 1977. "Sediment yield prediction based on watershed hydrology". *Transactions of ASAE* 20, (3): 1100-1104.
- WRIGHT, K., K. SENDEK, R. RICE, R. THOMAS. 1990. "Logging effects on streamflow: Storm runoff at Caspar Creek in Northwestern California". *Water Resources Research*, 26 (7): 1657-1667.